

А. А. ПРОТАСОВ

**СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО ТЕХНОЛОГИИ
ГОРЯЧЕЙ И ХОЛОДНОЙ
ПРОКАТКИ СТАЛИ
И СПЛАВОВ**



Handwritten signature



А. А. ПРОТАСОВ

**СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО ТЕХНОЛОГИИ
ГОРЯЧЕЙ И ХОЛОДНОЙ
ПРОКАТКИ СТАЛИ
И СПЛАВОВ**

Допущено Министерством высшего и
среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия для студентов
вузов, обучающихся по специальности
«Обработка металлов давлением»



Издательство „Металлургия“
Москва 1972

УДК 621.771.073 (075.8)

Сборник задач по технологии горячей и холодной прокатки стали и сплавов. Протасов А. А. Изд-во «Металлургия», 1972, 320 с.

Сборник является учебным пособием для студентов металлургических вузов по курсу «Обработка металлов давлением».

Приведены типичные задачи с решением по технологии горячей и холодной прокатки сталей и сплавов с высоким сопротивлением деформации. При составлении задач особое внимание уделено основным звеньям технологического процесса, от которых зависит качество готовых изделий и производительность прокатных станов, а именно нагреву металла, его деформации и охлаждению. Помещены также задачи по экономике прокатного производства. Илл. 133. Табл. 64. Библ. 95 назв.

ПРОТАСОВ Анатолий Александрович

**СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕЙ И ХОЛОДНОЙ
ПРОКАТКИ СТАЛИ И СПЛАВОВ**

Редактор Б. В. Кучеряев

Редактор издательства С. С. Тарасов Технический редактор Г. Н. Каляпина
Переплет художника В. П. Осипова

Сдано в производство 18/X 1971 г. Подписано в печать 31/III 1972 г.
Бумага типографская № 2 60×90¹/₁₆, 10,0 бум. л., 20,0 печ. л. Уч.-изд. л. 19,62
Т-05975. Изд. № 5407. Тираж 4400 экз. Заказ 1344. Цена 92 коп.

Издательство «Металлургия», Москва, 119034, 2-й Обыденский пер., 14

Ленинградская типография № 6 Главполиграфпрома Комитета по печати
при Совете Министров СССР, Ленинград, 193144, ул. Моисеенко, 10

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
-----------------------	---

Глава I

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ И РАЗМЕРОВ СЛИТКОВ И ЗАГОТОВОК

1. Общие сведения и методика расчета	7
2. Примеры решения задач	22

Глава II

НАГРЕВ СТАЛИ И СПЛАВОВ

1. Основные формулы и методика расчета	30
2. Примеры решения задач	57

Глава III

НАПРЯЖЕННОЕ И ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕЛА

1. Основная задача теории пластической деформации	75
2. Принятые обозначения величин, встречающихся при решении задач	76
3. Типовые задачи по определению напряжений	79
4. Основные положения и формулы из теории пластической деформации	96
5. Связь между напряжениями и деформациями	101
6. Основные параметры деформации и определение смещенного объема	106
7. Скорость деформации	110
8. Вопросы для самопроверки	112

Глава IV

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ

1. Очаг деформации и условия захвата металла валками	114
2. Контактное трение	123
3. Продольное течение металла в очаге деформации	128
4. Поперечное течение металла в очаге деформации (уширение)	136
5. Неравномерная деформация	147
6. Давление металла на валки	153
7. Энергия, затрачиваемая на прокатку	172

Глава V

КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ

1. Общие сведения	176
2. Нахождение центра тяжести калибра	177
3. Катающие (рабочие) диаметры валков	184
4. Задачи по калибровке валков блюминга	191
5. Задачи по калибровке валков непрерывных заготовочных станов	200
6. Калибровка валков для прокатки квадратной стали	206
7. Калибровка валков для прокатки круглой и шестигранной стали	231
8. Калибровка валков для полосовой стали	241
9. Калибровка валков листовых станов	247
10. Калибровка валков для фасонных профилей	253

Глава VI

ОХЛАЖДЕНИЕ СТАЛИ

1. Общие сведения	284
2. Определение температуры металла в конце прокатки	289
3. Вопросы для самопроверки	296

Глава VII

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ЭКОНОМИКИ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

1. Себестоимость прокатных изделий	297
2. Технико-экономические показатели	300
3. Определение производительности прокатных станов	307
Литература	318

При решении конкретных производственных задач студенты испытывают значительные трудности из-за недостаточно развитых навыков самостоятельно рассматривать вопросы технологии в органической их связи с прокатным оборудованием и с учетом технико-экономических производственных показателей, из-за затраты значительного времени на поиски типовых задач в изданных многочисленных трудах—учебниках и учебных пособиях.

Книг, в которых систематизированно изложены решения производственных задач, издано мало¹. Такой книгой, с примерными расчетами типовых задач, с методическими указаниями и краткими сведениями из курса теории прокатки является предлагаемый сборник задач.

Настоящий сборник задач может быть полезным инженерно-техническим работникам прокатных цехов при решении задач, связанных с использованием скрытых резервов, позволяющих на тех же самых производственных площадях и мощностях увеличить выпуск и улучшить качество прокатных изделий.

Сборник задач составлен в соответствии с учебной программой специальных курсов теории и технологии прокатного производства в порядке последовательности технологических операций.

Автор выражает искреннюю признательность заведующему кафедрой обработки металлов давлением Магнитогорского горно-металлургического института проф. докт. техн. наук М. И. Бояршинову, ученому секретарю кафедры, доц. канд. техн. наук В. А. Курдюмовой и всем сотрудникам кафедры, участвовавшим в обсуждении книги и давшим много ценных замечаний. За тщательное рецензирование и научное редактирование выражаю искреннюю благодарность канд. техн. наук Б. В. Кучеряеву.

Методические указания к решению задач

Прежде всего учащиеся должны внимательно прочитать содержание вводной части главы: «Общие сведения», а затем дать ответы на все поставленные вопросы, перечисленные в разделе «Вопросы для самопроверки». Если в конце главы такого раздела нет, то учащийся должен, пользуясь курсом по теории прокатки [30], [31], [36], [38] и по технологии прокатки [1], [2], [3],

¹ См. [64] и [85].

[14], [24], самостоятельно составить вопросы для самопроверки и дать на них ответы.

При изучении и самостоятельном решении рекомендуется на листке бумаги записать в краткой форме содержание задания в следующем порядке: исходные данные, цель задачи, формулы и методы, необходимые для ее решения.

Полученные ответы необходимо сравнить с практическими производственными данными, которые имеются в тексте. В случае резкого расхождения ответа с практическими данными необходимо выяснить причину этого и вновь произвести расчет задачи с учетом выявленных ошибок.

В расчетах следует пользоваться единицами измерений Международной системы (СИ), а в скобках указывать данные по старым системам единиц. Например: $вт/(м^2 \cdot град)$ [$ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град)$] или $Мн/м^2$ ($кг/мм^2$) и т. д.

При решении задач необходимо строго придерживаться тех условных обозначений разных величин, которые приняты в тексте задачника, и в той последовательности решения задач, которая принята автором.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ И РАЗМЕРОВ СЛИТКОВ И ЗАГОТОВОК

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Выбор массы и размеров исходного слитка или заготовки для прокатки любого изделия находится в непосредственной зависимости от целого ряда технологических и организационно-технических условий прокатного производства. Главные из них следующие: тип прокатного стана, калибровка валков и схема прокатки, конструкция нагревательных устройств, способ раскроя раската, средства охлаждения, методы обработки изделия в адьюстаже и, особенно, природа металла в литом и в деформированном состояниях.

Аналитический расчет массы и размеров исходного объема металла затруднителен, особенно для фасонных профилей (балок, швеллеров, угловой стали, рельсов и др.). Поэтому в отдельных случаях их определяют по эмпирическим зависимостям.

Ниже приведено несколько примеров по определению массы и размеров исходного металла. Решения даны в общем виде.

Задача № 1. Для прокатки блюма сечением $b \cdot h$, длиной l в известных производственных условиях требуется определить массу и размеры слитка.

Решение. 1. Масса исходного блюма

$$m = bhlp, \quad (1-1)$$

где b , h и l — ширина, толщина и длина блюма, м;

ρ — плотность стали, кг/м³;

m — масса блюма, т;

V — объем, м³;

$$\rho = 7876 - 40C - 16Mn - 73Si - 164S -$$

$$- 117P + 11Cu + 4Ni + Cr + 95W -$$

$$- 120Al + 100As, \quad (2-1)$$

где C, Mn, Si — содержание углерода, марганца, кремния и других примесей, %.

2. Задаваясь числом годных блюмов n , получаемых из слитка, и коэффициентом k расхода металла на 1 т годного (табл. 1 и 2), определяют массу слитка

$$M = mkn \text{ кг.} \quad (3-1)$$

Расход металла и выход годного при прокатке различных изделий [2]

Наименование изделий	Потери металла, %		Выход годного, %	Коэффициент расхода металла на 1 т годного
	угар	обрезь		
<i>I. Блюминги и слябинги</i>				
Блюмы из кипящей низкоуглеродистой стали	2	5—6,5	91—92,5	1,08—1,1
Блюмы из спокойной углеродистой стали . . .	2	12,5—15,5	82—85	1,18—1,22
Блюмы из рельсовой стали	2	15,5—17,5	80—82	1,22—1,25
Блюмы из шарикоподшипниковой стали . . .	2	19,5	78	1,28
Блюмы из инструментальной углеродистой стали	2	18,5	79	1,265
Блюмы из инструментальной легированной стали	2	18,5	79	1,265
Слябы из кипящей углеродистой стали	2	10,5—13,5	84,7—89,5	1,12—1,18
Слябы из спокойной углеродистой стали	2	17—20	71,5—80,5	1,24—1,29
Слябы из низкоуглеродистой стали	2	22—24	73,5—75,5	1,32—1,36
Слябы из нержавеющей сталей аустенитного класса			76,35—74,05	1,31—1,35
Трубная обточенная заготовка из обточенных слитков нержавеющей стали 1X18H9T		По данным В. Г. Сперанского и Г. М. Бородулина [4]	63,6	1,57
Трубная обточенная заготовка из необточенных слитков стали 1X18H9T			58,1	1,72
<i>II. Рельсо-балочные станы; станы линейного типа</i>				
Станы для прокатки рельсов	1,5	3,5—4	95	1,05
Станы для прокатки балок	1,5	4,5	94	1,06
Крупносортные:				
650	2	7	91	1,099
500	2	7	91	1,099
Среднесортные:				
450	2	6	92	1,87
350	2	5	93	1,075
Мелкосортные:				
300	2	5	93	1,075
250	2	5	93	1,075

Наименование изделий	Потери металла, %		Выход годного, %	Коэффициент расхода металла на 1 т годного
	угар	обрезь		

III. Станы с последовательным расположением клетей

Крупносортный 530 (кросс-коунтри)	2	5—7	91—93	1,075—1,099
Среднесортный 350 (непрерывный)	2	3—5	93—95	1,052—1,075
Мелкосортный 300 (непрерывный)	2	2—5	93—96	1,041—1,075
Мелкосортный 250 (непрерывный)	2	2—4	94—96	1,041—1,075

Примечание. Примерный сортament слэбов для прокатки листовой универсальной стали приведен в табл. 6, а заготовок различных сортовых станов — в табл. 8.

Таблица 2

Расход слэбов при горячей прокатке листовой стали

Листовая сталь	Коэффициент расхода металла на 1 т годного	
	двухклетевые толстолистовые станы линейного типа	непрерывные станы
Кипящая углеродистая:		
в листах	1,18—1,23	1,065—1,075
в рулонах	—	1,03—1,05
Спокойная углеродистая:		
в листах	1,20—1,25	1,075
в рулонах	—	1,03—1,075
Низколегированная:		
в листах	1,20—1,27	1,075
в рулонах	—	1,064

3. Определяют объем слитка, исходя из плотности стали в литом состоянии:

$$V = \frac{M}{\rho} \quad (4-1)$$

4. Задаются отношением высоты слитка H к стороне среднего его сечения $a_{\text{ср}}$, которое находится в пределах:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для спокойной стали} \quad n' = \frac{H}{a_{\text{ср}}} \leq 3; \\ \text{для кипящей стали} \quad n' = \frac{H}{a_{\text{ср}}} \geq 3 \div 4. \end{array} \right\} \quad (5-1)$$

Если слиток квадратного сечения, то объем слитка, без учета радиусов закругления углов его среднего сечения, можно определить по формуле

$$V = n' a_{\text{ср}}^3. \quad (6-1)$$

При $n' = 3$ объем слитка $V = 3a_{\text{ср}}^3$, или

$$a_{\text{ср}} = \sqrt[3]{\frac{V}{3}}. \quad (7-1)$$

При расчетах объема слитка плотность металла ρ следует принимать равной, кг/м^3 : 6400—6500 для кипящей стали; 7200—7300 для спокойной стали; 7800—7850 для деформированной углеродистой стали и 6000 для прибыльной части слитка [1].

5. На практике удобнее рассчитывать сторону среднего сечения слитка без учета этих закруглений, т. е. рассматривать сечение как квадрат, прямоугольник или круг и без гофрирования его поверхности.

Учитывая два фактора — неплотность слитка и округленность его углов, М. Л. Зарошинский [1] рекомендует для вычисленного объема слитка вводить поправочные коэффициенты: 1,2 для кипящей стали и 1,1 для спокойной стали.

6. Высоту тела слитка определяют по формуле

$$H = n' a_{\text{ср}}. \quad (8-1)$$

7. Задаются конусностью слитка по высоте (на каждую сторону), которую принимают равной:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для спокойной стали } i = (0,03 \div 0,05) H \text{ мм;} \\ \text{для кипящей стали } i = (0,007 \div 0,014) H \text{ мм.} \end{array} \right\} \quad (9-1)$$

8. Тогда:

$$\left. \begin{array}{l} B = a_{\text{ср}} + i; \\ C = a_{\text{ср}} - i. \end{array} \right\} \quad (10-1)$$

9. Размеры слитков круглого сечения находят таким же методом, только вместо $a_{\text{ср}}$ в расчетах оперируют средним диаметром $d_{\text{ср}}$. Приняв $H/d_{\text{ср}} = m'$, находят объем слитка без прибыли по формуле

$$V = 0,785 d_{\text{ср}}^3 m',$$

откуда

$$d_{\text{ср}} = \sqrt[3]{\frac{V}{0,785 m'}}. \quad (11-1)$$

Выше был приведен расчет массы слитка без учета механической его обработки, т. е. обдирки поверхностного дефектного слоя,

Для удаления поверхностных дефектов в отдельных случаях слитки подвергают обдирке на специальных токарных станках. Потеря металла при этом, по опытным данным, составляет 7—13% [5]. Тогда масса слитка после обдирки равна:

$$M' = (0,93 \div 0,87) M, \quad (12-1)$$

где M — масса слитка до обдирки.

По данным М. Л. Зарошинского [1], масса квадратных слитков достигает 10,5 т и более, а плоских (для листа) до 31—59 т. Масса слитков из легированной и высокоуглеродистой сортовой стали должна быть не более 6—7 т. Предельные значения параметров слитков приведены в табл. 3.

Таблица 3

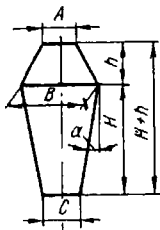
Предельные значения параметров слитков из спокойной стали
[1, 3, 4]

Масса слитков круглого и квадратного сечений, кг	$\frac{h}{H}$	$\frac{m}{M} \cdot 100, \%$	$i, \%$	Масса плоских слитков, кг	Сечение слитка, мм		Высота слитка, мм	
					для низа $C \times C$	для верха $B \times B$	до прибыли H	полная $H + h$
200 ÷ 500	0,27 ÷ 0,34	17 ÷ 22	3—6	5 000	0,54 × × 0,54	0,66 × × 0,66	1,68	2,18
600 ÷ 1000	0,20 ÷ 0,30	12 ÷ 20	2—5	7 100	0,65 × × 0,57	0,75 × × 0,67	2	2,45
1200 ÷ 500	0,22 ÷ 0,32	13 ÷ 22	2,5— 3,0	9 760	0,735 × × 0,57	0,865— 0,77	2,16	2,7

Для качественной стали

До 500	0,25— 0,35	3,2— 3,6	3—5,5	10 800	0,580 × × 0,942	0,64 × × 0,99	2,2	2,65
500—6000	0,20— 0,32	2,6— 3,4	2,6— 4,5	12 800	580 × × 1195	0,64 × × 1,22	2,2	2,65
				14 800	580 × × 1305	0,64 × × 1,34	2,2	2,65

Основные размеры слитка



Примечание. Средний размер поперечного сечения

$$B_{\text{ср}} = \frac{B + C}{2};$$

конусность слитка

$$i = \frac{B - C}{2H} \cdot 100\%$$

или

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B - C}{2H}.$$

m и M — масса прибыли и тела слитка;
 h и H — высота прибыли и тела слитка.

Обдирке подвергают слитки из сталей и сплавов, которые перечислены ниже [5, с. 28]: стали нержавеющая и кислотостойкая, окалиностойкая и жаропрочная, сталь для сварочной проволоки, сплавы с высоким омическим сопротивлением (нихромы, хромали), стали и сплавы со специальными физическими свойствами [высокомарганцовистая, платинит (Н42), инвар (Н36), элинвар и др.].

Потери металла при обдирке круглых слитков приведены в табл. 4.

Таблица 4

Потери металла при обдирке круглых слитков [5, с. 28]

Сталь	Масса слитка, кг	Способ разливки	Глубина обдирки по норме, мм		Потери металла при обдирке на 1 т годовых слитков, кг
			прибыльной части слитка	тела слитка	
X20H80	500	Сифоном Сверху	1 15	8 1	160 —
X15H60	1000	Сверху	2	2	—
X15H60	500	Сифоном Сверху	25 25	15 2	125 —
1X18H9T	500	Сифоном Сверху	8 8	8 8	90 —
1X18H9, 0X18H9	500	Сифоном Сверху	8 8	8 8	72 —
X125T, X17	500	Сифоном	12	10	—
X25, X28		Сверху	2	15	120—150
1X13, 3X13	500	Сифоном Сверху	8 10	8 10	85 —

Примечания: 1. Слиток до обдирки на производстве считают «черным», после обдирки — годным для передела.

2. Потери металла при обдирке составляют 6,8—13,8% от заданного.

Задача № 2. Требуется определить размеры и массу слитка для прокатки сляба размерами $b \times h \times l$ при заданных условиях производства.

Рассмотрим случай прокатки, когда из одного слитка получается один сляб.

Решение. 1. По формулам (1-1)—(3-1), учитывая, что $n = 1$, определяют массу сляба и слитка. Расход металла на 1 т годного находят по табл. 1.

2. По заданной плотности стали ρ определяют объем слитка V .

3. Задаваясь длиной слитка L , пользуясь опытными данными или данными табл. 5, по формуле (17-1) определяют площадь среднего сечения слитка $S_{\text{ср}}$.

Таблица 5

Основные размеры плоских слитков

Масса слитка, т	Размеры, мм			
	высота L	толщина $H_{\text{ср}}$	ширина $B_{\text{ср}}$	ширина получаемых слябов b
15	2000	750	1600	1400—1500
12	1900	750	1400	1200—1300
10	1900	625	1200	1000—1100
8	1950	625	1000	700—900
4,5	1850	625	700	600

4. По формуле (15-1) рассчитывают ширину среднего сечения слитка $B_{\text{ср}}$.

5. По формуле (16-1) определяют толщину среднего сечения слитка $H_{\text{ср}}$.

6. Определяют размеры слитка.

Слитки, предназначенные для прокатки на лист (обычно плоские) характеризуются отношениями ширины $B_{\text{низ}}$ к толщине $H_{\text{низ}}$ и высоты L к толщине среднего сечения $H_{\text{ср}}$, а также конусностью i .

На основании опытных данных для плоских слитков нержавеющей стали принимают следующие ориентировочные отношения размеров [4]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{B_{\text{низ}}}{H_{\text{низ}}} &= 1,8 \div 2,5; \\ \frac{L}{H_{\text{ср}}} &= 2,5 \div 4,0. \end{aligned} \right\} \quad (13-1)$$

Для плоских слитков из обычных сталей принимают следующие отношения размеров [2]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{B_{\text{низ}}}{H_{\text{низ}}} &= 2 \div 4; \\ \frac{L}{H_{\text{ср}}} &= 3,5 \div 6. \end{aligned} \right\} \quad (14-1)$$

Для кипящей стали отношение L/H можно принимать значительно большим, чем для спокойной стали, особенно для мелких слитков. Конусность слитков (i) должна быть минимальной, так как с увеличением ее, если слиток прокатывают на обжимном стане трио с постоянным зазором между буртами валков, может

возникнуть буксование слитка при первом проходе его через калибр.

Размеры слябов, используемых для прокатки листовой и универсальной стали приведены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

Размеры слябов для прокатки листовой и универсальной стали
[5, с. 283]

Станы	Размеры слябов, мм			Масса, т
	толщина	ширина	длина	
Среднелистовые	65—150	500—1500	1000—2000	0,25—3,5
Толстолистовые	100—300	750—1500	1000—2500	0,6—9
Универсальные	75—200	250—1500	2000—4500	0,3—10
Полунепрерывные и непрерывные	65—300	750—2000	1000—9000	0,4—30

Обычно ширину слитка $B_{\text{ср}}$ берут больше ширины сляба на 100—200 мм:

$$B_{\text{ср}} = b + (100 \div 200) \text{ мм.} \quad (15-1)$$

Толщину слитка принимают в следующих пределах в зависимости от его ширины:

$$H_{\text{ср}} = (0,4 \div 0,6) B_{\text{ср}} \text{ мм.} \quad (16-1)$$

Площадь среднего сечения слитка

$$S_{\text{ср}} = \frac{V}{L} \text{ м}^2. \quad (17-1)$$

С помощью уравнений (15-1) и (16-1) окончательно определяют размеры плоского слитка $B_{\text{ср}}$ и $H_{\text{ср}}$. Эти размеры должны удовлетворять равенству:

$$S_{\text{ср}} = B_{\text{ср}} H_{\text{ср}}.$$

Задаваясь конусностью слитка i , находят размеры его верхнего и нижнего сечений. Методика определения размеров слитка плоского сечения рассмотрена в задаче № 11*.

При решении задач используют длины, приведенные в табл. 5—7.

Задача № 3. По заданным размерам и конфигурации конечного изделия определить массу и размеры заготовки для существующих производственных условий.

В табл. 8 и 9 приведены размеры и значения массы заготовок, прокатываемых на сортовых станах различного типа, а также примерный сортамент этих станом.

* См. с. 25.

Таблица 7

**Сортамент слябов, прокатываемых обжимными станами
и отливаемых на установках непрерывной разливки [5, с. 283]**

Стан	Размеры слябов, мм			Масса, т
	толщина	ширина	длина	
Слябинг 1100—1250	65—300	600—2000	1000—9000	0,3—30
Блюминг 1100 и 1150 с высотой подъема верхнего вала 1200 мм:				
при врезной бочке	100—300	2500—1100	1000—6000	0,3—16
при гладкой бочке	75—300	250—1000	1000—6000	0,25—14
Блюминг 1150 с высотой подъема верхнего вала 1750 мм (врезная бочка)	100—300	250—1600	1000—6000	0,35—20
Установка непрерывной разливки стали	120—200	400—2350	1000—6000	0,4—10

Таблица 8

Сортамент заготовок, прокатываемых на прокатных станах [2]

Профиль и его размеры, мм	Размеры заготовки, мм	Масса заготовки, мм	Суммарный коэффициент вытяжки
---------------------------	-----------------------	---------------------	-------------------------------

Непрерывный мелкосортный стан 250

Сталь круглая диаметром:			
8	60×60×12 000	335	72,0
15	80×80×12 000	595	36,0
30	80×80×12 000	595	9,5
Сталь угловая:			
20×20×3	60×60×12 000	335	32,0
40×40×4	80×80×12 000	595	20,0
Сталь полосовая:			
20×4	60×60×12 000	335	45,0
40×4	80×80×12 000	595	40,0
70×6	80×80×12 000	595	15,2

Непрерывный мелкосортный стан 300

Сталь круглая диаметром:			
10	75×75×9000	396	71,2
30	100×100×9000	700	14,1
Сталь угловая:			
20×20×3	75×75×4500	198	49,8
50×50×6	100×100×9000	700	17,6
Сталь полосовая:			
25×4	75×75×9000	396	56,3
100×13	100×100×9000	700	7,7

Профиль и его размеры, мм	Размеры заготовки, мм	Масса заготовки, мм	Суммарный коэффициент вытяжки
<i>Непрерывный штриповый стан 300</i>			
Штрипс:			
73,5×2,75	100×100×12 000	940	49,5
211,5×3,5	100×200×12 000	1880	27,0
318×3,75	100×300×12 000	2830	25,2
391×4,0	100×400×12 000	3770	25,6
Лента:			
70×2,5	100×100×12 000	940	57,0
200×3,0	100×200×12 000	1880	33,3
<i>Непрерывный среднесортный стан 400</i>			
Сталь круглая диа- метром:			
25	100×100×4000	310	20,4
70	150×150×5000	860	5,8
Сталь угловая:			
45×45×4	100×100×2500	193	28,7
100×100×10	150×150×5000	860	11,7
Сталь полосовая:			
70×7	100×100×4000	310	20,4
150×20	150×150×5000	860	7,5
Балки тонкостенные:			
№ 20	130×150×5000	750	14,8
№ 30	185×225×5000	1630	17,9
<i>Полунепрерывный среднесортный стан 350</i>			
Сталь круглая диа- метром:			
20	100×100×2900	223	31,8
40	120×120×6000	665	11,5
70	170×170×6000	1380	7,5
Сталь угловая:			
45×45×4	100×100×3000	230	32,5
90×90×10	150×150×6000	1040	13,1
Сталь полосовая:			
75×5	100×100×3000	230	26,7
<i>Крупносортный стан 350 (крос-коунтри)</i>			
Сталь круглая диа- метром:			
60	170×150×4950	940	9,0
100	170×150×4950	940	3,2
Сталь полосовая:			
140×10	120×120×4950	550	10,3
160×10	150×150×3700	640	14,1
180×10	150×150×4100	710	12,5
200×10	170×150×4000	760	12,8
Сталь полосовая:			
180×10	150×150×4100	710	12,5
200×10	170×150×4000	760	12,8

Профиль и его размеры, мм	Размеры заготовки, мм	Масса заготовки мм	Суммарный коэффициент вытяжки
Сталь угловая:			
74×75×8	120×120×4100	455	12,6
100×100×8	150×150×3700	640	14,6
150×150×12	180×150×4950	1100	7,8
Швеллеры:			
№ 12	120×120×4950	550	8,3
№ 16	150×150×4950	860	9,0
№ 18	170×150×4950	940	8,7

Таблица 9

Примерный сортамент проката сортовых станов

Стан	Круглая сталь диаметром, мм	Квадратная сталь, сторона квадрата, мм	Полосовая сталь шириной до, мм	Угловая сталь равнобокая размерами до, мм	Балки двутавровые высотой, мм	Швеллеры высотой, мм	Тяговая сталь высотой до, мм	Масса 1 м узкоколейных рельсов до, кг
250	8—30	8—30	65	40×40	—	—	30	—
300	16—60	16—50	100	60×60	—	50—65	60	—
350	25—75	25—75	150	90×90	80—100	50—100	100	8
400	30—100	30—90	200	100×100	80—120	65—120	120	11
550	50—120	50—120	300	150×150	100—200	100—200	150	24
650	70—200	70—200	350	200×200	160×300	160×300	220	24

В табл. 10 даны размеры заготовки в зависимости от размеров профиля и марки стали.

Однако данные, приведенные в табл. 8—10, не могут служить эталоном, но они необходимы для сравнения результатов, полученных расчетным путем. В случае значительных расхождений расчетных и опытных данных делают перерасчет.

Размеры сечений заготовок в отдельных случаях должны быть минимальными, чтобы сократить число проходов, а следовательно, и число клетей, что дает экономию капитальных и эксплуатационных затрат и облегчает организацию производства.

Кроме того, применение таких заготовок обеспечивает более высокую температуру конца прокатки, меньший расход энергии, а также более точные размеры и хорошую поверхность готового продукта. Выбор сечения заготовки обосновывается не только техническими, но и, главным образом, экономическими соображениями.

Форма и размеры заготовок должны соответствовать требованиям действующих технических условий и стандартов.

Размеры заготовки в зависимости от размеров профиля
и марки стали

Сталь	Профиль	Размеры чистового профиля (диаметр или сторона), мм	Размеры сечения заготовки, мм	Масса, кг
Высоко- хромистая	Круг	5—12	50×50	35×50
Быстро- режущая	Круг	16—27	85×85	50×70
Нержавею- щая	Круг	28—35	85×85	65×75
	»	35—45	85×85	До 85
	Полоса	6×45÷20×120	65×65÷110×110	50—130
	Круг	46—70	125×125÷150×150	150×280
	»	75—90	145×145÷170×170	350—500
	»	95—150	170×170÷200×200	350—800
	Квадрат	85×85÷140×140	210×210	До 100

При расчете массы и размера заготовок, если не используются летучие ножницы, следует учитывать расстояние от оси валков рабочих клетей до оси режущих устройств l' , чтобы при прокатке заготовки длина раската не превышала это расстояние.

Необходимо отметить, что сортовую сталь, как правило, поставляют в прутках, а проволоку (катанку) — в мотках (бунтах).

В последнее время, по соглашению сторон, круглую сталь диаметром 3—22 мм и квадратную сталь со стороной квадрата до 14 мм поставляют также в мотках.

Обычно на сортовых станах применяют заготовку и квадратного сечения, а в отдельных случаях, как например на полосовых (штрипсовых) станах, — заготовки прямоугольного сечения.

В методике расчета массы заготовок есть много общего с методикой расчета массы слитка, но имеются и некоторые отличия, которые будут изложены ниже.

Последовательность определения размеров заготовки для заданного конечного профиля следующая:

1. Если задан профиль и размер готовой продукции, то, зная массу 1 м изделия q_1 , длину одной годной штанги или одного годного прутка l_1 , задаваясь числом изделий, получаемых из заготовки (n) и коэффициентом расхода металла на 1 т годного (k) (см. табл. 1), можно определить массу заготовки по формуле (3-1).

2. Определяют длину заготовки по формуле Н. Ю. Тайца [6]:

$$l'' = \frac{B - (0,25 \div 0,3) (n + 1)}{n} \text{ м}, \quad (18-1)$$

где B — ширина рабочего пространства печи (для современных методических печей $B = 12 \div 13$ м);
 l'' — длина заготовки;
 n — число рядов заготовок в печи.

3. Зная массу и длину заготовки, а также плотность стали, можно определить площадь профиля заготовки по формуле

$$F = \frac{M}{\rho l''}. \quad (19-I)$$

4. Если заготовка квадратного сечения, сторону квадрата можно определить по формуле

$$a = \sqrt{\frac{M}{\rho l''}}. \quad (20-I)$$

При круглом сечении заготовки диаметр ее определяют по формуле

$$d = 1,13 \sqrt{\frac{M}{\rho l''}}. \quad (21-I)$$

Если известны число проходов n , средний коэффициент вытяжки $\mu_{\text{ср}}$ и площадь сечения годных изделий F_n , размеры заготовки квадратного сечения можно определить по известной формуле

$$a = \sqrt{F_0}, \quad (22-I)$$

где $F_0 = \mu_{\text{ср}}^n \cdot F_n$ — площадь исходной заготовки.

При решении подобных задач рекомендуется пользоваться данными, приведенными в табл. 8—10.

Задача № 4. Определить размеры исходной заготовки для прокатки полосы толщиной h и шириной b , м.

Аналитическое решение данной задачи затруднительно, так как оно связано с определением уширения металла при прокатке заготовки до конечного размера полосы. Уширение можно рассчитать различными методами. Расчетное значение уширения всегда корректируют на практике. Поэтому аналитический метод определения размеров заготовки для прокатки полосовой стали следует считать первым приближением решения. Есть общеизвестная формула для определения высоты исходной полосы:

$$H = \frac{b + kh}{1 + k}, \quad (23-I)$$

где $k = 0,3 \div 0,8$ — коэффициент уширения, зависящий в основном от природы стали или сплава (по данным Жеза $k = 0,35 \div 0,48$).

Н. В. Литовченко и др. [7] справедливо отметили, что формула (23-I) имеет большие недостатки: во-первых, она не учитывает

ребровые проходы, где могут быть значительные обжатия, во-вторых, затруднительно принимать конкретные значения коэффициента k , зависящего от частных обжатий и числа проходов, включая ребровые, а главное, зависящего от природы стали и сплавов. В работе [7] предлагается формула для определения высоты заготовки:

$$H = \frac{b + h \left(k - 0,25 \frac{n_1}{n} \right)}{1 + k - 0,25 \frac{n_1}{n}}, \quad (24-1)$$

где $k = \frac{\Delta b}{\Delta h}$;

n — общее число проходов до конечного размера полосы;
 n_1 — число проходов с обжатием полосы по ширине (в ребровых калибрах).

После несложных преобразований, пользуясь данными Зибеля и Б. П. Бахтинова, Н. В. Литовченко предложил формулы для определения коэффициента (k):

по формуле Зибеля:

$$k = \frac{0,05D_k}{h + 0,04nD_k}, \quad (25-1)$$

где D_k — средний катающий диаметр валка;
 по формулам Б. П. Бахтинова:
 для стальных валков

$$k_{ст} = \frac{0,06D_k}{h + 0,04nD_k}, \quad (26-1)$$

для чугунных валков

$$k_{чуг} = \frac{0,0525D_k}{h + 0,04nD_k}. \quad (27-1)$$

Согласно практическим данным, при наличии ребровых проходов получается лишь небольшая разница ширин готового профиля и заготовки, т. е. обычно

$$b = (1,015 \div 1,01) B_0. \quad (28-1)$$

Если известны ширина заготовки B_0 и размеры полосы b и h , для определения высоты заготовки H рекомендуется пользоваться следующим уравнением:

$$H = \frac{(b - B_0) + h \left(k - 0,25 \frac{n_1}{n} \right)}{k - 0,25 \frac{n_1}{n}}. \quad (29-1)$$

Задача № 5. Определить размеры исходной заготовки для прокатки листа при заданных его размерах и условиях производства.

Исходной заготовкой для прокатки листа может быть сляб или сутунка. Слябом называется прямоугольной формы заготовка катаная, коваяя или отлитая на установке непрерывной разливки при $b_0/h_0 \geq 3$ (см. табл. 6). Максимальное значение этого отношения может достигать 15—20. Наиболее часто применяют слябы с отношением ширины к толщине 4—8.

Сутункой называется плоская заготовка массой 6,1—20,6 кг при ширине 165—250 мм и длине 735 мм. Сутунка предназначена для прокатки тонких листов толщиной 0,35—8 мм. Массу и размеры сутунки определяют в зависимости от размеров листа и схемы прокатки. Листы из сутунки прокатывают на старых листовых малопроизводительных станах дуо.

Определение массы сляба или сутунки состоит в расчете массы годного листа и увеличении массы последнего пропорционально расходному коэффициенту металла (см. табл. 2).

Решение. 1. Масса сляба или сутунки равна

$$M = mk, \quad (30-I)$$

где m — масса годного листа;

k — расходный коэффициент.

Размеры и масса слябов зависят от параметров агрегатов и оборудования листового стана [5].

2. Длина сляба (L_{\max} и L_{\min}) зависит:

1) от расстояния между глиссажными трубами печи (a):

$$L_{\min} \geq a + (300 \div 400) \text{ мм};$$

2) от ширины рабочего пространства печи (B_p):

$$L_{\max} \leq \frac{B_p - (600 \div 800)}{2} \text{ мм}$$

или

$$L_{\max} \leq B_p - (500 \div 700) \text{ мм}$$

для «сдвоенных» слябов;

3) от длины бочки валков (L_6):

$$L_{\max} \leq L_6 - (300 \div 500) \text{ мм};$$

4) от ширины поворотного рабочего рольганга (B_p) номинальной ширины листа (B_n) и увеличения длины сляба в первых проходах l (рис. 1):

$$L_{\max} \leq \sqrt{[B_p - (100 \div 200)]^2 - [B_n + (100 \div 200)]^2} - l \text{ мм}.$$

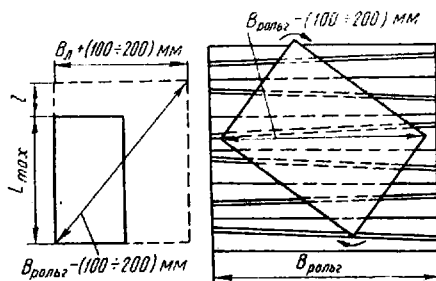


Рис. 1. Определение максимальной длины сляба по ширине поворотного рольганга и ширине листа

3. Минимальная ширина сляба B_{\min} зависит от шага S между роликками подводящего и рабочего рольгангов: $B_{\min} \geq S + (50 \div 100)$ мм, а максимальная — от ширины рольгангов (B_p):

$$B_{\max} \leq B_p - (50 \div 100) \text{ мм.}$$

В зависимости от номинальной ширины листа B_l принимают для листовых станов

$$B_{\max} \leq B_l + (100 \div 150) \text{ мм,}$$

для универсальных станов

$$B_{\max} \leq B_l + (20 \div 50) \text{ мм.}$$

4. Толщина сляба h_{\max} зависит:

1) от рабочей высоты подъема верхнего валька черновой клети h_b или окалиноломателя: $h_{\max} < h_b$;

2) от минимальной высоты свода нагревательной печи над уровнем глиссажных труб (пережим) или высоты окна выдачи: $h_{\max} < h_{o, в}$;

3) от длины нагревательной печи и системы прокатного стана при длине нагревательной печи более 20 м в случае прокатки слябов на блюминге: $h_{\min} \geq 100$ мм.

Принцип определения массы и размеров заготовки для прокатки фасонных профилей (угловая сталь, швеллер, балка зетовая, рельс и др.) аналогичен методике определения массы заготовки для простых профилей (3-1).

Основные размеры заготовки для фасонных профилей находят после определения формы и размеров последнего черного фасонного калибра. При этом используют метод расчета калибровки против хода прокатки. Такой способ расчета калибровки фасонных профилей создает трудности при предварительном определении размеров исходной заготовки аналитическим методом [7].

2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача № 6 [73]. Определить размеры тела стального слитка квадратного сечения из стали 12ХН3А, если масса его равна 5200 кг, масса прибыльной части составляет от массы слитка 16%. Плотность литой структуры стали $\rho = 7300$ кг/м³, а конусность слитка $i = 3\%$.

Решение. При отношении массы прибыльной части слитка к массе слитка 0,16 масса тела слитка равна:

$$5200 - 5200 \cdot 0,16 = 4368 \text{ кг.}$$

По уравнению (4-1) объем слитка

$$V = 4368 : 7300 = 0,598 \text{ м}^3.$$

Пользуясь отношением (5-1) и уравнением (7-1), определяем сторону среднего сечения слитка:

$$a_{\text{ср}} = \sqrt[3]{\frac{V}{3}} = \sqrt[3]{\frac{0,598}{3}} = 0,584 \text{ м.}$$

Высоту слитка можно определить из отношения (5-1)

$$H = 3 \cdot 0,584 = 1,752 \text{ м} \approx 1,75 \text{ м} = 1750 \text{ мм.}$$

Из условия задачи, согласно уравнению (9-1), конусность слитка

$$i = 0,03 \cdot 1750 = 52,5 \text{ мм.}$$

Из уравнения (10-1) имеем:

сторона верхнего сечения слитка

$$B = a_{\text{ср}} + i = 584 + 53 = 637 \text{ мм} \approx 640 \text{ мм,}$$

сторона нижнего сечения

$$C = a_{\text{ср}} - i = 584 - 53 = 531 \text{ мм} \approx 530 \text{ мм.}$$

Тогда размеры слитка без прибыли можно записать в следующем виде:

$$\frac{640 \times 640}{530 \times 530} \times 1750 \text{ мм.}$$

Задача № 7. Определить массу слитка для прокатки железно-додорожных рельсов Р50, приняв длину готовых рельсов равной 12,5 м. Потери металла на рельсо-балочном стане составляют 5% от заданного (см. табл. 1). Из одного бьюма получают четыре рельса.

Решение. При заданных условиях и $k = 1,053$ масса бьюма равна:

$$m = 12,5 \cdot 50 \cdot 4 \cdot 1,053 = 2633 \text{ кг.}$$

Если принять, что прокатанную из слитка полосу разрезают на два бьюма, а потери металла на бьюминге составляют 20% от массы слитка, то масса слитка равна:

$$M = 2633 \cdot 2 \cdot 1,250 = 6583 \text{ кг} \approx 6600 \text{ кг,}$$

где $k = 1,250$ — расходный коэффициент металла.

Задача № 8. Заготовку сечением 100×100 мм прокатывают на непрерывном заготовочном стане, состоящем из двух групп. Расстояние между последней клетью первой группы и первой клетью второй группы составляет 80 м.

Определить максимально допустимую массу слитка, прокатываемого на бьюминге. Потери металла на бьюминге составляют 8% (см. табл. 1). Сталь кипящая.

Решение. Чтобы заготовку сечением 100×100 мм выдать на сторону, не пропуская ее через вторую группу, принимаем длину раската равной 75 м.

Масса раската в сечении размерами 100×100 мм равна:

$$m = 75 \cdot 78 = 5850 \text{ кг},$$

где масса 1 м полосы сечением 100×100 мм равна 78 кг.

Масса слитка

$$M = 5850 \cdot 1,087 = 6359 \text{ кг} \approx 6360 \text{ кг}.$$

Задача № 9. Определить размеры слитка круглого сечения из нержавеющей стали 1X18Н10Т массой 500 кг.

Решение. Задаемся исходными данными (5-1)

$$m' = \frac{H}{d_{\text{ср}}} = 3,0; \quad \rho = 7500 \text{ кг/м}^3; \quad i = 3\%.$$

Принимаем отношение массы прибыли к массе слитка: $\frac{m}{M} = 16\%$. Тогда масса тела слитка без прибыли

$$M' = 500 (1 - 0,16) = 420 \text{ кг}.$$

Объем тела слитка

$$V = 420 : 7500 = 0,056 \text{ м}^3.$$

Диаметр среднего сечения слитка определяют по формуле (11-1):

$$d_{\text{ср}} = \sqrt[3]{\frac{0,056}{0,785 \cdot 3}} = 0,29 \text{ м} = 290 \text{ мм}.$$

Высота тела слитка

$$H = 290 \cdot 3 = 870 \text{ мм}.$$

Конусность

$$i = 0,03 \cdot 870 = 26,1 \approx 0,025 \text{ м}.$$

Диаметр верхнего сечения слитка

$$B = 290 + 25 = 315 \text{ мм}.$$

Диаметр нижнего сечения

$$C = 290 - 25 = 265 \text{ мм}.$$

Таким образом, размеры тела слитка следующие: $\frac{\text{Диаметр } 315}{\text{Диаметр } 265} \times 870 \text{ мм}.$

Задача № 10. Слиток круглого сечения из стали 1X18Н10Т массой 500 кг до обдирки имеет размеры (см. рисунок к табл. 3):

$$\frac{\text{Диаметр } 320}{\text{Диаметр } 265} \times 870 \text{ мм}.$$

Для удаления поверхностных дефектов слиток (не считая его прибыльной части) подвергают обдирке на токарном станке. Потери металла в стружку при этом составляют 10% (см. табл. 4). Необходимо определить размеры слитка после обдирки.

Решение. Масса неободранного слитка без прибыли равна 420 кг (см. задачу № 9).

Получено стружки при обдирке

$$m_1 = 420 \cdot 0,10 = 42 \text{ кг.}$$

Масса тела слитка после обдирки

$$M' = M - m_1 = 420 - 42 = 378 \text{ кг.}$$

Объем ободранного слитка

$$V = \frac{378}{7500} = 0,0504 \text{ м}^3.$$

Диаметр среднего сечения ободранного слитка

$$d_{\text{ср}} = \sqrt[3]{\frac{0,0504}{0,785 \cdot 3}} = 0,277 \text{ м} = 277 \text{ мм.}$$

При конусности $i = 25$ мм диаметр верхнего сечения слитка равен

$$B_{\text{ободр}} = 277 + 25 = 302 \text{ мм.}$$

Диаметр нижнего сечения

$$C_{\text{ободр}} = 277 - 25 = 252 \text{ мм.}$$

Таким образом, слиток ободран на глубину:

$$\frac{B_{\text{н. о}} - B_{\text{ободр}}}{2} = \frac{320 - 302}{2} = 9 \text{ мм;}$$

$$\frac{C_{\text{н. о}} - C_{\text{ободр}}}{2} = \frac{265 - 252}{2} = 6,5 \text{ мм.}$$

Размеры слитка после обдирки, мм:

Диаметр верхний	302
Диаметр нижний	252
Высота	870

Задача № 11. Определить массу и размеры плоского слитка для прокатки сляба размером $200 \times 1500 \times 9000$ мм из кипящей стали.

Из слитка получается один сляб.

Решение. При плотности деформированной кипящей стали $7,8 \text{ кг/дм}^3$ масса сляба при заданных размерах $m = 21\,060 \text{ кг}$. Расход слитка на 1 т слябов составляет 1,18 (см. табл. 1).

Тогда масса слитков окажется равной $24\,850 \text{ кг}$.

При плотности слитка кипящей стали $6,5 \text{ кг/дм}^3$ объем слитка $V = 3823 \text{ дм}^3$.

При высоте или длине слитка $L = 2500 \text{ мм}$ площадь среднего сечения слитка

$$P_{\text{ср}} = 152,9 \text{ дм}^2.$$

Ширину слитка в среднем сечении, согласно уравнению (15-1), принимаем равной: $b_{\text{ср}} = 1700 \text{ мм}$.

Толщина слитка

$$152,9 : 17 = 9 \text{ дм} = 900 \text{ мм}.$$

Конусность $i = 0,01 \cdot 2500 = 25 \text{ мм}$.

Окончательные размеры слитка получатся:

$$\frac{1725 \times 925}{1675 \times 875} \times 2500 \text{ мм}.$$

Задача № 12. Определить размеры и массу слитка из стали 1Х18Н10Т, предназначенного для прокатки слябов размерами $200 \times 1000 \times 5000 \text{ мм}$. Из слитка получили два сляба.

Решение. Коэффициент расхода металла равен 1,3 (см. табл. 1). Отношение массы прибыльной части к массе слитка составляет 0,16. Плотность деформированной стали $\rho = 7900 \text{ кг/м}^3$, а литой структуры $\rho = 7500 \text{ кг/м}^3$. Тогда масса слитка должна быть следующей:

$$M_1 = [7900 \times (0,2 \cdot 1 \cdot 5)] \cdot 2 \cdot 1,3 = 20\,540 \text{ кг}.$$

Масса слитка без прибыльной части

$$M_2 = M_1 (1 - 0,16) = 20\,540 \cdot 0,84 = 17\,250 \text{ кг}.$$

Объем слитка без прибыли

$$V = 17\,250 : 7500 = 2,3 \text{ м}^3.$$

Длину (высоту) тела слитка принимаем $L = 2,5 \text{ м}$ (2500 мм). По опытным данным,

$$H_{\text{ср}} = \frac{2500}{4} = 625 \text{ мм}.$$

Площадь среднего сечения слитка

$$S_{\text{ср}} = \frac{2,3}{2,5} = 0,92 \text{ м}^2.$$

Ширина среднего сечения

$$B_{\text{ср}} = \frac{S_{\text{ср}}}{H_{\text{ср}}} = \frac{0,92}{0,625} \approx 1,47 \text{ м} = 1470 \text{ мм}.$$

Для облегчения извлечения слитка из изложницы последняя имеет небольшую конусность в пределах 0,7—1,5% [4], или

$$i = 2500 \cdot 0,01 = 25 \text{ мм}.$$

Тогда размеры верхнего сечения:

$$B_n = 1470 + 25 = 1495 \text{ мм};$$

$$H_n = 625 + 25 = 650 \text{ мм}.$$

Размеры нижнего сечения:

$$B_n = 1470 - 25 = 1445 \text{ мм};$$

$$H_n = 625 - 25 = 600 \text{ мм}.$$

Окончательные размеры слитка:

$$\frac{650 \times 1495}{600 \times 1445} \times 2500 \text{ мм}.$$

Задача № 13. Определить размеры исходной заготовки квадратного сечения для прокатки полосы толщиной 3 мм и шириной 200 мм на непрерывном стане, имеющем десять клетей с горизонтальными валками и четыре — с вертикальными валками. Средний катающий диаметр валька 350 мм, число ходов $n = 10$ и $n_1 = 4$ [см. формулу (24-1)].

Находим по уравнениям (25-1), (26-1) и (27-1) значение k .

По формуле Зибеля

$$k = \frac{0,05 \cdot 350}{3 + 0,04 \cdot 10 \cdot 350} = 0,1224.$$

По формуле Б. П. Бахтинова:

$$k_{ст} = \frac{0,06 \cdot 350}{3 + 0,04 \cdot 10 \cdot 350} = 0,147;$$

$$k_{чуг} = \frac{0,0525 \cdot 350}{3 + 0,04 \cdot 10 \cdot 350} = 0,1285.$$

При полученных значениях k сторону заготовки квадратного сечения определим по формуле (24-1).

По формуле Зибеля

$$H_{ст} = \frac{200 + 3 \left(0,1224 - 0,25 \cdot \frac{4}{10} \right)}{1 + 0,1224 - 0,25 \cdot \frac{4}{10}} \approx 195 \text{ мм}.$$

По формуле Бахтинова при прокатке на стальных и чугунных валках:

$$H_{ст} = \frac{200 + 3 \left(0,147 - 0,25 \cdot \frac{4}{10} \right)}{1 + 0,147 - 0,25 \cdot \frac{4}{10}} \approx 192 \text{ мм};$$

$$H_{чуг} = \frac{200 + 3 \left(0,1285 - 0,25 \cdot \frac{4}{10} \right)}{1 + 0,1285 - 0,25 \cdot \frac{4}{10}} \approx 194,5 \text{ мм}.$$

Задача № 14 [7]. Определить высоту заготовки для прокатки полосы толщиной 5 мм и шириной 125 мм при следующих данных: ширина заготовки 120 мм, число проходов с обжатием по высоте заготовки $n = 10$ и число проходов в ребровых калибрах $n_1 = 2$.

При $k = 0,1224$ (см. задачу № 13) по формуле (29-1) имеем:

$$H = \frac{(125 - 120) + 5 \left(0,1224 - 0,25 \cdot \frac{2}{10} \right)}{0,1224 - 0,25 \cdot \frac{2}{10}} \approx 74 \text{ мм.}$$

Задача № 15. Методом А. П. Виноградова [8] определить сторону исходного квадрата для прокатки полосы сечением 200×3 мм.

Размеры полосы в горячем состоянии:

$$200 \times 1,013 = 202,6 \text{ мм и } 3 \times 1,013 \approx 3,04 \text{ мм.}$$

По уравнению (23-1) сторона исходного квадрата равна:

$$A = \frac{b + Kh}{1 + k} = \frac{202,6 + 0,20 \cdot 3,04}{1 + 0,20} = \frac{203,21}{1,20} = 170 \text{ мм.}$$

На основании опытных данных, А. П. Чекмарев рекомендует значения коэффициента уширения k в зависимости от формы сечения полосы (табл. 11).

Таблица 11

Значения коэффициента уширения

Профиль	Значения k	
	при прокатке в калибрах	при прокатке на гладкой бочке
Для тонких и узких полос	0,28—0,35	0,60—0,75
Для толстых и широких полос	0,15—0,20	0,30—0,45
Для средних по толщине и ширине полос	0,20—0,25	0,45—0,60

Задача № 16. Определить сторону исходного квадрата для прокатки полосы шириной $b = 90$ мм и толщиной $h = 8$ мм. Такую полосу следует прокатывать в закрытых калибрах.

Размеры полосы в горячем состоянии:

$$b_{\text{гор}} = 90 \cdot 1,015 = 91,4 \text{ мм;}$$

$$h_{\text{гор}} = 8 \cdot 1,015 = 8,12 \text{ мм.}$$

Полоса принадлежит к типу средних по толщине и ширине, поэтому по данным табл. 11 величину $k = \frac{\Delta b}{\Delta h}$ можем принять равной 0,23. Тогда, согласно формуле (23-1),

$$A = \frac{91,4 + 0,23 \cdot 8,12}{1 + 0,23} = \frac{93,27}{1,23} = 75,8 \text{ мм.}$$

Можно принять исходную заготовку квадратного сечения размерами 75×75 мм.

Задача № 17. Определить размеры сляба для прокатки стального листа $10 \times 1500 \times 6000$ мм, приняв коэффициент расхода слябов на 1 т $k = 1,20$ (см. табл. 1).

Масса годного листа

$$m = 0,01 \cdot 1,5 \cdot 6 \cdot 7800 = 702 \text{ кг.}$$

Массу сляба определяют по формуле (30-1):

$$M = 702 \cdot 1,20 = 842,4 \text{ кг.}$$

Лист толщиной 10 мм относится к группе толстолистовых. Задаемся толщиной сляба $H_0 = 200$ мм (см. табл. 6).

Ширину сляба определяют из отношения $B_0/H_0 = 3$, или $B_0 = 3 \cdot 200 = 600$ мм.

Тогда длина сляба по расчетным данным:

$$L_c = \frac{842,4}{7800 \cdot 0,2 \cdot 0,6} \approx 0,9 \text{ м.}$$

Задача № 18. Определить размеры сляба для прокатки листа $14 \times 1500 \times 6000$ мм из спокойной углеродистой стали, приняв коэффициент расхода слябов на 1 т годного равным 1,23.

Масса годного листа

$$m = 0,014 \cdot 1,5 \cdot 6 \cdot 7800 = 983 \text{ кг.}$$

Масса сляба

$$M = 983 \times 1,23 = 1210 \text{ кг.}$$

Для производственных целей массу сляба можно принять равной 1200 кг.

Задаемся толщиной сляба $H_c = 195$ мм (см. табл. 6).

Отношение ширины сляба к ее толщине принимаем равным $B_c/H_c = 4$ или $B_c = 4 \cdot 195 = 780$ мм.

Тогда длина сляба равна:

$$L_c = \frac{1,2}{7800 \cdot 0,195 \cdot 0,78} \approx 1 \text{ м.}$$

Масса сляба по расчетным данным

$$M = 0,195 \cdot 0,78 \cdot 1 \cdot 7800 = 1186,4 \text{ кг.}$$

Расчетный коэффициент расхода слябов на 1 т годного:

$$k = \frac{1186,4}{983} = 1,21.$$

Коэффициент k по данным табл. 1 изменяется в пределах 1,20—1,25. Следовательно, сляб размерами $195 \times 780 \times 1000$ мм допустим для производства.

Во всех случаях выбранную высоту (толщину H) заготовки необходимо проверить, исходя из условия захвата металла валками, по формуле

$$H = 2D_k \sin^2 \frac{\alpha}{2} + h, \quad (31-1)$$

где α — допустимый угол захвата ($\alpha_{\max} = 30^\circ$).

При определении стороны среднего сечения слитка a или толщины сечения H рекомендуется проверить этот размер на прорабатываемость по высоте металла при его деформации.

По данным Н. В. Литовченко [9] удовлетворительная прорабатываемость слитка при прокатке на блюминге достигается при соблюдении условия

$$H \leq 0,56 D_k, \quad (32-1)$$

где H — максимально допустимая толщина слитка.

По данным П. А. Александрова [10] прорабатываемость металла по его высоте достигается в том случае, когда

$$\Delta h \geq \frac{H^2}{2D_k}, \quad (33-1)$$

где Δh — линейное обжатие за проход.

Учитывая малое сопротивление деформации литой структуры слитка, обжатия для первых проходов необходимо выбирать по возможности меньшими, чем это требуется по условиям полной прорабатываемости полосы и захвата металла валками¹.

По формуле (31-1) производят проверку высоты заготовки для случая, когда прокатка осуществляется в калиброванных валках с постоянным зазором между их буртами.

Глава II

НАГРЕВ СТАЛИ И СПЛАВОВ

1. ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА

В общей цепи технологического процесса горячей обработки металла давлением нагрев металла считается одним из существенных звеньев. Правильный режим нагрева слитков или заготовок обеспечивает высокие технико-экономические показатели работы прокатного стана, а именно уменьшается расход металла, топлива, энергии на единицу годных изделий, повышается производительность труда и качество прокатных изделий, что в конечном итоге отражается на основном показателе работы прокатных цехов — себестоимости товарной продукции.

¹ См. гл. V.

Критерии оптимальности нагрева стали и сплавов, включающие оптимизацию совместных технико-экономических показателей нагревательных печей и прокатного стана, рассмотрены С. А. Малам с применением математического аппарата вариационного исчисления и принципа максимума [11].

Теория нагрева стали и сплавов и причины образования всех видов брака, возникающие при неправильном режиме нагрева металла, подробно рассмотрены в работах [12, 14—16, 19—21].

Ниже приведены задачи и методика их решений в пределах требований производственной практики. К ним относятся определение таких технологических параметров, как температура нагрева стали, продолжительность, или время нагрева стали и напряжения в металле при нагреве.

Температура нагрева стали

Температурный режим нагрева стали и сплавов перед горячей обработкой давлением (прокатка, ковка) зависит главным образом от свойств металла в литом (слиток) и деформированном (заготовка) состояниях.

При установлении температурного режима для заданного металла необходимо учитывать следующие данные: 1) химический состав и способ выплавки стали или сплава; 2) механические свойства металла при высоких температурах; 3) конструкцию нагревательной печи; 4) форму, размер и расположение нагреваемого тела в печи.

В производственных условиях задачи по определению температуры нагрева металла могут встречаться в различных вариантах, которые подробно рассмотрены в работах по технологии нагрева стали, перечисленных выше. Наиболее интересные задачи по нагреву металла, имеющие большое практическое значение, можно сформулировать в двух вариантах: а) для данного металла требуется определить максимально допустимую конечную температуру нагрева; б) при заданных температуре печи и времени пребывания металла в ней определить температуры поверхности и середины нагреваемого тела.

В табл. 12 представлены обозначения величин, используемых в дальнейших расчетах.

Теоретическое определение температуры нагрева металла перед прокаткой слитков или заготовки основывается на диаграммах состояния сплавов.

Для определения температуры нагрева металла углеродистых сталей пользуются классической диаграммой Geugensa — диаграммой состояния сплава Fe—C (рис. 2). Имеются подобного рода диаграммы и для других сплавов [52—55].

Теоретическая температура нагрева сплава должна быть близкой к температуре линии солидуса, так как пластические свойства металла в пределах температурного интервала горячей обра-

Обозначения, принятые в гл. II [6]

Наименование величины	Условное обозначение	Единицы измерения в системе СИ	Связь с единицами других систем
Коэффициент теплопроводности	λ	вт/(м·град)	860 кал/(м·ч·град)
Удельная массовая теплоемкость	c_p	дж/кг·град)	0,24 кал/(кг·град)
Коэффициент теплопроводности	$a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$	м ² /ч	—
Коэффициент теплопередачи и теплоотдачи	α	вт/(м ² ·град)	860 кал/(м ² ·ч·град)
Поверхностная плотность теплового потока	q	вт/м ²	860 кал/м ² ·ч
Время (продолжительность) нагрева	τ	ч	
Время при ступенчатом нагреве по отдельности для каждой ступени	$\left. \begin{matrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{matrix} \right\}$	ч	
Температура газа	$t_{\text{газ}}$	°С	
Температура печи	$t_{\text{печ}}$	°С	
Температура поверхности тела	$t_{\text{п. т}}$	°С	
Температура середины тела	$t_{\text{с. т}}$	°С	
Начальная температура тела	$t_{\text{о. т}}$	°С	
Конечная температура тела	$t_{\text{к. т}}$	°С	
Начальная температура газа	$t_{\text{о. г}}$	°С	
Начальная температура печи	$t_{\text{о. печ}}$	°С	
Разность температур поверхности и середины тела	$\Delta t = t_{\text{п}} - t_{\text{с}}$	°С	
Начальная разность температур поверхности и середины тела	$\Delta t^0 = t_{\text{п}}^0 - t_{\text{с}}^0$	°С	
Наибольшая разность температур по сечению	$\Delta t_{\text{т}}$	°С	
Абсолютная температура	T	°К	$T = t + 273,16^\circ \text{С}$
Расчетная толщина тела	S	м	
Радиус сечения цилиндра равновеликого по площади сечения с нагреваемым телом прямоугольного или квадратного сечения	R	м	
Расчетная высота цилиндра	H	м	

Наименование величины	Условное обозначение	Единицы измерения в системе СИ	Связь с единицами других систем
Изменение теплосодержания в разные периоды нагрева	$\left\{ \begin{array}{l} \Delta i_1 \\ \Delta i_2 \\ \Delta i_3 \end{array} \right\}$	дж/кг	0,24 кал/кг
Формулы для определения изменений теплосодержания по зонам печи	$\left\{ \begin{array}{l} \Delta i_1 = \\ = i_1 - i_0 \\ \Delta i_2 = \\ = i_2 - i_1 \\ \Delta i_3 = \\ = i_3 - i_2 \end{array} \right\}$	дж/кг	0,24 кал/кг
Средние поверхностные плотности тепловых потоков	$\left\{ \begin{array}{l} \bar{q}_1, \bar{q}_2, \\ q_3 \end{array} \right\}$	вт/м ²	860 кал/м ² ·ч
Абсолютная температура уходящих продуктов горения	$T_{\text{уход}}$ г		
Поправочный коэффициент времени нагрева, учитывающий форму тела	k_1	Безразмерный (для пластины $k_1 = 1$, для цилиндра $k_1 = 2$, для шара $k_1 = 3$)	
Удельная продолжительность нагрева	$z = \frac{60\tau}{S}$	мин/см	
Единовременная загрузка печи	$G_{\text{печ}}$	кг	
Часовая производительность печи	G	кг/ч	
Длины рабочих пространств печи:			
полная	$l_{\text{п. дл}}$	м	
активного пода подогревательной камеры	$l_{\text{акт}}$	м	
под сварочной камеры	$l_{\text{под}}$	м	
сварочной камеры	$l_{\text{свар}}$	м	
Температурный градиент	grad t	°С/м	
Критерий Фурье	$Fo = \frac{a\tau}{S^2}$	Безразмерный	
Критерий Био	$Bi = \frac{aS}{\lambda}$	»	
Скорость нагрева	c	°С/ч	

Наименование величины	Условное обозначение	Единицы измерения в системе СИ	Связь с единицами других систем
Коэффициент линейного теплового расширения металла	α_1	<i>град</i> ⁻¹	
Коэффициент объемного расширения металла	$\beta = 3\alpha_1$	<i>град</i> ⁻¹	
Отношение массы нагреваемого тела к его поверхности	$\frac{M}{F}$	<i>кг/м</i> ²	

ботки улучшаются с повышением температуры. Однако это справедливо не для всех сплавов.

Из производственной практики известно, что слишком высокая температура стали и сплавов с повышением пластичности вызывает ряд перечисленных ниже нежелательных явлений, ухудшающих прокатываемость металла и его качество [14].

1. Металл может получиться перегретым или пережженным, что приводит к снижению пластичности стали вследствие увеличения размера зерен. Кроме того, пережженная сталь с оплавленными границами зерен становится хрупкой и является браком.

2. Очень высокая температура нагрева способствует повышению температуры конца прокатки. В этом случае вследствие процесса рекристаллизации конечная продукция может получиться крупнозернистой, с пониженными механическими свойствами. В заэвтектидных углеродистых сталях при высоких температурах конца прокатки по границам зерен образуется карбидная (цементитная) сетка, а в отдельных случаях очень грубая сетка, не поддающаяся устранению термической обработкой.

3. При высоких температурах стали возможен брак по обезуглероживанию стали, что особенно отражается на качестве инструментальных сталей, главным образом быстрорежущих.

4. Увеличиваются потери металла от угара.

Учитывая перечисленные выше трудности при определении оптимальной температуры нагрева металла перед прокаткой, Н. Ю. Тайц [15] и М. Л. Зарошинский [1] рекомендуют рассчитывать температуру нагрева углеродистой стали по эмпирической формуле

$$T_n = T_{\text{сол}} - (373 \div 473^\circ \text{K}), \quad (1-11)$$

где T_n — температура нагрева стали;

$T_{\text{сол}}$ — температура по линии солидуса.

При повышении содержания углерода в стали максимальная температура нагрева понижается: до 1350°С при 0,1% С, 1250—1270°С при 0,2% С, 1200—1220°С при 0,4% С и 1180—1200°С при 0,6% С.

Для инструментально-углеродистой стали с содержанием углерода 0,8; 1,0 и 1,5% рекомендуем самостоятельно найти температуру нагрева металла, пользуясь диаграммой Fe—C.

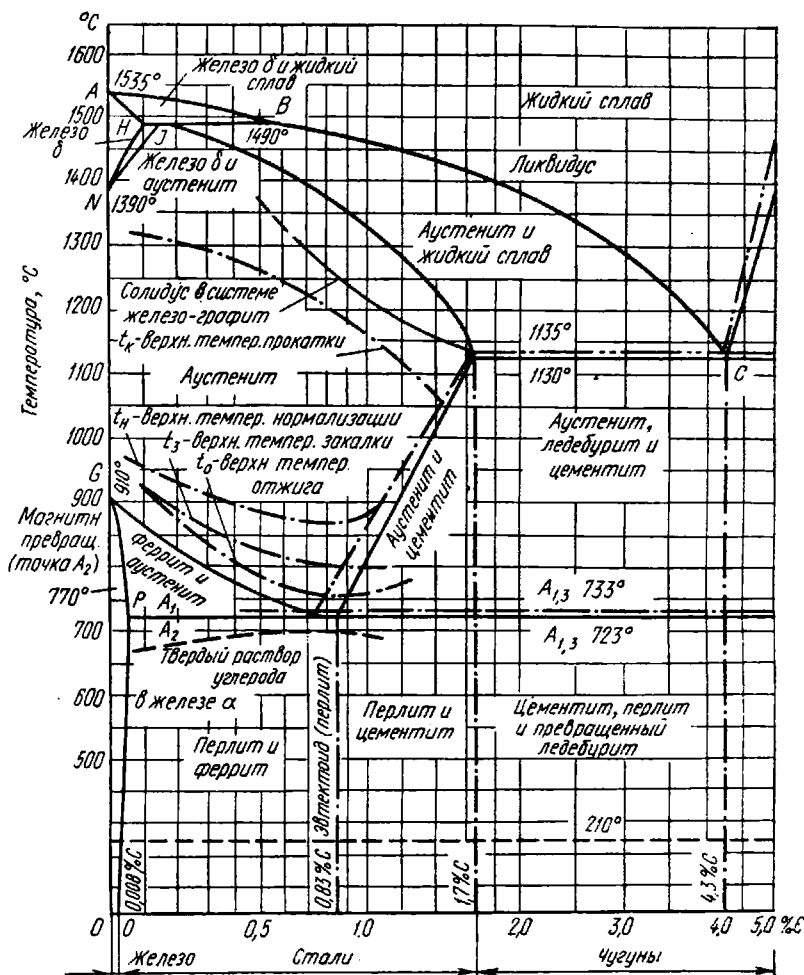


Рис. 2. Диаграмма состояния углеродистой стали (t_k — температура нагрева сталей перед прокаткой)

При определении температуры конца нагрева стали в печи необходимо еще иметь в виду следующие соображения:

1) металл при выбранной температуре должен иметь однофазную структуру твердого раствора, так как многофазная структура характеризуется меньшей пластичностью, чем гомогенная или однофазная, в связи с различием механических свойств фаз при высоких температурах;

2) выбранная температура нагрева металла должна обеспечить, в известной степени, интенсификацию диффузионного процесса, т. е. самопроизвольное выравнивание концентрации химических элементов, карбидной ликвиции и других вредных скоплений в сплаве.

Длительная выдержка при 1000—1150° С способствует удалению некоторого количества водорода из стали путем диффузии и тем самым снижает чувствительность ее к флокенам. Особенно это относится к таким флокеночувствительным сталям, как шарикоподшипниковая, конструкционная, хромоникелевая и др.

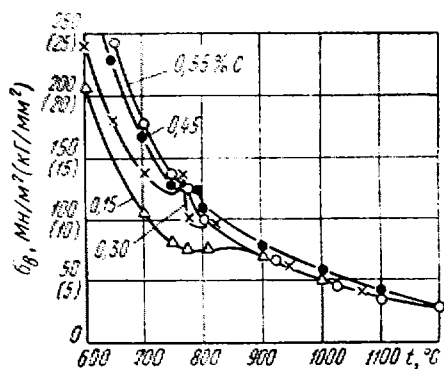


Рис. 3. Влияние температуры на предел прочности легированных сталей с различным содержанием углерода

тельное удлинение $\delta = \Delta l/l \cdot 100$, %; поперечное сужение $\psi = (F_0 - F_1)/F_0 \cdot 100$, %; результаты испытаний на кручение (по числу оборотов испытуемого образца до его разрушения) и ударную вязкость $a_n [10^5 \text{ н} \cdot \text{м}/\text{м}^2 \text{ (кг} \cdot \text{м}/\text{см}^2)]$.

Одновременно с этими испытаниями определяют прочность металла. Прочность металла характеризуется пределом прочности и твердостью. Способы механических испытаний металла при высоких температурах достаточно подробно рассмотрены в работах [12, 13] и др.

Результаты механических испытаний металла при высоких температурах представляют в виде графиков, по которым определяют интервал пластичности испытуемого металла и производят выбор температуры металла перед прокаткой и в конце ее. Один из таких графиков приведен на рис. 3.

Температуру нагрева слитков из углеродистых и легированных сталей перед прокаткой и температуру в конце прокатки можно определить по табл. 13.

Пояснения к табл. 13:

1) стали 18ХНВА, 30ХГСА, 60С2 обладают большой склонностью к наклепу при температурах ниже 850° С;

2) для уменьшения полосчатости в структуре готового сорта из стали 15 температура конца прокатки должна быть не ниже 850;

Температуры начала и конца прокатки различных сталей [12]

Виды стали	Марки стали	Температура начала прокатки, °С	Температура конца прокатки, °С
Конструкционные	15	1260	≥ 850
	12ХН3А	1260	≥ 800
	18ХНВА	1220	≥ 850
	30ХГСА	1240	≥ 850
	60С2	1140	≥ 800
	Инструментальные	У7	1220
У12А		1200	800—850
ЭИ366		1150	≥ 900
Х12М		1170	≥ 850
Р9		1190	≥ 900
Р18		1230	≥ 900
Окалиностойкие, нержавеющей, жароупорные, а также сплавы с высоким омическим сопротивлением		Х9С2	1240
	1Х13	1280	≥ 850
	Х17	1100	Не ограничена
	Х28	1100	750—850
	1Х25Ю5	1100	≥ 800
	1Х18Н9	1250	≥ 850
	Х18Н11Б	1200	≥ 900
	Х18Н25С2	1180	≥ 850
	Х23Н18	1200	≥ 900
	Х13Н4Г9	1180	≥ 900
	1Х14Н14В2М	1200	≥ 850
	Х15Н60	1160	≥ 850
	Х20Н80	1170	≥ 800

3) сталь У7 при температуре ниже 750° С склонна к образованию полосчатой структуры, а выше 900° С — к выпадению ферритной составляющей;

4) для предотвращения образования в готовом крупном сорте из стали У12А карбидной сетки температуру конца прокатки принимают не выше 850° С, а при прокатке сорта мелких размеров со стороной (<20 мм) для предотвращения черного излома — не ниже 800° С;

5) во избежание образования графита в поверхностных слоях изделий из стали ЭИ366 температура конца прокатки этой стали должна быть не ниже 900° С;

6) для стали Х28 температура конца прокатки должна быть в пределах 750—850° С, так как при более высокой температуре готовый прокат имеет крупное зерно.

Стали аустенитного класса обладают склонностью к быстрому наклепу, поэтому для них температуру конца прокатки принимают не ниже 850°C .

Кроме разнообразных методов определения температуры нагрева стали перед прокаткой, основанных на использовании диаграмм состояния сплавов и механических испытаний металла при высоких температурах, в производственной практике темпера-

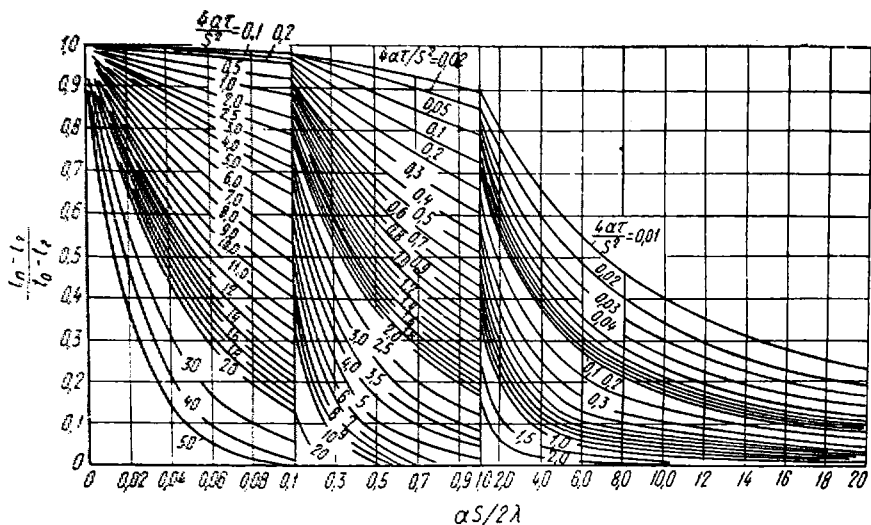


Рис. 4. График температур Шака для поверхности пластин

туру поверхности t_n и середины t_c слитка или заготовки определяют также по данным $t_{гас}$, τ и $t_{от}$. Решим эту задачу аналитическим способом с применением критериальных функций. Для этого воспользуемся методом Л. М. Мариенбаха [16].

1. По таблицам, имеющимся в работах [17 и 18], устанавливают физические константы для металла (см. табл. 12): λ , c_p , ρ ; $a = \lambda / c_p \rho$ (средние значения в интервале температур металла при посадке металла в печь и заданной температуре нагрева).

2. Определяют коэффициенты теплопередачи α по формуле Шака с поправкой Хейлингенштедта:

$$\alpha = 50 + 0,3 (t_{гас} - 700^{\circ}\text{C}). \quad (2-II)$$

3. Находят отношение $\alpha S / 2\lambda$, где S — сторона или диаметр нагреваемого тела.

4. Определяют отношение $4\alpha\tau / S^2$, где τ — время нагрева металла, рассчитываемое по методу Л. М. Мариенбаха.

5. По найденным $\frac{\alpha S}{2\lambda}$ и $\frac{4\alpha\tau}{S^2}$ с помощью диаграмм (рис. 4—7) находят значения отношений:

$$\frac{t_n - t_{гас}}{t_0 - t_{гас}} \quad \text{и} \quad \frac{t_c - t_{гас}}{t_0 - t_{гас}}.$$

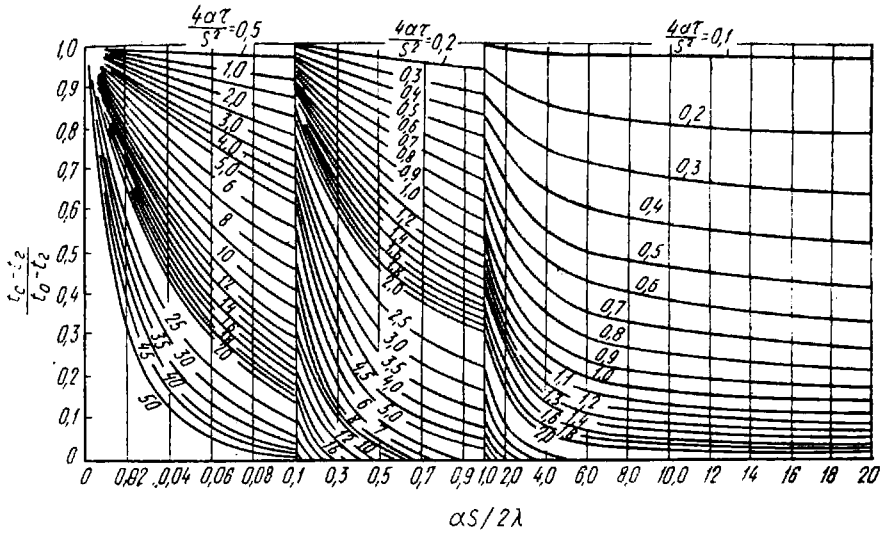


Рис. 5. График температур Шака для середины пластин

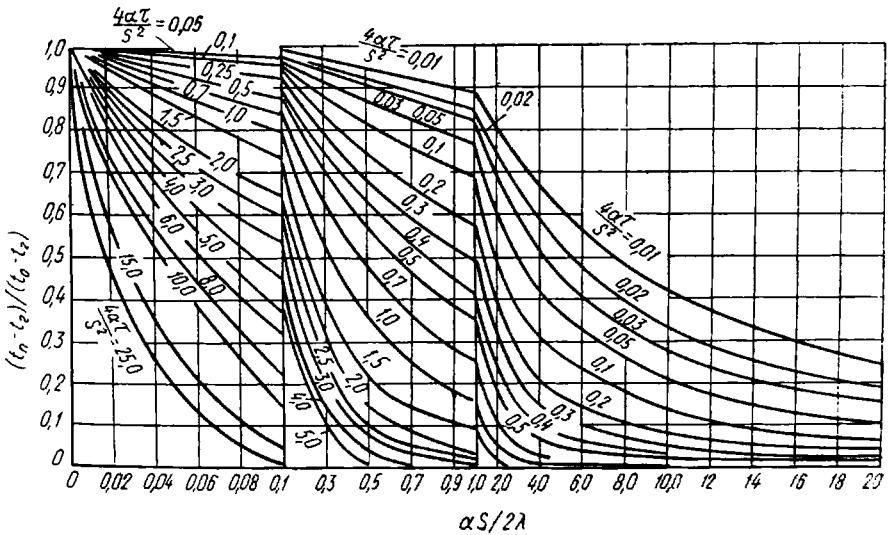


Рис. 6. График температур Шака для поверхности цилиндра

6. Из этих отношений определяют t_n и t_c .

Теоретические методы определения температуры нагрева металла не могут претендовать на абсолютное совпадение с данными

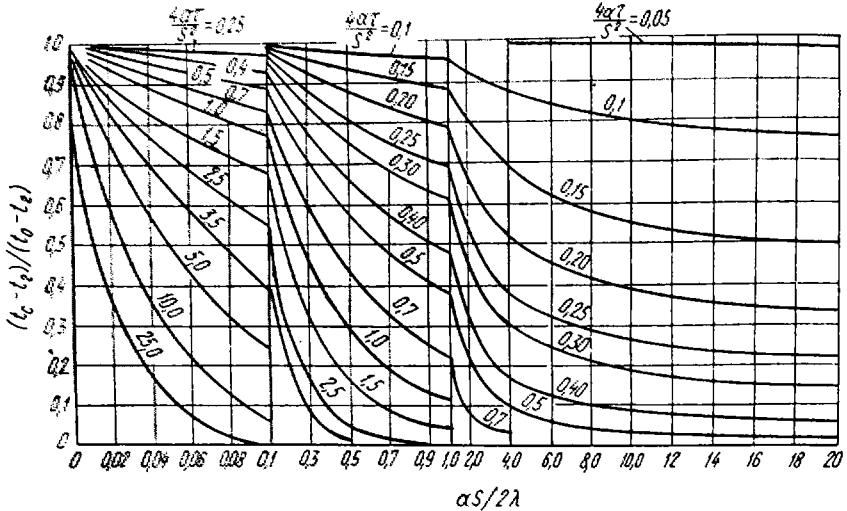


Рис. 7. График температур Шака для оси цилиндра

практики. Необходима дополнительная проверка правильности решения задачи в лабораторных и производственных условиях. При проектировании вновь строящихся прокатных станов или

Таблица 14

Теоретическая температура пережога и максимальная температура нагрева [15]

Сталь	Температура нагрева $t_1, ^\circ\text{C}$	Температура пережога $t_2, ^\circ\text{C}$	$\Delta t = t_2 - t_1, \text{град}$
Углеродистая, содержащая С, %:			
1,5	1050	1140	90
1,1	1080	1180	100
0,9	1120	1220	100
0,7	1180	1280	100
0,5	1250	1350	100
0,2	1320	1470	150
0,1	1350	1490	140
Кремнемарганцовистая пружинная			
3%-вая	1250	1350	100
Никелевая (3% Ni)	1250	1370	120
Хромоникелевая (8% Cr)	1250	1370	120
Никелевая для цементации (5% Ni)	1270	1450	180
Хромованадиевая	1250	1350	100
Быстрорежущая	1280	1380	100
Аустенитная хромоникелевая	1300	1420	120

при разработке технологии прокатки новых сталей и сплавов оптимальные режимы нагрева металла разрабатывают на базе опытных данных с обоснованием последних предварительными расчетами по рассмотренным ниже методам.

Предельная температура нагрева металла перед прокаткой находится в неразрывной связи со скоростью или временем нагрева. Чем выше температура нагрева, тем больше должна быть скорость нагрева.

При несоответствии температуры нагрева его скорости неизбежно возникновение брака в виде перегрева или пережога.

Рекомендуемые температуры нагрева конструкционных и инструментальных сталей приведены в табл. 13 и 14.

Продолжительность нагрева стали

В технологии нагрева стали существенную роль играет время нагрева стали и сплавов. Правильное определение времени нагрева не только обеспечивает требуемое качество прокатных изделий, структуру и механические свойства, но и создает благоприятные условия деформации металла при прокатке. Равномерно прогретый металл характеризуется прямолинейным выходом металла из валков, без изгибов полосы, без рванин на ее поверхности. Такой металл «мягко» захватывается валками, без ударов. В этом случае достигается безаварийная эксплуатация и высокие технико-экономические показатели работы стана, обеспечиваются безопасные условия труда.

Следует отметить, что до сих пор не разработаны математические методы определения времени нагрева металла, которые позволили бы получать результаты расчета, точно совпадающие с практическими данными.

Для определения суммарной продолжительности нагрева металла в печи и времени нагрева металла по зонам нагревательной печи воспользуемся только конечными формулами, приведенными в работах [15, 16, 19]. При расчетах используем обозначения, перечисленные в табл. 12.

Ниже приведены расчетные формулы разных авторов, по которым можно определить продолжительность нагрева стали.

Ф о р м у л ы Н. Ю. Т а й ц а [15]

При двухступенчатом нагреве:

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= \frac{R\rho \Delta i_1}{k_1 q_1} \text{ ч}; \\ \tau_2 &= \frac{R\rho \Delta i_2}{k_1 q_2} \text{ ч}; \\ \tau &= \tau_1 + \tau_2 \text{ ч}; \\ z &= \frac{60\tau}{S} \text{ мин/сек.} \end{aligned} \right\} \quad (3-11)$$

При трехступенчатом нагреве:

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= \frac{R\rho \Delta i_1}{k_1 q_1} \text{ ч;} \\ \tau_2 &= \frac{R\rho \Delta i_2}{k_2 q_2} \text{ ч;} \\ \tau_3 &= \frac{R\rho \Delta i_3}{k_3 q_3} \text{ ч;} \\ \tau &= \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \text{ ч.} \end{aligned} \right\} (4-11)$$

Время нагрева тел определяют по формуле Н. Ю. Тайца, полученной на основании работ Б. В. Старка [15]:

$$\tau = \frac{M}{F} \frac{c_p}{\alpha} \ln \frac{t_{\text{печ}} - t_{0.т}}{t_{\text{печ}} - t_{к.т}} \text{ ч.} \quad (5-11)$$

Тонкое тело от массивного по данным Г. П. Иванцова отличается величиной критерия Био: для тонкого тела $Bi \leq 0,25$, для массивного тела $Bi \geq 0,50$, для тела средних размеров $0,25 < Bi < 0,50$.

Метод Л. М. Мариенбаха [16]

Продолжительность нагрева стали τ определяют в следующей последовательности:

- 1) находят данные о физических качествах нагреваемого материала, характеризующиеся следующими параметрами: λ , c_p ; ρ ; α (см. табл. 12);
- 2) определяют коэффициент теплопередачи α ;
- 3) определяют величину $\alpha S/2\lambda$;
- 4) вычисляют величину $\frac{t_{\text{п}} - t_{\text{газ}}}{t_0 - t_{\text{газ}}}$ или $\frac{t_{\text{газ}} - t_{\text{п}}}{t_{\text{газ}} - t_0}$;
- 5) по диаграммам рис. 4—7 находят значение $4\alpha\tau/S^2$;
- 6) с учетом значения $4\alpha\tau/S^2$ определяют величину τ , ч (см. задачу № 35).

Метод Н. М. Ицковича [19]

Н. М. Ицкович предложил следующие формулы для приближенных расчетов времени нагрева по зонам печи. ч :

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{G_{\text{печ}}}{G}; \\ \tau_{\text{под}} &= \tau \frac{l_{\text{под}}}{l_{\text{акт}}}; \\ \tau_{\text{свар}} &= \tau \frac{l_{\text{свар}}}{l_{\text{акт}}}; \\ \tau_{\text{том}} &= \tau \frac{l_{\text{том}}}{l_{\text{акт}}}, \end{aligned} \right\} (6-11)$$

Время нагрева металла в каждой зоне, полученное по формулам (6-II) проверяют по другим формулам:

$$\left. \begin{aligned} \tau_{\text{под}} &= \frac{287 \Delta i_{\text{под}} S \sqrt{S}}{\left(\frac{T_{\text{уход. г}}}{100}\right)^2 \sqrt{\Delta t}}; \\ \tau_{\text{свар}} &= \frac{35,6 \Delta i_{\text{свар}} S^2}{\sqrt{\Delta t_1 \Delta t_2}}; \\ \tau_{\text{том}} &= \frac{112,5 \Delta i_{\text{том}} S^2}{\sqrt{\Delta t_2 \Delta t_3}}. \end{aligned} \right\} \quad (7-II)$$

Определение значений Δi , Δt_1 , Δt_2 и Δt_3 подробно рассмотрено в работе [19].

Определение продолжительности нагрева металла до температуры начала прокатки по методам, приведенным в работах [15, 16, 19], можно рекомендовать только инженерам проектных организаций, так как для этой работы потребуется относительно много времени.

В производственных условиях для решения этой задачи используют перечисленные ниже полуэмпирические формулы, хорошо проверенные на практике.

1. Ф о р м у л а Н. Н. Д о б р о х о т о в а [25]:

$$\tau = k_1 D \sqrt{D} \text{ ч}, \quad (8-II)$$

где τ — время нагрева от 0 до 1200° С;

D — диаметр круглой или сторона квадратной заготовки;

k_1 — постоянный коэффициент ($k_1 = 10$ для мягкой стали, $k_2 = 20$ для высоколегированной стали).

Аналогичная формула приведена в работе [23]:

$$\tau = \alpha k_1 D \sqrt{D} \text{ ч}, \quad (9-II)$$

где $\alpha = 1 \div 4$ — коэффициент, учитывающий способ укладки заготовок в печи (рис. 8), т. е. коэффициент, учитывающий неравномерность подвода тепла с разных сторон заготовки;

k_1 — опытный коэффициент, учитывающий теплопроводность стали $k_1 = 12,5$ для углеродистой и легированной стали и $k_1 = 20 \div 25$ для высоколегированной;

D — размер поперечного сечения заготовки.

2. Ф о р м у л а Н. Ю. Т а й ц а [6]:

$$\tau = (7,5 + 0,05S) S \text{ мин}, \quad (10-II)$$

где S — толщина слитка, см.

Формула пригодна для определения времени нагрева заготовок из малоуглеродистых сталей в методических печах при температуре уходящих газов 800—850° С.

3. Формула, рекомендованная Всесоюзной конференцией в 1938 г. по стахановским методам термической обработки черных металлов:

$$\tau = \frac{S^n}{a} \varphi, \quad (11-II)$$

где S — толщина нагреваемого металла, м;
 n — показатель степени, определяемый опытом;
 a — коэффициент температуропроводности.

Расположение заготовок	τ	Расположение заготовок	τ	Расположение заготовок	τ
	1		1,3		2,2
	1		1		2
	2		1,4		1,6
	1,4		4		

Рис. 8. Влияние расположения заготовок в печи на время нагрева]

В соответствии с опытными данными величина удельной продолжительности нагрева слитков z изменяется в следующих пределах: 12—14 мин/см для углеродистой и легированной стали, 21—23 мин/см для шарикоподшипниковой стали, 8—10 мин/см — для мягкой стали.

Время нагрева можно определить по формуле:

$$\tau = kS. \quad (12-II)$$

Более подробные сведения о величине τ имеются в табл. 18, а о величине k см. на с. 45.

За последнее время в металлургической и машиностроительной промышленности начали использовать прогрессивный, так называемый скоростной, метод нагрева металла [15, 26].

Так, по данным завода «Электросталь» для слитков из быстрорежущей стали Р18 продолжительность нагрева можно определить по формуле (12-II)

или

$$\tau = (0,25 \div 0,30) S \varphi, \quad (13-II)$$

где S — сторона, или диаметр сечения, см.

Меньшие значения k принимают для слитков сечением менее 250×250 мм, а большие — для слитков сечением более 250×250 мм.

По данным Ю. М. Чижикова [61], коэффициент k выбирают в зависимости от вида стали:

Сталь	k	Сталь	k
Углеродистая	0,10—0,15	конструкционная и специальная	0,20—0,30
Легированная конструкционная	0,15—0,20	Высоколегированная инструментальная	0,30—0,40

Этот коэффициент тем меньше, чем больше тепловая мощность нагревательных печей.

При горячей садке слитков продолжительность нагрева зависит от их температуры при садке: она тем меньше, чем выше температура. Продолжительность нагрева горячих слитков в колодцах можно определить по формуле:

$$\tau = kS - 0,006 (t - 200) \text{ ч}, \quad (14-II)$$

где t — температура металла при посадке;

k — коэффициент, учитывающий влияние состава стали и условий нагрева.

На одном из металлургических заводов действительные графики нагрева горячих слитков легированных сталей массой 5000—6000 кг соответствовали следующей зависимости:

$$\tau = 7,0 - 0,006 (t - 200) \text{ ч}. \quad (15-II)$$

Температурные напряжения в металле при нагреве

При нагреве слитка или заготовки перед прокаткой меняются их линейные и объемные размеры:

$$l_t = l_0 (1 + \alpha_1 t); \quad (A)$$

$$V_t = V_0 (1 + \beta t). \quad (B)$$

По формуле (A) определяются все размеры прокатываемой полосы в горячем состоянии, что весьма необходимо знать при калибровке валков. Биномиальный коэффициент $(1 + \alpha_1 t)$ в зависимости от температуры прокатки (при $\alpha_1 = 12,5 \cdot 10^{-6}$ для стали) имеет следующие значения:

Температура, °С	800	900	1000	1100	1200
$1 + \alpha_1 t$	1,010	1,011	1,012	1,013	1,0145

Температурные напряжения в пластине определяются по формуле

$$\sigma = \frac{\alpha_1 E}{1 - \psi'} (\bar{t} - t),$$

где E — модуль упругости [для стали $E = 2 \cdot 10^5 \text{ Мн/м}^2$ ($2 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$)];

ψ' — коэффициент Пуассона (для стали $\psi' = 0,3$);

\bar{t} — средняя температура тела;

t — температура тела в рассматриваемом сечении или элементе.

При изменении размеров нагреваемого тела в нем возникают температурные напряжения: растягивающие (положительные) и сжимающие (отрицательные). Различные по знаку напряжения появляются в результате неравномерного распределения температуры по сечению и по длине нагреваемого в печи тела.

В начальный момент нагрева периферийные слои металла имеют большую температуру, чем центральные слои. Разность температур по сечению тела определяется величиной, именуемой температурным градиентом $\text{grad } t^\circ \text{C/м}$. В центре сечения слитка или заготовки возникают температурные растягивающие напряжения, а на поверхности — сжимающие.

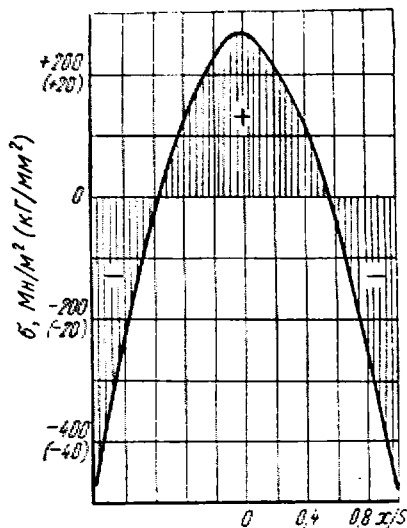


Рис. 9. Распределение температурных напряжений в пластине при мгновенном изменении температуры поверхности

Картина распределения температурных напряжений в пластине при мгновенном изменении температуры поверхности представлена на рис. 9 [15].

При определении величины термических напряжений в металле при нагреве принимают основные положения из теории теплопередачи [27].

Теоретическое определение температурных напряжений основано на формулах теории упругости. Поэтому, при решении уравнений теплопроводности с использованием основных положений теории упругости получаются результаты, недостаточно полно совпадающие с практическими данными. Эти результаты можно считать первым приближением, нуждающимся в корректировке с помощью экспериментальных данных.

В процессах нагрева металла могут возникать следующие напряжения: 1) временные (термоупругие); 2) структурные; 3) упруго-пластические напряжения [15].

Следует отметить, что термические напряжения опасны при нагреве непластичного или малопластичного металла с гетерогенной структурой, при наличии неметаллических включений, газовых пузырей, плен, ликвации, пустот кристаллической неоднородности и т. д. Неоднородность стали ведет к неравномерному распределению напряжений, а иногда и к концентрации напряжений в отдельных частях тела.

При нагреве таких тел возможно их разрушение, если величина напряжения превышает предел упругости, близкий к пределу прочности, так как пластической деформации в этом случае

практически не будет. Для углеродистой стали температура перехода в пластическое состояние равна 400°C .

Структурные напряжения не могут быть опасными, так как они возникают при температурах выше 500°C , при которых наблюдается уменьшение напряжений за счет пластической деформации.

Известно, что сталь обладает заметной упругостью до 500°C , выше этой температуры сталь практически находится в пластическом состоянии. Следовательно, отмеченные выше температурные напряжения необходимо учитывать при нагреве от 0 до 500°C , особенно для малопластичных сталей (типа P18) и сплавов. Напряжения при упруго-пластическом состоянии металла менее опасны, чем термоупругие, по указанным выше причинам.

Наряду с этим следует иметь в виду остаточные напряжения, которые образуются после полного охлаждения металла в изложницах и которые, следовательно, имеются в металле перед посадкой его в печь.

Ввиду того, что остаточные напряжения имеют знаки, одинаковые с напряжениями, возникающими при нагреве, те и другие напряжения при нагреве суммируются. Величина и распределение температурных напряжений зависит от условий нагрева, от теплофизических и механических свойств вещества, размеров и формы тела.

Ниже рассмотрено определение напряжений в металле при нагреве для случаев: мгновенного изменения температуры поверхности тела, линейного закона изменения температуры поверхности тела, нагрева в печи с постоянной температурой.

При решении подобных задач используют формулы Н. Ю. Тайца [15].

Методика решения задач по определению напряжений при мгновенном изменении температуры поверхности

Задача № 19 (см. табл. 12). Определить температурные напряжения в разных точках сечения тела, исходя из следующих условий его нагрева: 1) мгновенное изменение температуры поверхности; 2) температура тела до посадки в печь $t_0, ^{\circ}\text{C}$; 3) температура в рабочем пространстве печи, $t_n, ^{\circ}\text{C}$; 4) форма тела — плита толщиной $2S$; 5) остаточные напряжения в теле отсутствуют.

Материал плиты — сталь, имеющая следующие физико-механические параметры: модуль упругости E , коэффициент Пуассона для стали $\psi' = 0,3$.

Решение. Отыскиваемые напряжения в любой точке сечения нагреваемого тела находят по формуле Н. Ю. Тайца:

$$\sigma = \frac{E\alpha_1}{1-\psi'} (t_0 - t_n) f\left(\frac{\alpha t}{S^2}; \frac{x}{S}\right). \quad (16-II)$$

1. Для решения уравнения (16-II) требуется найти значение критерия Фурье $\alpha t/S^2$.

2. Примем за начало координат центр сечения плиты и разделим расстояние от поверхности тела до его центра на несколько участков: x_1, x_2, \dots, x_n .

3. После этого находят безразмерное отношение однородных величин, так называемый симплекс: $x_1/S, x_2/S, \dots, x_n/S$.

4. По данным $\alpha\tau/S^2$ и x/S по графику (рис. 10) определяют значение функции $f(\alpha\tau/S^2; x/S)$.

Найденные члены уравнения (16-II) позволяют легко определить напряжение в любой точке сечения плиты и построить график распределения напряжений (см. рис. 9).

С этой задачей технологом приходится иметь дело при определении допустимой температуры в посадочном окне нагревательных печей при загрузке металла, чувствительного к нагреву, особенно слитков с литой структурой и металла с малым коэффициентом теплопроводности λ типа быстрорежущих сталей.

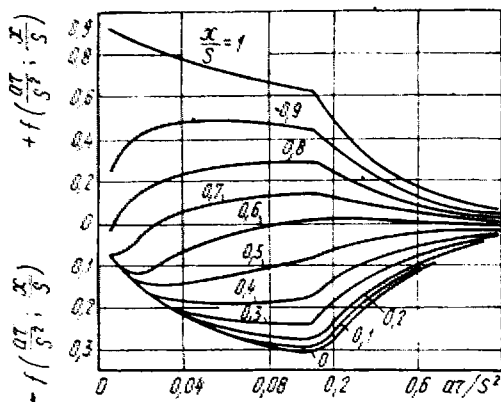


Рис. 10. График функции $f(\alpha\tau/S^2; x/S)$ для температурных напряжений при мгновенном изменении температуры поверхности

Определение напряжений при линейном изменении температуры поверхности

Задача № 20 [15]. Стальная плита толщиной $2S$ с известными физико-механическими параметрами нагревается в печи с двух сторон с равномерной скоростью c . Построить график изменения температурных напряжений в процессе нагрева, если в начальный момент температура равна нулю и никаких напряжений в плите не было.

Решение. Напряжения в плите являются функцией времени нагрева (τ), отношений (x/S) и скорости нагрева (c) и определяются уравнением:

$$\frac{\sigma(1-\psi')}{E} \cdot \frac{1}{\alpha_1 c \tau} = \frac{1}{6} \cdot \frac{S^2}{\alpha \tau} \left(1 - 3 \frac{x^2}{S^2}\right) + \frac{S^2}{\alpha \tau} f\left(\frac{\alpha \tau}{S^2}; \frac{x}{S}\right); \quad (17-II)$$

При достаточно большом промежутке времени $\tau \geq \frac{S^2}{a}$ функция f принимает столь малое значение, что им можно пренебречь. В этом случае уравнение (17-II) примет вид:

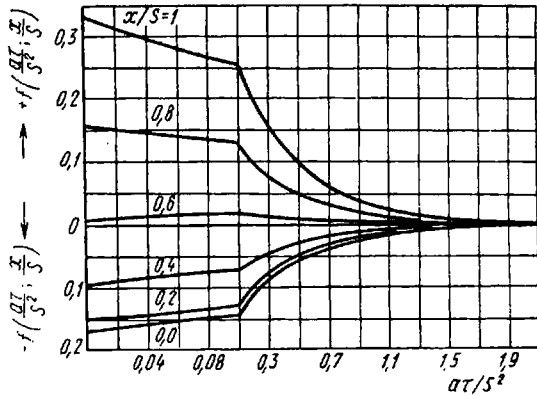
$$\sigma_y = \sigma_z = \frac{\alpha_1 E}{1-\psi'} \cdot \frac{c S^2}{6a} \left(1 - 3 \frac{x^2}{S^2}\right) \text{ Мн/м}^2. \quad (18-II)$$

Методика решения данной задачи в основном идентична методике решения задачи № 19.

Из уравнения (17-II) определяют напряжения σ_y и σ_z :

$$\sigma_y = \sigma_z = \frac{\alpha_1 E}{1 - \psi'} \frac{CS^2}{a} \left[\frac{1}{6} \left(1 - 3 \frac{x^2}{S^2} \right) + f \left(\frac{\alpha \tau}{S^2}; \frac{x}{S} \right) \right]. \quad (19-II)$$

Рис. 11. График функции $f(\alpha\tau/S^2, x/S)$ для температурных напряжений в пластине при линейном изменении температуры поверхности



Функцию $f(\alpha\tau/S^2; x/S)$ определяют по графику (рис. 11) для разных значений x/S и времени τ .

По результатам расчетов для всех промежутков времени нагрева и значений x (расстояние от центра сечения тела до его поверхности) строится график, подобный графику, приведенному на рис. 12.

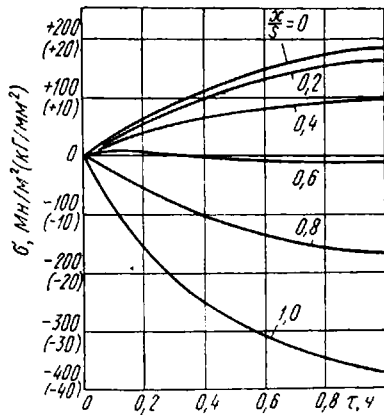


Рис. 12. Температурные напряжения в пластине при линейном изменении температуры поверхности

Для построения графика составляют таблицу по форме табл. 15.

Из формулы (19-II) следует, что при $x = \pm S$ на поверхности пластины

$$\sigma_y^n = \sigma_z^n = - \frac{\alpha_1 E}{1 - \psi'} \cdot \frac{cS^2}{3a};$$

при $x = 0$, т. е. в середине пластины,

$$\sigma_y^c = \sigma_z^c = + \frac{\alpha_1 E}{1 - \psi'} \cdot \frac{cS^2}{6a};$$

в нейтральном сечении, в котором $\sigma_y = \sigma_z = 0$, будет $x_0/S = 0,578$, когда $(1 - 3x_0^2/S^2) = 0$.

Задача № 21. Дан график нагрева плиты $t = \varphi(\tau)$. Требуется определить распределение напряжений по сечению плиты в любой момент времени, если в начале нагрева температурный градиент и температурные напряжения отсутствуют. Известны толщина

Результаты вычислений к задаче № 42

Время, ч	$\frac{x}{S} = 1$			$\frac{x}{S} = 0,8$			$\frac{x}{S} = 0,6$		
	f	σ		f	σ		f	σ	
		Мн/м²	кг/мм²		Мн/м²	кг/мм²		Мн/м²	кг/мм²
0,1	0,264	-87,8	-8,78	0,135	-22,9	-2,29	0,019	7,25	0,725
0,2	0,212	-154	-15,4	0,11	-54,7	-5,47	0,015	2,16	0,216
0,3	0,17	-207,5	-20,75	0,087	-84,0	-8,4	0,013	-3,8	-0,38
0,4	0,136	-251	-25,1	0,071	-100,4	-10,4	0,01	-4,2	-0,42
0,5	0,111	-282	-28,2	0,057	-122,0	-12,2	0,008	-6,75	-0,675
0,6	0,09	-310	-31,0	0,045	-137,0	-13,7	0,0065	-8,65	-0,865
0,7	0,071	-332	-33,2	0,037	-148,0	-14,8	0,005	-10,5	-1,05
0,8	0,057	-351	-35,1	0,029	-158,0	-15,8	0,004	-11,8	-1,18
0,9	0,046	-366	-36,6	0,024	-164,0	-16,4	0,003	-13,1	-1,31
1,0	0,035	-379	-37,9	0,019	-170,5	-17,5	0,002	-14,4	-1,44

Продолжение табл. 15

Время, ч	$\frac{x}{S} = 0,4$			$\frac{x}{S} = 0,2$			$\frac{x}{S} = 0,0$		
	f	σ		f	σ		f	σ	
		Мн/м²	кг/мм²		Мн/м²	кг/мм²		Мн/м²	кг/мм²
0,1	-0,07	19,1	1,91	-0,132	21,2	2,12	-0,146	27,8	2,78
0,2	-0,056	39,0	3,90	-0,106	52,1	5,21	-0,118	72,4	7,24
0,3	-0,046	51,8	5,18	-0,086	77,6	7,76	-0,1	85,2	8,52
0,4	-0,038	62,0	6,20	-0,067	102,0	10,2	-0,08	110,7	11,07
0,5	-0,03	72,2	7,22	-0,053	119,5	11,95	-0,064	131,0	13,1
0,6	-0,025	78,5	7,85	-0,045	130,0	13,0	-0,051	147,7	14,77
0,7	-0,019	86,0	8,6	-0,035	142,5	14,25	-0,04	162,0	16,20
0,8	-0,015	91,3	9,13	-0,028	151,5	15,15	-0,033	170,5	17,05
0,9	-0,012	95,2	9,52	-0,022	159,0	15,9	-0,025	180,7	18,07
1,0	-0,01	97,6	9,76	-0,019	163,0	16,3	-0,021	186,0	18,6

Примечание. Функцию $f\left(\frac{\alpha\tau}{S^2}; \frac{x}{S}\right)$ определяют по графику, приведенному на рис. 11.

стальной плиты $2S$ и физико-механические свойства стали: a ; α_1 ; E ; $\psi' = 0,3$. Начальная разность температур плиты $\Delta t_0 = 0$.

Решение. 1. Температурную кривую разбивают на прямолинейные участки и отмечают на них точки, соответствующие времени нагрева τ_1, τ_2, τ_3 и т. д.

2. В интервале данных участков находят скорости нагрева $C_1, C_2, C_3, \dots = t/\tau$ град/ч.

3. Вычисляют критерий Фурье $\alpha\tau_1/S^2$; $\alpha\tau_2/S^2$; $\alpha\tau_3/S^2$ и т. д.

4. По графику рис. 13 определяют значение критерия Фурье $\Phi(\alpha\tau/S^2; x/S)$ для каждой точки кривой, соответствующей времени нагрева τ_1, τ_2, τ_3 и т. д.

5. Определяют разность температур в предельных точках a , b , c и т. д. на разбитых участках заданной кривой по формуле

$$\Delta t_{\tau} = \frac{C_1 \cdot S^2}{2a}, \quad (20-II)$$

где Δt_{τ} — наибольшая разность температур по сечению, °С.

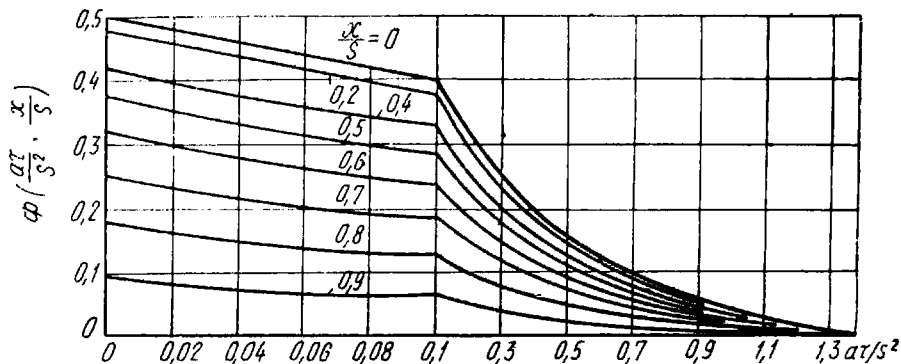


Рис. 13. График функции $\Phi(\alpha t/S^2; x/S)$ для пластины при линейном изменении температуры поверхности

6. Определяют начальную разность температур поверхности и середины тела Δt по формуле

$$\Delta t = \Delta t_{\tau} - 2(\Delta t_{\tau} - \Delta t_0) \Phi. \quad (21-II)$$

По условию задачи $\Delta t_0 = 0$.

Таким же методом определяют Δt в других точках кривой.

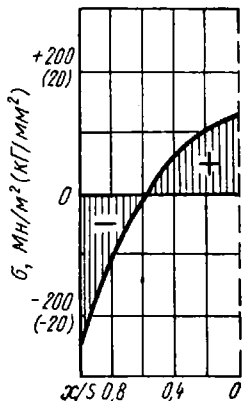


Рис. 14. Распределение температурных напряжений по сечению плиты

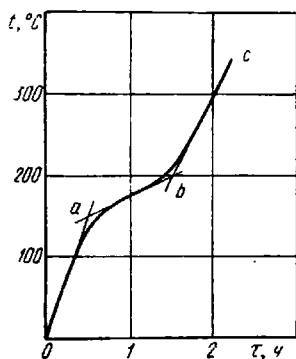


Рис. 15. График нагрева плиты

7. По графику рис. 11 определяют функцию $f(\alpha t/S^2; x/S)$, отвечающую избранным точкам рассматриваемого сечения нагреваемой плиты.

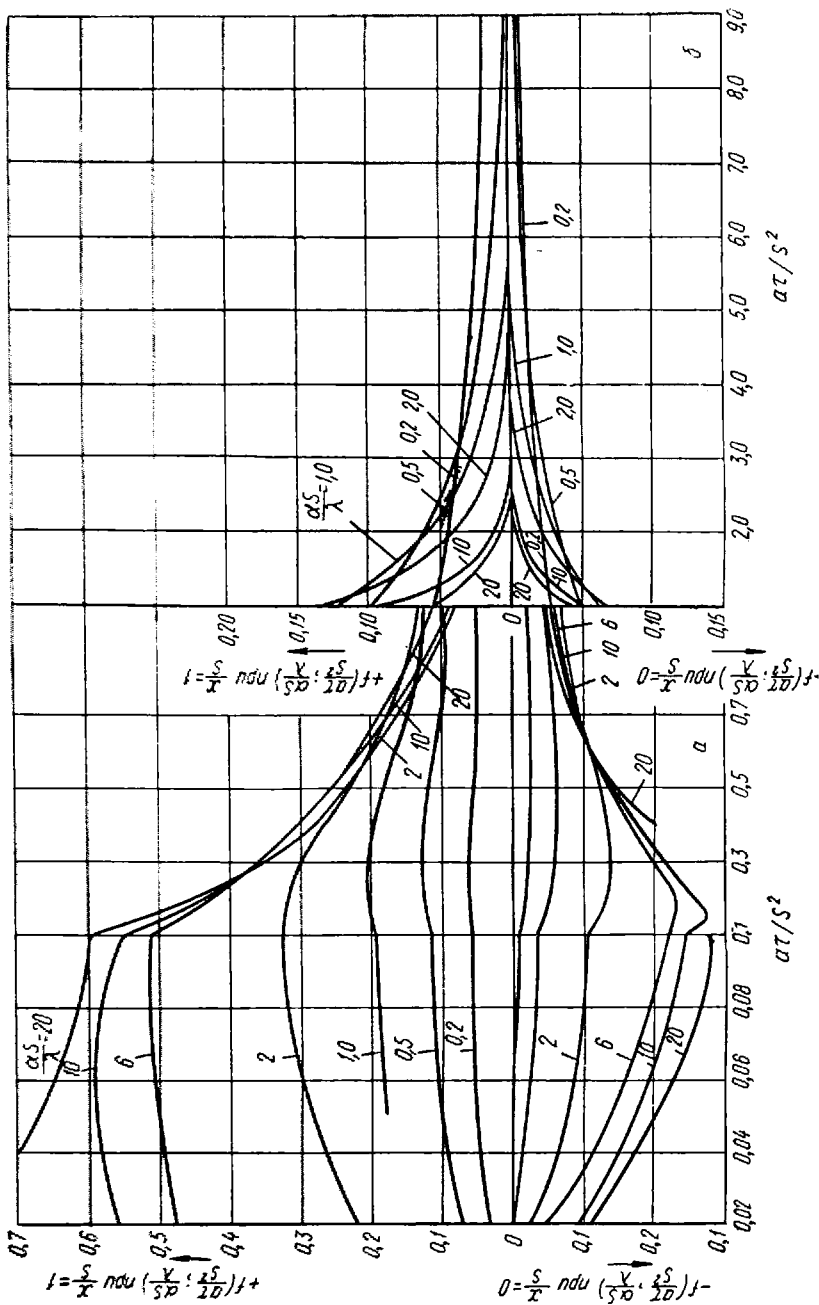


Рис. 16. График функции $f(\alpha\tau/S^2; \alpha S/\lambda)$ для температурных напряжений на поверхности (а) и в середине (б) пластины при постоянной температуре печи

8. Определяют напряжения σ_z по формуле (19-II).

9. По полученным расчетным данным строят график, аналогичный графику, приведенному на рис. 14. График нагрева металла представлен на рис. 15.

*Напряжения в металле при нагреве в печи
с постоянной температурой*

Задача № 22. Построить кривые изменения температурных напряжений на поверхности и в середине стальной плиты толщиной $2S$ при нагреве ее в печи (t_n), считая начальную температуру плиты $t_0 = 0^\circ \text{C}$.

Решение. 1. Как и в ранее рассмотренных задачах, вначале отыскиваются по справочнику данные физико-механических свойств стали: α_1 ; E ; ψ' ; λ ; a ; α .

2. Вычисляют критерии Био $Bi = \alpha S/\lambda$ и Фурье $Fo = \alpha t/S^2$. Величиной τ задаются.

3. Отыскивают по графику рис. 16 функцию $f(\alpha t/S^2, \alpha S/\lambda)$ при $x/S = 1$ для напряжений на поверхности и при $x/S = 0$ для напряжений в середине плиты. Значения функции $f(\alpha t/S^2; x/S)$ при $\alpha S/\lambda = 10$ отыскивают на графике рис. 17.

4. Определяют напряжение на поверхности плиты по формуле

$$\sigma_y^n = \sigma_z^n = \frac{\alpha_1 E}{1 - \psi'} (t_0 - t_n) f_n \left(\frac{\alpha \tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda}; \frac{x}{S} \right). \quad (22-II)$$

Напряжение в середине плиты при $x/S = 0$ определяют по формуле (22-II).

Результаты расчетов представляются в виде графика отдельно для растягивающих и для сжимающих напряжений (см. рис. 30).

Задача № 23. Определить температурные поверхностные и осевые напряжения в круглом слитке радиуса R при конечной температуре его поверхности t_n , начальной температуре цилиндра t_0 и температуре печи $t_{\text{печ}}$.

Решение. 1. По таблицам принимают значения физических параметров металла: λ , a , α , E , α_1 .

2. Находят критерий $\alpha R/\lambda$.

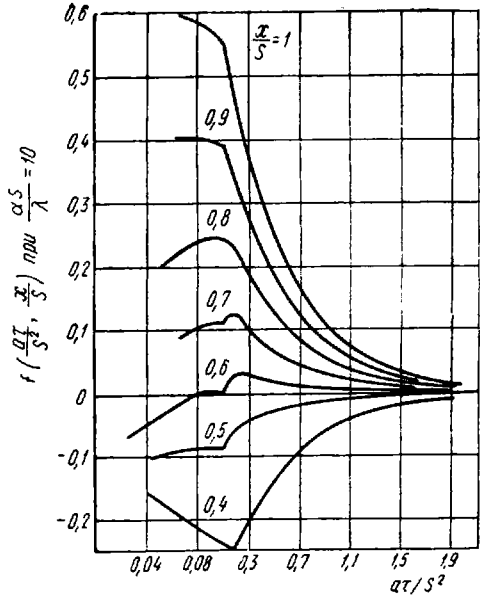


Рис. 17. График функции $f(\alpha\tau/S^2; x/S)$ для температурных напряжений в пластине при постоянной температуре в печи и при $\alpha S/\lambda = 10$

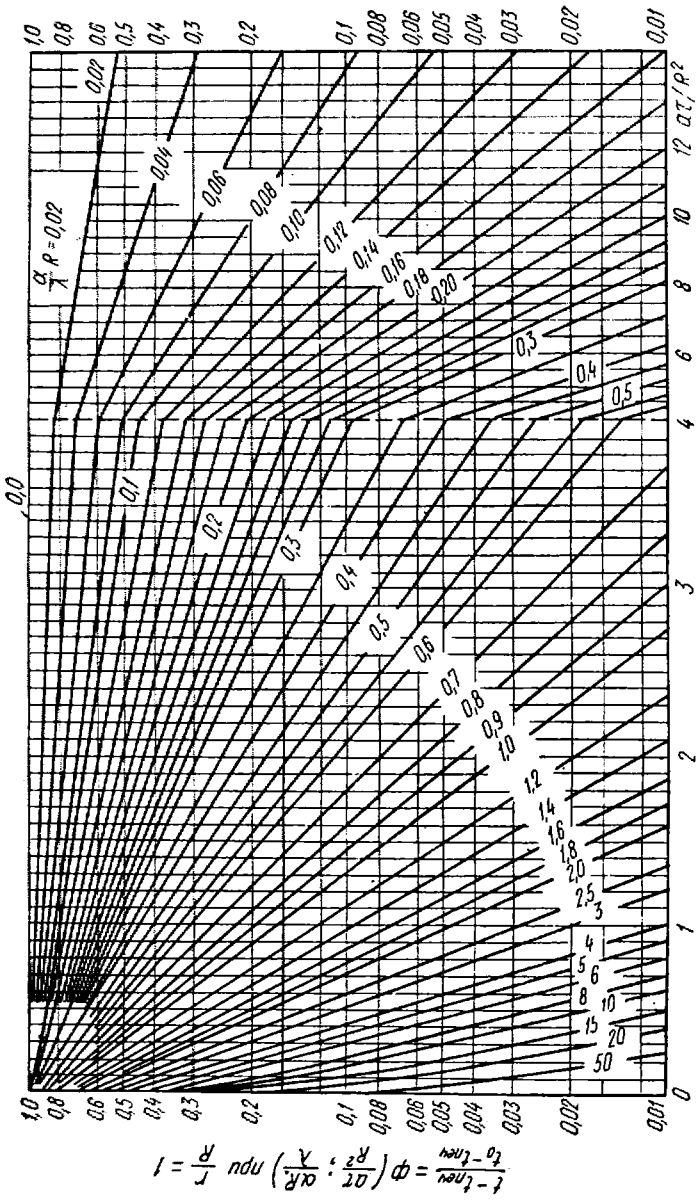


Рис. 18. Номограмма для определения температурного критерия $\Phi = \Phi(\alpha R/\lambda; \lambda/\alpha R)$ поверхности цилиндра бесконечной длины

3. Определяют относительную температуру поверхности цилиндра по формуле

$$\Phi = \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{печ}}}{t_0 - t_{\text{печ}}}. \quad (23-II)$$

4. По значениям $\alpha R/\lambda$ и Φ находят критерий $\alpha\tau/R^2$ (рис. 18).

5. С учетом значений $\alpha\tau/R^2$ и $\alpha R/\lambda$ по диаграммам, приведенным на рис. 19—21, отыскивают функции f_r , f_θ , и f_z для поверхности и оси цилиндра.

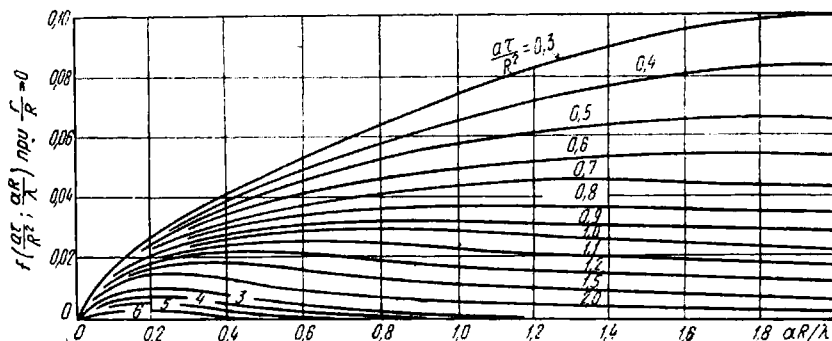


Рис. 19. График функции $f(\alpha\tau/R^2; \alpha R/\lambda)$ для радиальных напряжений на оси цилиндра при постоянной температуре

6. Определяют температурные напряжения на поверхности и по оси цилиндра по следующим формулам:

на поверхности:

радиальные напряжения $\sigma_r = 0$;

тангенциальные напряжения

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha_1 E}{1 - \psi'} (t_{\text{печ}} - t_0) f_\theta; \quad (24-II)$$

осевые напряжения

$$\sigma_z = \frac{\alpha_1 E}{1 - \psi'} (t_{\text{печ}} - t_0) f_z; \quad (25-II)$$

на оси:

радиальные напряжения

$$\sigma_r = \frac{\alpha_1 E}{1 - \psi'} (t_{\text{печ}} - t_0) f_r; \quad (26-II)$$

тангенциальные напряжения

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha_1 E}{1 - \psi'} (t_{\text{печ}} - t_0) f_\theta; \quad (27-II)$$

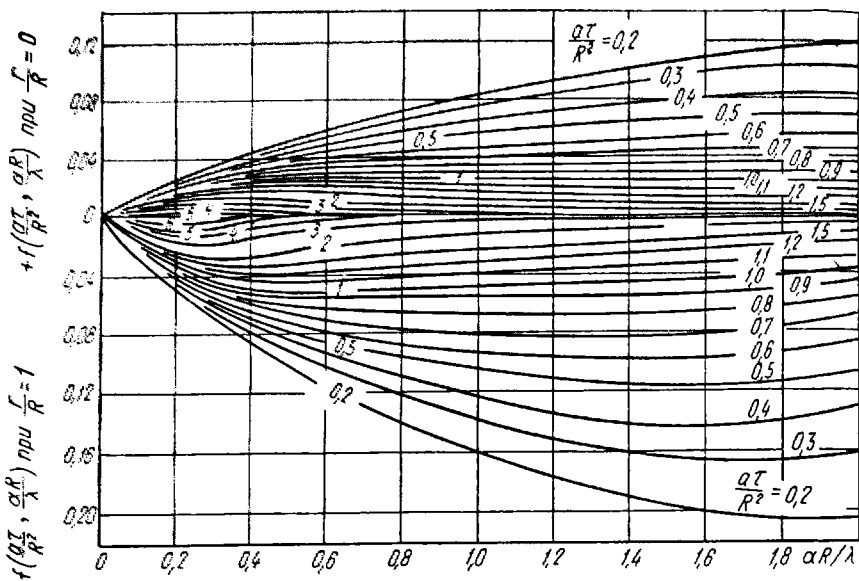


Рис. 20. График функции $f(\alpha\tau/R^2; \alpha R/\lambda)$ для тангенциальных напряжений на поверхности и на оси цилиндра при постоянной температуре печи

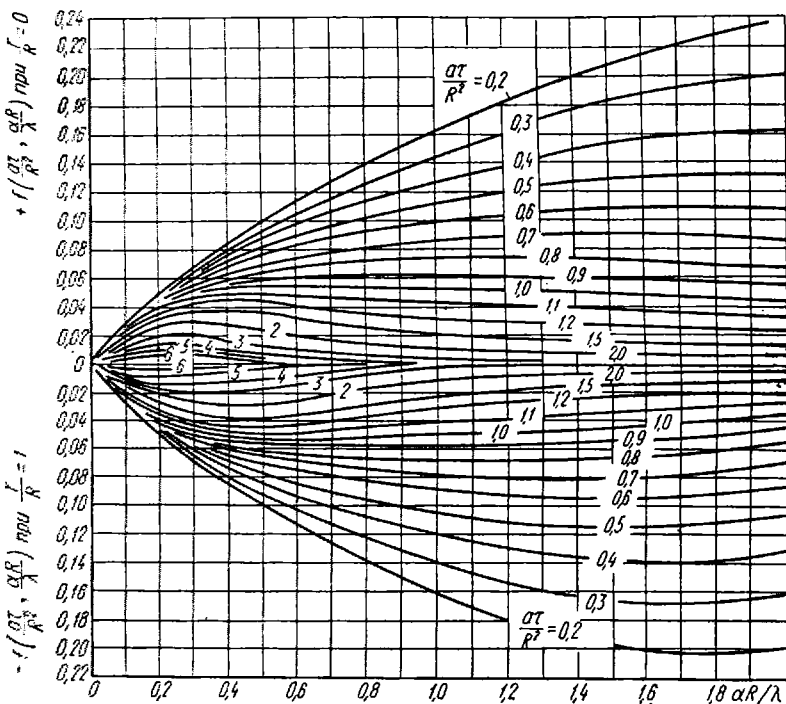


Рис. 21. График функции $f(\alpha\tau/R^2; \alpha R/\lambda)$ для осевых напряжений на поверхности и на оси цилиндра при постоянной температуре печи

осевые напряжения

$$\sigma_z = \frac{\alpha_1 E}{1 - \psi'} (t_{\text{печ}} - t_0) f_z. \quad (28-II)$$

Значения критериев определяют по рис. 18—21. По этим же рисункам определяют f_r, f_θ, f_z в зависимости от критериев $\alpha r/R^2$ и $\alpha R/\lambda$ при $r/R = 1$ и $r/R = 0$.

Осевые напряжения при других значениях r/R определяют по диаграмме рис. 22.

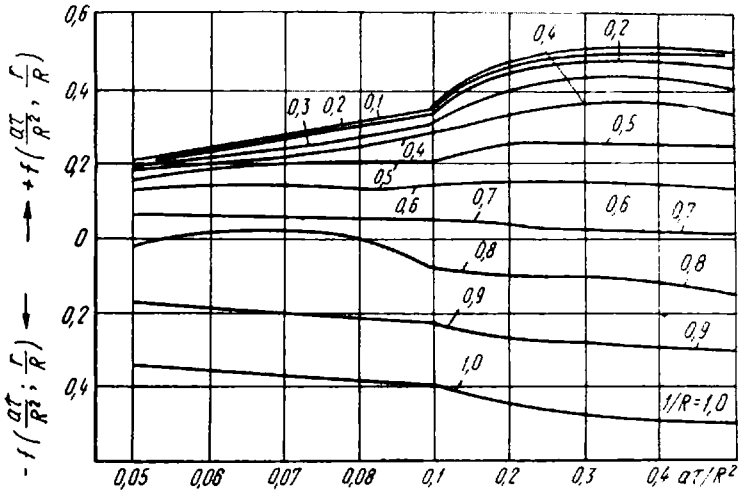


Рис. 22. График функции $f(\alpha r/R^2; \alpha R/\lambda)$ для осевых температурных напряжений в цилиндре при постоянном тепловом потоке

2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Определение температуры нагрева стали

Задача № 24. Определить предельную температуру нагрева слитка дозвлектоидной углеродистой стали 15 следующего химического состава, %: 0,13C; 0,25Si; 0,44Mn; 0,026S; 0,018P; 0,07Cr; 0,17Ni. Сталь принадлежит к перлитному классу, ее критические точки: $A_{c1} = 735^\circ \text{C}$; $A_{c3} = 863^\circ \text{C}$; $A_{r3} = 840^\circ \text{C}$; $A_{r1} = 685^\circ \text{C}$.

Решение. По диаграмме Fe—C (см. рис. 2) для стали заданного химического состава температура по линии солидуса $t_{\text{сол}} = 1460^\circ \text{C}$. По формуле (1-II) начальная предельная температура

$$t_{\text{н}} = t_{\text{сол}} - 200^\circ = 1460 - 200 = 1260^\circ \text{C}.$$

Результаты механических испытаний при высоких температурах показывают, что сталь 15 обладает наиболее высокой пластичностью в интервале $1200\text{—}1300^\circ \text{C}$ [12].

Задача № 25. Определить предельную температуру нагрева слитка из стали У7 следующего химического состава, %: 0,73 С, 0,27 Si, 0,25 Mn, 0,028 S, 0,015 P, 0,08 Cr, 0,25 Ni.

Дозэвтектоидная сталь У7 относится к перлитному классу, ее критические точки: $A_{c1} = 730^\circ \text{C}$; $A_{c3} = 770^\circ \text{C}$; $A_{r1} = 700^\circ \text{C}$ (в условиях медленного охлаждения).

Решение. По формуле (I-II)

$$t_{\text{сол}} = 1380^\circ \text{C};$$

$$t_{\text{н}} = t_{\text{сол}} - 160^\circ \text{C} = 1380 - 160 = 1220^\circ \text{C}.$$

Результаты механических испытаний [12] показали, что сталь У7 обладает хорошей пластичностью в интервале температур 700—1250°С.

Задача № 26. Определить предельную температуру нагрева слитка из стали У12 следующего химического состава, %: 1,17 С; 0,26 Si; 0,20 Mn; 0,020 S; 0,010 P; 0,19 Ni.

Заэвтектоидная сталь У12 относится к перлитному классу, ее критические точки: $A_{c1} = 730^\circ \text{C}$; $A_{c3} = 820^\circ \text{C}$; $A_{r1} = 700^\circ \text{C}$ (в условиях медленного охлаждения).

Решение. По формуле (I-II) $t_{\text{сол}} = 1330^\circ \text{C}$;

$$t_{\text{н}} = t_{\text{сол}} - 130^\circ \text{C} = 1330 - 130 = 1200^\circ \text{C}.$$

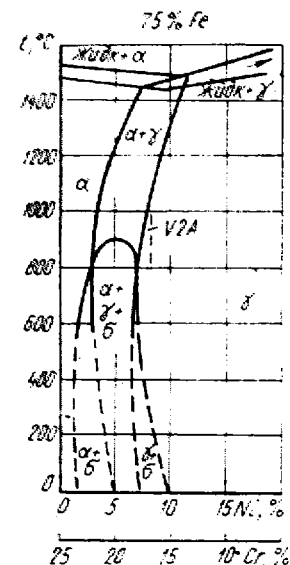


Рис. 23. Диаграмма состояния сплава Fe—Cr—Ni

На основании результатов механических испытаний [12] можно сделать вывод, что сталь У12 обладает хорошей пластичностью в интервале температур 900—1250°С.

Задача № 27. Определить предельную температуру нагрева слитка из стали 1Х21Н5Т.

Решение. Эта сталь двухфазная, нержавеющая феррито-аустенитного класса, которая, согласно рис. 23, имеет до температуры 840°С структуру $\alpha + \gamma + \sigma$, а в интервале температур 840—1200°С сохраняет двухфазную структуру $\alpha + \gamma$; в интервале 1200—1420°С сплав становится однофазным α . С 1420°С и выше сплав переходит в жидкую фазу. По данным работы [28], сталь 1Х21Н5Т имеет повышенные параметры пластичности в интервале температур 900—1200°С, а именно: $\delta = 95 \div 143\%$ и $\psi = 91,0 \div 78\%$.

Пластичность данной стали зависит от соотношения содержания феррита и аустенита. Максимальную пластичность сталь имеет при $\alpha/\gamma = 4$ ($\alpha = 80\%$, $\gamma = 20\%$; см. рис. 24 и 25).

Следовательно, температура нагрева слитков должна быть не ниже 1200 и не выше 1300°С.

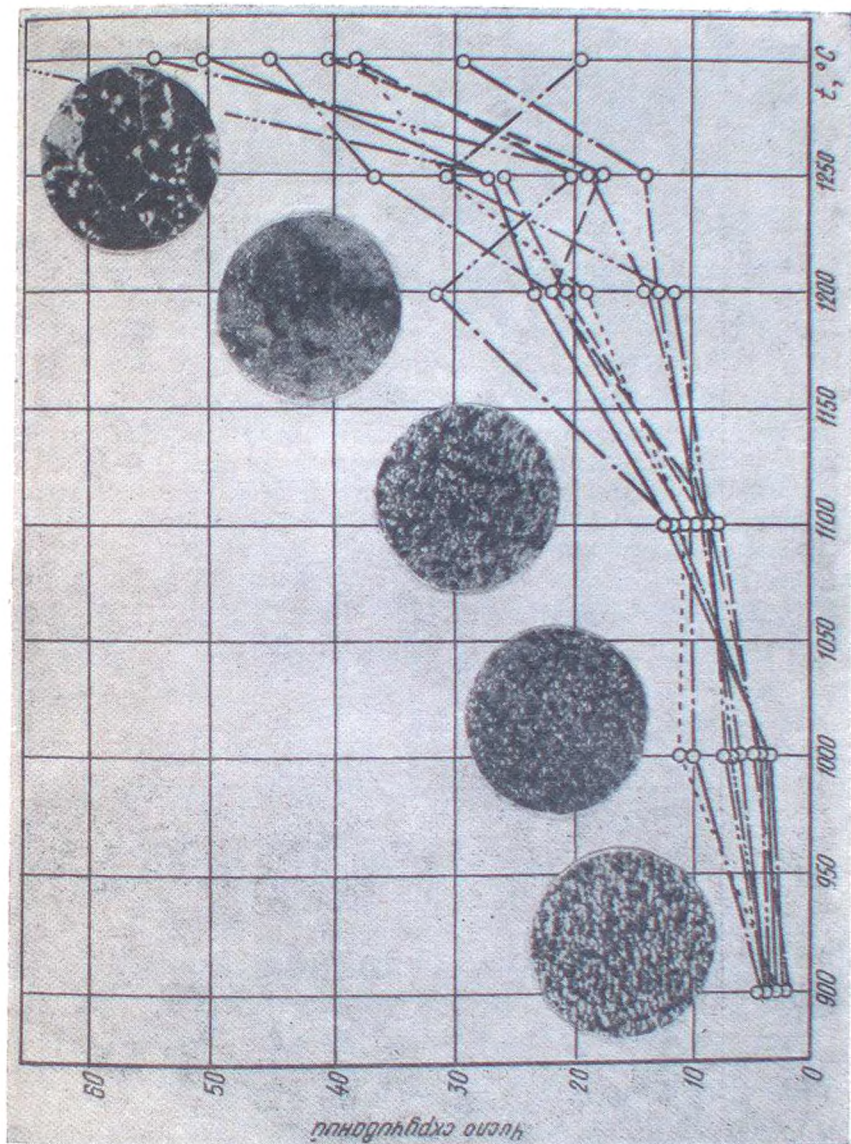


Рис. 24. Влияние температуры на число скрученной и микроструктуру образцов разных плавок при кручении
(по Шинь Р. Г.)

Более высокую температуру нагрева слитка принять нельзя, так как с повышением температуры нагрева наблюдается рост зерен феррита, резко понижаются механические свойства стали, она становится хрупкой (рис. 26).

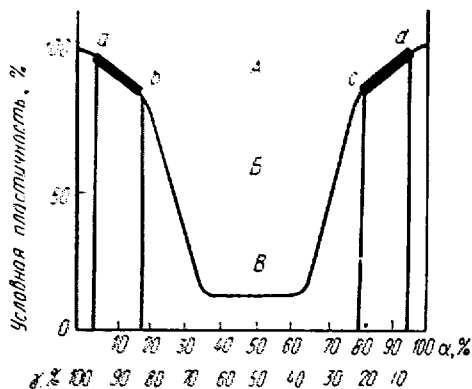


Рис. 25. Изменение пластических свойств нержавеющей стали в зависимости от соотношения аустенита γ и феррита α в металле (по данным А. А. Бабакова):

ab — структурная область сталей аустенито-ферритного класса при высоких температурах; *cd* — структурная область двухфазных сталей феррито-аустенитного класса при высоких температурах; *A* — область удовлетворительной пластичности; *B* — область пониженной пластичности; *B* — область плохой пластичности

Задача № 28. Заготовку круглого сечения диаметром 200 мм из мягкой углеродистой стали нагревают в печи при температуре газа $t_r = 1250^\circ \text{C}$. Начальная температура металла $t_0 = 0^\circ \text{C}$.

Определить температуру поверхности и середины заготовки, если металл в печи нагревают в течение $\tau = 30$ мин.

Решение. Физические параметры стали:

$$\lambda = 51,17 \text{ вт/(м} \cdot \text{град)} \times$$

$$\times [44 \text{ ккал/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град)}];$$

$$a = 0,0446 \text{ м}^2/\text{ч};$$

$$\alpha = 249,4 \text{ вт/(м}^2 \times$$

$$\times \text{град)} [215 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град)}];$$

$$\frac{\alpha S}{2\lambda} = \frac{249,4 \cdot 0,2}{2 \cdot 51,17} = \frac{215 \cdot 0,2}{2 \cdot 44} \approx 0,5;$$

$$\frac{4a\tau}{S^2} = \frac{4 \cdot 0,0446 \cdot 0,5}{0,2^2} = 2,23.$$

Из рис. 6 по значениям $\alpha S/2\lambda$ и $4a\tau/S^2$ находим, что $\frac{t_n - t_r}{t_0 - t_r} = 0,15$.

Тогда

$$\frac{t_n - 1250}{0 - 1250} = 0,15,$$

откуда

$$t_n = 0,15 (0 - 1250) + 1250 = 1080^\circ \text{C}.$$

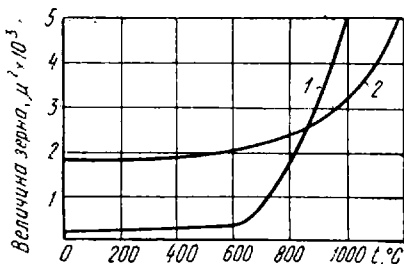


Рис. 26. Изменение величины зерна ферритных (1) и аустенитных (2) сталей в зависимости от температуры

Из рис. 7 находим, что

$$\frac{t_c - t_r}{t_0 - t_r} = 0,20,$$

тогда

$$\frac{t_c - 1250}{0 - 1250} = 0,20 \text{ или } t_c = 0,20(0 - 1250) + 1250 = 1000^\circ \text{ С.}$$

Следовательно, через 30 мин температура на поверхности заготовки будет $t_n = 1080^\circ \text{ С}$, а в центре $t_c = 1000^\circ \text{ С}$. Разность температур между поверхностью и центром будет $\Delta t = 1080 - 1000^\circ \text{ С} = 80^\circ \text{ С}$.

*Примеры решения задач
по определению продолжительности нагрева стали*

Задача № 29 [15]. Определить продолжительность нагрева слитков размерами $680 \times 680 \times 2000$ мм из стали 20 до температуры поверхности 1280° С . Начальная температура слитка 20° С .

Условия нагрева в рекуперативных колодах следующие:

1. Нагрев двухступенчатый: первый период — при постоянной тепловой мощности; второй период — при постоянной температуре печи.

2. Средние тепловые потоки и изменения теплосодержания металла¹: в первый период $\bar{q}_1 = 93,02 \text{ кВт/м}^2$ ($80\,000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$) и $\Delta i = 582,12 \text{ кДж/кг}$ ($138,6 \text{ ккал/кг}$); во второй период $\bar{q}_2 = 37,82 \text{ кВт/м}^2$ ($32\,600 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$) и $\Delta i_2 = 292,32 \text{ кДж/кг}$ ($69,6 \text{ ккал/кг}$).

Решение. Квадратное сечение слитка заменяют круглым равновеликой площади.

Радиус круга в этом случае равен

$$R = \sqrt{\frac{0,68 \cdot 0,68}{\pi}} = 0,384 \text{ м.}$$

Общую продолжительность нагрева слитка определяют по формуле (3-II):

$$\tau = \frac{R\rho}{2} \left(\frac{\Delta i_1}{\bar{q}_1} + \frac{\Delta i_2}{\bar{q}_2} \right),$$

где $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$.

$$\tau = \frac{0,384 \cdot 7800}{2} \left(\frac{138,6}{80\,000} + \frac{69,6}{32\,600} \right) = 5,79 \text{ ч.}$$

В единицах системы СИ ($1 \text{ Дж} = 2,78 \cdot 10^{-4} \text{ вт} \cdot \text{ч}$):

$$\tau = \frac{0,384 \cdot 7800}{2} \left(\frac{582\,120 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4}}{93\,020} + \frac{292\,320 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4}}{37\,820} \right) = 5,79 \text{ ч.}$$

¹ Средние тепловые потоки q и изменения теплосодержания металла Δi подсчитывают по методу Н. Ю. Гайца [6, 15].

Задача № 30. В нагревательных колодцах нагревают слиток стали с 0,7% С. Размеры слитка $680 \times 680 \times 2000$ мм. Начальная температура слитка 20°C ; $\rho = 7750 \text{ кг/м}^3$.

Определить продолжительность нагрева слитка (по периодам). Нагрев трехступенчатый.

Первый период — с ограниченной скоростью до 500°C в середине; второй период — при постоянном возрастании тепловой мощности; третий период — при постоянной температуре печи.

Определить время нагрева слитка до конечной температуры поверхности $t_{\text{к.п}} = 1250^\circ \text{C}$.

Решение. Полную продолжительность нагрева слитка определяют по формуле (4-11), в которой $k = 1$ для квадратного сечения:

$$\tau = \frac{R\rho}{2} \left(\frac{\Delta i_1}{\bar{q}_1} + \frac{\Delta i_2}{\bar{q}_2} + \frac{\Delta i_3}{\bar{q}_3} \right).$$

Известно, что: $\Delta i_1 = 352,00 \text{ кдж/кг}$ ($83,9 \text{ ккал/кг}$); $\Delta i_2 = 223,00 \text{ кдж/кг}$ ($53,2 \text{ ккал/кг}$); $\Delta i_3 = 261,4 \text{ кдж/кг}$ ($62,4 \text{ ккал/кг}$); $\bar{q}_1 = 36,19 \text{ кВт/м}^2$ ($31\,200 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$); $\bar{q}_2 = 48,72 \text{ кВт/м}^2$ ($42\,000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$); $\bar{q}_3 = 26,91 \text{ кВт/м}^2$ ($23\,200 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$).

Тогда

$$\tau = \frac{0,384 \cdot 7750}{2} \left(\frac{352\,000 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4}}{36\,190} + \frac{223\,000 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4}}{48\,720} + \frac{261\,400 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4}}{26\,900} \right) = 9,8 \text{ ч.}$$

По формулам (4-11) определяем: $\tau_1 = 3,97 \text{ ч}$; $\tau_2 = 1,89 \text{ ч}$; $\tau_3 = 4 \text{ ч}$, тогда:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 3,97 + 1,89 + 4,0 = 9,86 \text{ ч.}$$

Задача № 31 [15]. Определить продолжительность нагрева слитка углеродистой стали с содержанием 0,3% С при горячем посяде в ячейки рекуперативных колодцев. Размеры слитка $690 \times 600 \times 1800$ мм.

Начальная температура поверхности слитка $t_n = 850^\circ \text{C}$, конечная $t_{\text{к.п}} = 1250^\circ \text{C}$ при перепаде $\Delta t = 50^\circ \text{C}$. Температура воздуха $t_a = 20^\circ \text{C}$.

При решении принимают следующие конечные результаты теплотехнических расчетов, выполненных Н. Ю. Тайцем применительно к условиям данной задачи [15]:

1) тепловой поток охлаждения $q_0 = 86,65 \text{ кВт/м}^2$ ($74\,700 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$)

$$q_0 = \alpha_0 (t_n - t_a) = \frac{90 \cdot (850 - 20)}{860} = 86,65 \text{ кВт/м}^2 \text{ (} 74\,700 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч)},$$

где α_0 — коэффициент теплоотдачи охлаждения находится по графику рис. 27;

2) тепловой поток первого периода нагрева $q_1 = 63,8 \text{ кВт/м}^2$ ($5500 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$);

3) тепловой поток второго периода $q_2 = 12,6 \text{ кВт/м}^2$ ($10\,800 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$);

4) начальная температура середины слитка $t_c^0 = 1200^\circ \text{C}$;

5) средняя температура в начале посадки $t_n = 1025^\circ \text{C}$;

6) температура поверхности слитка в первом периоде $t_{п1} = 1115^\circ \text{C}$.

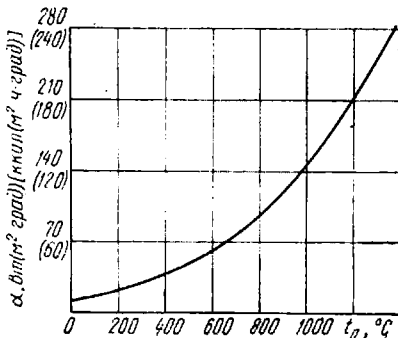


Рис. 27. Изменение коэффициента теплоотдачи при охлаждении тела на воздухе

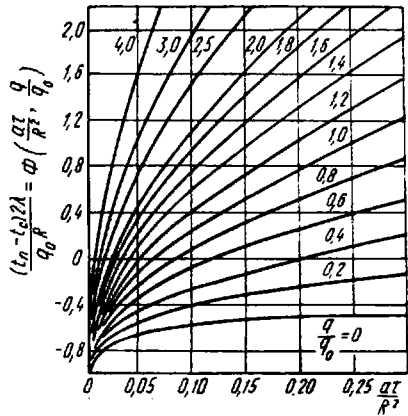


Рис. 28. Относительная температура $(t_n - t_{cp}) \frac{2\lambda}{q_0 R} = \Phi \left(\frac{a\tau}{R^2}; \frac{q}{q_0} \right)$ поверхности цилиндра при постоянном тепловом потоке и при наличии температурного градиента в начальный момент

Решение. 1. Расчетный радиус слитка:

$$R = \sqrt{\frac{0,69 \cdot 0,60 + 0,595 \cdot 0,505}{2\pi}} = 0,338 \text{ м.}$$

2. Продолжительность первого периода нагрева слитка:

а) $\frac{q_1}{q_0} = \frac{63,8}{86,65} = 0,735$;

б) $\frac{(t_n - t_c) 2\lambda}{q_0 R} = \frac{(1388 - 1473) \cdot 2 \cdot 41,7}{86,65 \cdot 1000 \cdot 0,338} = \frac{-7089}{29\,287} = -0,244$;

где $\lambda = 41,7 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$ ($36,3 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ \text{C}$) для углеродистой стали при 1000°C ;

в) из рис. 28 по полученным данным определяем:

$$\frac{a\tau_1}{R^2} = 0,04,$$

тогда

$$\tau_1 = \frac{0,04R^2}{a} = \frac{0,04 \cdot 0,338^2}{0,028} = 0,163 \text{ ч},$$

где $a = 0,028 \text{ м}^2/\text{ч}$ — коэффициент температуропроводности.

3. Температуру оси слитка t_{oc} по данным q_1/q_0 и $a\tau_1/R^2$ определяем из рис. 29: $\Phi = -0,2$, откуда

$$t_{o.c} = t_c - \Phi \frac{q_0 R}{2\lambda} = 1200 - 0,2 \frac{86650 \cdot 0,338}{2 \cdot 41,7} = 1130^\circ \text{С}.$$

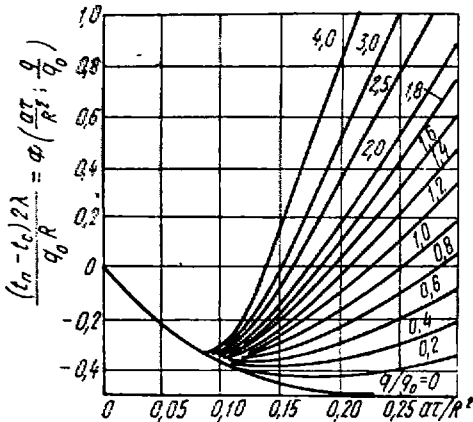


Рис. 29. Относительная температура $(t_{cp} - t_0) \times \frac{2\lambda}{q_0 R} = \Phi\left(\frac{\sigma\tau}{R^2}; \frac{q}{q_0}\right)$ по оси цилиндра при постоянном тепловом потоке и при наличии температурного градиента в начальный момент

4. Средняя температура слитка

$$\bar{t}_1 = \bar{t}_n + \frac{2q_1\tau_1}{R\rho c_p} = 1025 + \frac{2 \cdot 63800 \cdot 0,163}{0,338 \cdot 7500 \cdot 695 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4}} = 1067^\circ \text{С},$$

где $c_p = 695 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$ ($167 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$).

5. Теплосодержание i_1 находят по табл. 16; при $\bar{t}_1 = 1067^\circ \text{С}$ $i_1 = 745,8 \text{ кДж/кг}$ (178 ккал/кг).

6. $\Delta i_2 = i_2 - i_1 = 860,19 - 745,8 = 114,39 \text{ кДж/кг}$ ($27,3 \text{ ккал/кг}$), где i_2 находится из табл. 16 по средней температуре второго периода нагрева слитков, равной

$$t_2 = t_{n2} - \frac{1}{2} \Delta t_2 = 1250 - \frac{1}{2} 50 = 1225^\circ \text{С}.$$

7. Средний тепловой поток:

$$\bar{q}_2 = \frac{q_1 - q_2}{\ln \frac{q_1}{q_2}} = \frac{63,8 - 12,6}{\ln \frac{63,8}{12,6}} = 31,0 \text{ кВт/м}^2 \text{ (27 000 ккал/м}^2 \cdot \text{ч)}.$$

8. Продолжительность нагрева за второй период

$$\tau_2 = \frac{\Delta i_2 R \rho}{2q_2} = \frac{114390 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4} \cdot 0,338 \cdot 7500}{2 \cdot 31000} = 1,28 \text{ ч}.$$

9. Общая продолжительность нагрева

$$\tau = 0,163 + 1,28 = 1,443 \text{ ч}.$$

Задача № 32 [6]. Определить продолжительность нагрева заготовки из стали Ст.3 квадратного сечения размерами $140 \times 140 \text{ мм}$, длиной $1,45 \text{ м}$ до конечной температуры поверхности

Теплосодержание чистого железа и углеродистых сталей, кДж/кг (ккал/кг) [15]

Температура, °С	Чистое железо	Сталь с содержанием углерода, %										
		0,090	0,234	0,30	0,540	0,610	0,795	0,920	0,994	1,235	1,410	1,575
100	11,1	46,5 (11,1)	46,5 (11,1)	47 (11,2)	47,4 (11,3)	47,8 (11,4)	48,2 (11,5)	50,3 (12,0)	48,6 (11,6)	49,5 (11,8)	48,6 (11,6)	50,2 (12,0)
200	23,4	95,5 (22,8)	95,8 (22,9)	95,8 (22,9)	95,8 (22,9)	96,3 (23,0)	96,7 (23,1)	100 (24,0)	99 (23,7)	100 (23,7)	100 (23,9)	101 (24,1)
300	36,6	148 (35,4)	150 (35,8)	151 (36,0)	152 (36,2)	153 (36,5)	155 (36,9)	156 (37,2)	155 (36,0)	155 (37,0)	155 (36,9)	157 (37,5)
400	57,2	205 (49,0)	206 (49,2)	206 (49,3)	209 (49,9)	210 (50,1)	210 (50,2)	214 (51,0)	211 (50,4)	213 (50,9)	211 (50,3)	214 (51,1)
500	67,0	265 (63,4)	266 (63,7)	267 (63,9)	268 (64,1)	269 (64,3)	271 (64,8)	275 (65,9)	272 (65,0)	274 (65,5)	272 (65,0)	277 (66,1)
600	85,2	339 (81,0)	340 (81,2)	341 (81,4)	343 (82,0)	344 (82,1)	344 (82,3)	349 (83,5)	346 (82,7)	347 (83,0)	345 (82,5)	351 (83,9)
700	100,07	419 (100,1)	420 (100,2)	421 (100,5)	423 (101,0)	424 (101,2)	425 (101,4)	427 (102,1)	423 (101,0)	428 (102,2)	426 (101,6)	431 (103,0)
800	120,62	531 (127,0)	543 (129,6)	550 (131,5)	546 (130,8)	542 (129,5)	550 (131,4)	550 (131,4)	543 (130,0)	547 (131,0)	543 (130,0)	554 (132,3)
900	139,50	628 (150,3)	630 (150,8)	627 (150,0)	620 (148,1)	618 (147,3)	610 (145,9)	603 (144,0)	604 (144,5)	603 (144,0)	605 (144,7)	612 (146,6)
1000	161,27	705 (168,3)	700 (167,6)	698 (166,9)	688 (164,6)	686 (164,0)	678 (162,2)	654 (156,1)	670 (160,2)	660 (157,9)	673 (160,8)	669 (160,0)
1100	177,75	780 (186,5)	772 (184,5)	767 (183,5)	760 (181,7)	756 (180,9)	750 (179,0)	724 (173,1)	740 (177,0)	728 (174,9)	744 (177,9)	720 (172,0)
1200	194,77	850 (203,1)	842 (201,7)	840 (201,0)	835 (198,6)	832 (198,0)	778 (186,1)	790 (189,0)	804 (192,1)	795 (190,0)	813 (194,2)	783 (187,0)
1250	—	885 (211,5)	878 (210,2)	875 (209,6)	867 (207,5)	864 (206,9)	855 (204,5)	824 (197,0)	840 (201,0)	833 (199,0)	848 (202,9)	816 (195,3)

заготовки $t_{п.н} = 1250^\circ \text{C}$ в методической двухрядной печи, работающей по двухзонному температурному режиму. Производительность печи $G = 55 \text{ т/ч}$; начальная температура поверхности заготовки $t_n = 0^\circ \text{C}$, конечный перепад температур по сечению заготовки $\Delta t_k = 40^\circ \text{C}$.

Решение. 1. Общее время нагрева

$$\tau_{\text{общ}} = \frac{F_{\text{акт}} 2S\rho}{G} = \frac{78,5 \cdot 0,14 \cdot 7800}{55000} = 1,56 \text{ ч.}$$

где $F_{\text{акт}}$ площадь активного пода печи, равная:

$$F_{\text{акт}} = \frac{G}{H} = \frac{55000}{700} = 78,5 \text{ м}^2;$$

$2S = 140 \text{ мм}$ — толщина заготовки;

$H = 700 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$ — напряженность активного пода печи.

2. Время нагрева металла в томильной печи с монолитным подом

$$\tau_3 = \frac{L_{\text{св}} 2S\rho n}{G} = \frac{4,5 \cdot 0,14 \cdot 1,45 \cdot 7800 \cdot 2}{55000} = 0,26 \text{ ч.}$$

где $n = 2$ — число заготовок по ширине печи.

3. Время нагрева металла в сварочной зоне с двусторонним нагревом:

$$\tau_2 = \frac{\Delta i_2 S \rho}{k_1 \bar{q}_2} = \frac{470000 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4} \cdot 0,07 \cdot 7800}{1 \cdot 92600} = 0,77 \text{ ч.}$$

Расчет изменения теплосодержания Δi_2 и среднего теплового потока \bar{q}_2 приведен в работе Н. Ю. Тайца и Ю. Н. Розенгарта [6].

4. Время нагрева в методической зоне

$$\tau_1 = \tau - (\tau_2 + \tau_3) = 1,56 - (0,26 + 0,77) = 0,535 \text{ ч.}$$

Задача № 33 [15]. Определить продолжительность нагрева круглых слитков диаметром 412 мм и высотой 1800 мм из стали марки D до $t_{п.к} = 1280^\circ \text{C}$ при следующих условиях: начальная температура металла $t_n = 20^\circ \text{C}$, конечная разность температур $\Delta t_k = 60^\circ \text{C}$, производительность печи $G = 35 \text{ т/ч}$.

Изменения теплосодержания: в методической зоне $\Delta i_1 = 388,92 \text{ кДж/кг}$ (92,6 ккал/ч), в сварочной зоне $\Delta i_2 = 491,4 \text{ кДж/кг}$ (117 ккал/ч).

Средние тепловые потоки: в методической зоне $\bar{q}_1 = 66,81 \text{ кВт/м}^2$ (57 600 ккал/м²·ч) в сварочной зоне $\bar{q}_2 = 48,95 \text{ кВт/м}^2$ (42 200 ккал/м²·ч).

Значения Δi_1 , Δi_2 , \bar{q}_1 и \bar{q}_2 приняты по данным Н. Ю. Тайца [15].

Решение. 1. Продолжительность нагрева в методической зоне при одностороннем нагреве

$$\tau_1 = \frac{\Delta i_1 2R\rho}{k_1 \bar{q}_1} = \frac{388\,920 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 0,206 \cdot 7500}{2 \cdot 66\,810} = 2,5 \text{ ч.}$$

2. Продолжительность нагрева в сварочной зоне

$$\tau_2 = \frac{\Delta i_2 2R\mu\rho}{k_1 \bar{q}_2} = \frac{491\,400 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 0,206 \cdot 0,75 \cdot 7500}{2 \cdot 48\,950} = 3,2 \text{ ч.}$$

где $\mu = 0,75$ коэффициент несимметричности нагрева.

3. Общая продолжительность нагрева

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_1 + \tau_2 = 2,48 + 3,22 = 5,70 \text{ ч.}$$

4. Удельная продолжительность нагрева

$$t = \frac{60\tau_{\text{общ}}}{2R} = \frac{5,70 \cdot 60}{2 \cdot 20,6} = 8,3 \text{ мин/см.}$$

Задача № 34 [15]. Определить продолжительность нагрева в кольцевой печи заготовки диаметром $d = 250 \text{ мм}$, длиной $5,0 \text{ м}$ из стали марки Д до $t_{\text{п.к}} = 1250^\circ \text{С}$ при $\Delta t_{\text{к}} = 30^\circ \text{С}$, исходя из следующих данных $\Delta i_1 = 505,68 \text{ кДж/кг}$ ($120,4 \text{ ккал/кг}$); $\Delta i_2 = 363,72 \text{ кДж/кг}$ ($86,6 \text{ ккал/кг}$); $\bar{q}_1 = 51 \text{ кВт/м}^2$ ($44\,000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$); $\bar{q}_2 = 49,3 \text{ кВт/м}^2$ ($42\,500 \text{ ккал/м}^2$); $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$.

Решение. 1. Время нагрева в методической зоне

$$\tau_1 = \frac{\Delta i_1 1,1R\rho}{k_1 \bar{q}_1} = \frac{505\,680 \cdot 1,1 \cdot 0,125 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4} \cdot 7800}{2 \cdot 51\,000} = 1,78 \text{ ч.}$$

2. Продолжительность нагрева в сварочной зоне

$$\tau_2 = \frac{\Delta i_{\text{свар}} 1,1R\rho}{k_1 \bar{q}_2} = \frac{363\,720 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4} \cdot 1,1 \cdot 0,125 \cdot 7800}{2 \cdot 48\,300} = 1,1 \text{ ч.}$$

где $R_{\text{расч}} = 2\mu R = 2 \cdot 0,54R \approx 1,1R$ — расчетный радиус с учетом коэффициента несимметричности нагрева $\mu = 0,54$ (по данным Н. Ю. Тайца).

3. Полная продолжительность нагрева

$$\tau = 1,47 + 1,1 = 2,57 \text{ ч.}$$

4. Удельная продолжительность нагрева

$$z = \frac{2,57 \cdot 60}{25} = 6,17 \text{ мин/см.}$$

Задача № 35 [16]. Металл круглого сечения диаметром 200 мм из мягкой углеродистой стали находится в печи с температурой $t_{\text{п}} = 1250^\circ \text{С}$. Определить, сколько потребуется времени, чтобы поверхность заготовки нагрелась до 1000°С . Начальная температура металла 0°С .

Решение (по методике Л. М. Мариенбаха).

1. Находят физические параметры, приведенные в табл. 17.

Физические параметры

t, °C	λ		c _p		ρ, кг/м ³	α = $\frac{\lambda}{c_p \rho}$, м ² /ч
	$\frac{вт}{м \cdot град}$	$\frac{(ккал)}{м \cdot ч \cdot град}$	$\frac{кдж}{кг \cdot град}$	$\frac{ккал}{кг \cdot град}$		
0	60,48	52	0,46	0,110	7850	0,0596
1000	41,87	36	0,68	0,163	7530	0,0297
Средняя	51,18	44	—	—	—	0,0446

2. Коэффициент теплопередачи определяют по эмпирической формуле Шака с поправкой Хейлингенштедта:

$$\begin{aligned} \alpha &= 50 + 0,3 (t_r - 700^\circ \text{C}) = \\ &= 50 + 0,3 (1250^\circ \text{C} - 700^\circ \text{C}) = \\ &= 250,1 \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град} \text{ (215 ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град)}. \end{aligned}$$

3. Критерий:

$$\begin{aligned} \frac{\alpha S}{2\lambda} &= \frac{250,1 \cdot 0,2}{2 \cdot 51,18} = 0,5; \\ \frac{t_n - t_r}{t_0 - t_r} &= \frac{1000 - 1250}{0 - 1250} = 0,2. \end{aligned}$$

4. По графику Шака (см. рис. 6) находят, что точка пересечения осей (0,50; 0,2) попадает на кривую $\frac{4\alpha\tau}{S^2} = 2$.

5. Из уравнения

$$\frac{4\alpha\tau}{S^2} = \frac{4 \cdot 0,0446\tau}{0,2^2} = 2$$

находят, что $\tau = 0,45 \text{ ч} = 27 \text{ мин}$, откуда

$$z = \frac{27}{20} = 1,35 \text{ мин/см.}$$

Таким образом через 27 мин поверхность заготовки нагревается до 1000° С.

Задача № 36 [19]. Определить продолжительность нагрева углеродистой заготовки квадратного сечения размерами 120 × 120 × 1350 мм до температуры поверхности металла $t_{\text{пов}} = 1250^\circ \text{C}$ по следующим данным: печь двухрядная; активная длина печи $l_{\text{акт}} = 26,4 \text{ м}$; длина подогревательной камеры $l_{\text{под}} = 13,8 \text{ м}$; длина сварочной камеры $l_{\text{св}} = 6,8 \text{ м}$; длина томильной камеры $l_{\text{том}} = 5,8 \text{ м}$; производительность печи $G = 36 \text{ 500 кг/ч}$.

Решение (по методике Н. М. Ицковича).

1. Единовременная загрузка печи

$$G_{\text{печ}} = 2 l_{\text{заг}} S \rho l_{\text{акт}} = 2 \cdot 1,35 \cdot 0,12 \cdot 7800 \cdot 26,4 = 67 \text{ 000 кг.}$$

2. При $G = 36\,500$ кг/ч время нагрева составит

$$\tau_{\text{общ}} = \frac{G_{\text{печь}}}{G} = \frac{67\,000}{36\,500} = 1,85 \text{ ч.}$$

3. Продолжительность нагрева металла в каждой зоне печи равна:

$$\tau_{\text{под}} = \tau \frac{l_{\text{под}}}{l_{\text{акт}}} = 1,85 \frac{13,8}{26,4} = 0,965 \text{ ч;}$$

$$\tau_{\text{св}} = \tau \frac{l_{\text{свар}}}{l_{\text{акт}}} = 1,85 \frac{6,8}{26,2} = 0,475 \text{ ч;}$$

$$\tau_{\text{том}} = \tau \frac{l_{\text{том}}}{l_{\text{акт}}} = 1,85 \frac{5,8}{26,4} = 0,410 \text{ ч;}$$

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_{\text{под}} + \tau_{\text{св}} + \tau_{\text{том}} = \\ &= 0,965 + 0,475 + 0,410 = 1,85 \text{ ч.} \end{aligned}$$

4. Удельная продолжительность или скорость нагрева

$$z = \frac{1,85 \cdot 60}{12} = 9,25 \text{ мин/см.}$$

Задача № 37 [19]. При условиях нагрева, приведенных в задаче № 36, определить продолжительность нагрева углеродистой заготовки квадратного сечения размерами $120 \times 120 \times 1350$ мм с учетом перечисленных ниже данных.

Приращение теплосодержания металла: в подогревательной камере $\Delta i_{\text{под}} = 327,6$ кДж/кг (78 ккал/кг); в сварочной камере $\Delta i_{\text{свар}} = 424,2$ кДж/кг (101 ккал/кг); в томильной камере $\Delta i_{\text{том}} = 71,4$ кДж/кг (17 ккал/кг). Температура уходящих газов $T_{\text{уход}} = 800^\circ \text{C}$. Разность температур по сечению заготовки: в подогревательной зоне $\Delta t_1 = 78^\circ \text{C}$; в сварочной зоне $\Delta t_2 = 170^\circ \text{C}$; в томильной зоне $\Delta t_3 = 27^\circ \text{C}$.

Определим продолжительность нагрева заготовки в каждой зоне печи по формулам (7-II):

$$\begin{aligned} \tau_{\text{под}} &= \frac{287 \Delta i_{\text{под}} S \sqrt{S}}{\left(\frac{T_{\text{уход}}}{100}\right)^2 V \Delta t_1} = \\ &= \frac{287 \cdot 327\,600 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4} \cdot 0,12 \sqrt{0,12}}{(10,73)^2 \sqrt{78}} = 0,93 \text{ ч;} \\ \tau_{\text{свар}} &= \frac{35,6 \Delta i_{\text{св}} S^2}{V \Delta t_1 \cdot \Delta t_2} = \frac{35,6 \cdot 424\,200 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4} \cdot 0,12^2}{\sqrt{78 \cdot 170}} = 0,46 \text{ ч;} \\ \tau_{\text{том}} &= \frac{112,5 \Delta i_{\text{том}} S^2}{V \Delta t_2 \cdot \Delta t_3} = \frac{112,5 \cdot 71\,400 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4} \cdot 0,12^2}{\sqrt{170 \cdot 27}} = 0,41 \text{ ч.} \end{aligned}$$

Общая продолжительность нагрева $\tau = 0,93 + 0,46 + 0,41 = 1,80$ ч, т. е. хорошо согласуется с величиной, полученной в задаче № 36.

Метод определения Δi и Δt достаточно подробно изложен в работе [19].

*Определение времени нагрева
по полуэмпирическим формулам*

Задача № 38. Определить продолжительность нагрева в нагревательных колодцах слитка углеродистой стали содержанием $C = 0,3\%$ и размерами: $\frac{690 \times 600}{595 \times 505} \times 1800$ мм, если температура слитка при посадке в колодцы равна $t = 850^\circ \text{C}$.

Решение. Продолжительность нагрева слитка до температуры прокатки определяем по формуле (14-II):

$$\begin{aligned}\tau &= kS - 0,006 (t - 200^\circ \text{C}) = \\ &= 0,1 \cdot 69 - 0,006 (850^\circ \text{C} - 200^\circ \text{C}) = 3 \text{ ч.}\end{aligned}$$

Задача № 39. Определить продолжительность нагрева стального слитка размерами $680 \times 680 \times 2000$ с $0,7\%$ С до температуры прокатки. Слиток сажают в печь при $t_0 = 20^\circ \text{C}$.

Решение. По формуле Н. Ю. Тайца (10-II) время нагрева слитка

$$\begin{aligned}\tau &= (7,5 + 0,05S) S = (7,5 + 0,05 \cdot 68) \cdot 68 = \\ &= 741,2 \text{ мин} = 12,35 \text{ ч.}\end{aligned}$$

Удельная продолжительность нагрева

$$z = \frac{12,35 \cdot 60}{68} = 10,9 \text{ мин/см.}$$

По формуле Н. Н. Доброхотова (8-II):

$$\tau = kD \sqrt{D} = 20 \cdot 0,68 \sqrt{0,68} = 11,2 \text{ ч;}$$

$$z = \frac{11,2 \cdot 60}{62} = 9,8 \text{ мин/см.}$$

Задача № 40. Определить по формулам (12-II) и (9-II) продолжительность нагрева заготовки квадратного сечения 140×140 мм длиной $l = 1,45$ м из Ст.3 в условиях, приведенных в задаче № 32.

Решение. Время нагрева по формуле Ю. М. Чижикова (12-II)

$$\tau = kS = 0,1 \cdot 14 = 1,4 \text{ ч.}$$

По формуле Н. Н. Доброхотова (9-II)

$$\tau = \alpha k_1 D \sqrt{D} = 2 \cdot 12,5 \cdot 0,14 \sqrt{0,14} = 1,3 \text{ ч}$$

(при двустороннем нагреве).

В табл. 18 [3] приведены режимы нагрева слитков и заготовок разных размеров, оправдавших себя на практике.

Таблица 18

**Рекомендуемый режим нагрева слитков и заготовок
из углеродистых и легированных сталей [3]**

Группа	Тип стали	Сталь	Температура нагрева, °С	Удельная продолжительность нагрева, мин/см			
				Заготовка квадратная со стороны, мм		Сторона (диаметр) слитка	
				50—150	> 150	до 350 мм (< 1 т)	более 350 мм (> 1 т)
I	Технически чистое железо	—	1300—1320	Не ограничена			
II	Углеродистая и низколегированная (до 0,25% С)	08—25, 15А—25А, 15Г, 20Г, 15Х, 20Х, 10Г2, 15ХГ, 20ХГ, 15ХФ, 15ХМ, 20ХГСА	1220—1240	5,0	6,0	7,5	10,0
III	Углеродистая и низколегированная (до 0,45% С)	30—40, 30Г—40Г, 30Г2, 45Г2, 30Х—40Х, 40ХГ, 35ХМ	1200—1220	5,0	6,0	7,5	10,0
IV	Углеродистая, низко- и среднелегированная (до 0,65% С)	50—60, 50Г, 65Г, 50Г2, 50Х, 50ХГ, 55СГ, ШХ10, 55С2, 60С2, 50ХФА, 30ХГ3, 25ХНВА, 35ХГСА	1180—1200	6,0	7,5	10,0	12,5
V	Углеродистая и среднелегированная (до 0,9% С)	У7, У8, 70—85, У7А, 70Г, У8ГА и т. д.	1140—1160	6,0	7,5	10,0	12,5
VI	Углеродистая и легированная инструментальная и шарикоподшипниковая	У9, У10, У10А, 7Х3, 9ХС, ХВГ, В1, Х, ШХ6—ШХ15, 6Х2—ЕХ3	1120—1140	7,5	10,0	12,5	15
VII	Углеродистая и легированная инструментальная и высокомарганцевая	У12, У13, У12Г, ХГ, Х12, Х12М, ХВ5	1100—1120	7,5	10,0	12,5	15
VIII	Нихромы и нержавеющие	Х15Н60, Х18Н10Т, 2Х18Н9Т, Р9, Р18	1200—1220	10	12,5	12,5	15
IX	Быстрорежущие		1180—1200	15	17,5	20	20

*Определение температурных напряжений в стали
при мгновенном изменении температуры поверхности*

Задачу можно решить с помощью уравнения Н. Ю. Тайца [15], представленного им в критериальном виде [см. формулу (16-II)]:

$$\frac{\sigma (1 - \psi')}{E} \cdot \frac{1}{\alpha_1 (t_0 - t_n)} = f \left(\frac{\alpha \tau}{S^2}; \frac{x}{S} \right).$$

Задача № 41 [15]. Стальная плита толщиной $2S = 200$ мм посажена в нагревательную печь при 500°C . Найти распределение температурных напряжений в плите через 9 мин после посадки, если в начальный момент температура по всему сечению плиты была 20°C и никаких остаточных напряжений в ней не было.

Решение. Имеем:

$$S = 0,1 \text{ м}; t_0 = 20^\circ \text{C}; t_n = 500^\circ \text{C}; \tau = 0,15 \text{ ч}; \psi' = 0,3.$$

Принимаем: $a = \frac{\lambda}{c_p \rho} = 0,025 \text{ м}^2/\text{ч}$; $\alpha_1 = 12 \cdot 10^{-6}$; $E = 18 \times 10^4 \text{ Мн/м}^2$ ($18 \cdot 10^3 \text{ кг/мм}^2$).

1. Вычисляем критерий

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{S^2} = \frac{0,026 \cdot 0,15}{0,10^2} = 0,38.$$

2. Для $x/S = 1$, $f(0,38; 1,0) = 0,32$ (см. рис. 10).

$$3. \sigma_y = \sigma_z = \frac{E \alpha_1}{1 - \psi'} (t_0 - t_n) \cdot f \left(\frac{\alpha \tau}{S^2}; \frac{x}{S} \right) = \\ = \frac{18 \cdot 10^4 \cdot 12 \cdot 10^{-6}}{1 - 0,3} (20 - 500) \cdot 0,32 \approx 474 \text{ Мн/м}^2 (47,4 \text{ кг/мм}^2).$$

4. Для остальных значений x/S напряжения определяем тем же методом:

x/S	0,8	0,6	0,4	0,2	0,0
Напряжение, Мн/м^2 (кг/мм^2)	-252 (-25,2)	-30 (-3,0)	119 (11,9)	222 (22,2)	266 (26,6)

Распределение температурных напряжений приведено на рис. 9.

*Определение напряжений
при линейном изменении температуры поверхности*

При решении таких задач пользуются уравнениями Н. Ю. Тайца (17-II) и (18-II) [15].

Задача № 42 [15]. Стальную плиту толщиной $2S = 300$ мм нагревают в печи с двух сторон с равномерной скоростью 400 град/ч .

Вычислить и построить график изменения температурных напряжений в процессе нагрева, если в начальный момент температура равна нулю и никаких напряжений в теле не было.

Решение. Имеем: $S = 0,15$ м; $C = 400$ град/ч; $a = 0,02$ м²/ч; $\alpha_1 = 11 \cdot 10^{-6}$; $E = 18 \cdot 10^4$ Мн/м² ($18 \cdot 10^3$ кг/мм²); $\psi' = 0,3$.
Для $\tau = 0,1$ ч и $x/S = 1$

$$\frac{a\tau}{S^2} = \frac{0,02 \cdot 0,1}{0,15^2} = 0,089.$$

По рис. 11 находим значение функции $f(0,089; 1)$, равное 0,264. По формуле (19-11) напряжение

$$\begin{aligned} \sigma_y = \sigma_z &= \frac{11 \cdot 10^{-6} \cdot 18 \cdot 10^4}{1,0 - 0,3} \cdot \frac{400 \cdot 0,15^2}{0,020} \left[\frac{1}{6} (1 - 3) + 0,264 \right] = \\ &= -87,8 \text{ Мн/м}^2 \text{ (} -8,78 \text{ кг/мм}^2 \text{)}. \end{aligned}$$

Результаты расчетов для остальных промежутков времени и для других сечений приведены в табл. 15 и на рис. 12.

Задача № 43 [15]. Температура поверхности стальной плиты толщиной 400 мм при ее нагреве изменяется по графику, изображенному на рис. 15.

Найти распределение напряжений по сечению плиты и момент времени, соответствующие точке C , если в начале нагрева температурный градиент и температурные напряжения отсутствуют.

Решение. Принято: $a = 0,025$ м²/ч; $\alpha_1 = 11,6 \cdot 10^{-6}$; $E = 17,5 \cdot 10^4$ Мн/м² ($17,5 \cdot 10^3$ кг/мм²); $\psi' = 0,3$; $\Delta t = 0$.

Температурную кривую рис. 15 разбивают на прямолинейные участки $0a$, ab и bc и определяют:

1) $\tau_1 = 0,5$ ч, $\tau_2 = 1$ ч, $\tau_3 = 0,75$ ч;

2) $C_1 = \frac{150}{0,5} = 300$ град/ч, $C_2 = \frac{200 - 150}{1,0} = 50$ град/ч,

$$C_3 = \frac{350 - 200}{0,75} = 200 \text{ град/ч};$$

3) $\frac{a\tau_1}{S^2} = \frac{0,025 \cdot 0,5}{0,2^2} = 0,31$, $\frac{a\tau_2}{S^2} = 0,62$, $\frac{a\tau_3}{S^2} = 0,47$;

4) $\Phi(0,31; 0) = 0,24$; $\Phi(0,62; 0) = 0,115$; $\Phi(0,47; 0) = 0,165$ находим из рис. 13;

5) разность температур в точке a :

$$\Delta t_\tau = \frac{C_1 S^2}{2a} = \frac{300 \cdot 0,2^2}{2 \cdot 0,025} = 240^\circ \text{ C},$$

$$\Delta t = \Delta t_\tau - 2\Phi(\Delta t_\tau - \Delta t_0) = 240 - 2 \cdot 240 \cdot 0,24 = 125^\circ \text{ C};$$

6) разность температур в точке b :

$$\Delta t_\tau = \frac{50 \cdot 0,2^2}{2 \cdot 0,025} = 40^\circ \text{ C}, \quad \Delta t_0 = 40 - 2(40 - 125) \cdot 0,115 = 60^\circ \text{ C}.$$

Последняя разность температур войдет в формулу XIII-17, см. [15, с. 255];

7) для точки тела, в которой $x/S = 1$ и $a\tau/S^2 = 0,47$, из рис. 11 определяют значение функции $f = 0,105$.

Искомое напряжение определяют по формуле XIII-17, см. [15, с. 255];

$$\sigma_y = \sigma_z = \frac{\alpha_1 E}{1 - \psi'} \left[\frac{CS^2}{6a} \left(1 - 3 \frac{x^2}{S^2} \right) + \left(\frac{CS^2}{a} - 2\Delta t_0 \right) \int \left(\frac{\alpha \tau}{S^2}; \frac{x}{S} \right) \right] \times$$

$$\times \frac{11,6 \cdot 10^{-6} \cdot 17,5 \cdot 10^4}{1,0 - 0,3} \left[\frac{200 \cdot 0,2^2}{6 \cdot 0,025} (1 - 3 \cdot 1^2) + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{200 \cdot 0,2^2}{0,025} - 2 \cdot 60 \right) \cdot 0,105 \right] = -249 \text{ Мн/м}^2 \text{ (} -24,9 \text{ кг/мм}^2 \text{)}.$$

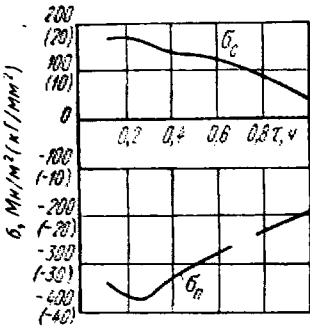


Рис. 30. Изменение температурных напряжений в плите при постоянной температуре печи: σ_n — напряжения на поверхности пластины; σ_{cp} — напряжения в середине пластины

8) Аналогичным образом находят напряжения для остальных точек:

$$x/S = 0,8; \quad \sigma = -111 \text{ Мн/м}^2 \text{ (} 11,1 \text{ кг/мм}^2 \text{)};$$

$$x/S = 0,2; \quad \sigma = +106 \text{ Мн/м}^2 \text{ (+} 10,6 \text{ кг/мм}^2 \text{)};$$

$$x/S = 0,6; \quad \sigma = -7,7 \text{ Мн/м}^2 \text{ (-} 0,77 \text{ кг/мм}^2 \text{)};$$

$$x/S = 0; \quad \sigma = +124 \text{ Мн/м}^2 \text{ (} 12,4 \text{ кг/мм}^2 \text{)};$$

$$x/S = 0,4; \quad \sigma = +64,7 \text{ Мн/м}^2 \text{ (+} 6,47 \text{ кг/мм}^2 \text{)}.$$

Полученные данные представлены графически на рис. 14.

Методика решения задач при нагреве в печи с постоянной температурой

Задача № 44 [15]. Плиту из среднеуглеродистой стали толщиной 250 мм загрузили в печь при 900° С. Построить кривые изменения температурных напряжений на поверхности и в середине плиты.

Дано: $\lambda = 30,2 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$ (26 ккал/м·ч·град); $a = 0,025 \text{ м}^2/\text{ч}$; $\alpha_1 = 12 \cdot 10^{-6}$; $E = 18 \cdot 10^4 \text{ Мн/м}^2$ ($18 \cdot 10^3 \text{ кг/мм}^2$); $\psi' = 0,3$; $\alpha = 122,1 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$ (105 ккал/м²·ч·град).

Известно, что: $S = 0,125 \text{ м}$; $t_0 = 0$ и $t_{\text{печ}} = 900^\circ \text{ С}$.

Решение. 1. Вычисляем $\frac{\alpha S}{\lambda} = \frac{122,1 \cdot 0,125}{30,2} = 0,5$.

$$2. \quad \frac{\alpha \tau}{S^2} = \frac{0,025 \cdot 0,1}{0,125^2} = 0,16 \text{ при } \tau = 0,1 \text{ ч.}$$

$$3. \text{ Из рис. 16 } f_n(0,16; 0,5; 1) = +0,122 \text{ и } f_c(0,16; 0,5; 0) = -0,055.$$

4. Напряжения на поверхности определяют по формуле (22-11):

$$\sigma_y^p = \sigma_z^p = \frac{12 \cdot 10^{-6} \cdot 18 \cdot 10^4}{1,0 - 0,3} \times$$

$$\times (0 - 900) \cdot 0,122 \approx -339 \text{ Мн/м}^2 (33,9 \text{ кг/мм}^2).$$

5. Напряжения в середине при $x/S = 0$ определяют по формуле (22-11):

$$\sigma_y^c = \sigma_z^c = \frac{12 \cdot 10^{-6} \cdot 18 \cdot 10^4}{0,1 - 0,3} \times$$

$$\times (0 - 900) \cdot (-0,055) = +155 \text{ Мн/м}^2 (15,3 \text{ кг/мм}^2).$$

Таким образом определяют напряжения для других промежуточных времени.

Результаты расчетов представлены в виде графика на рис. 30.

Глава III

НАПРЯЖЕННОЕ И ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕЛА

1. ОСНОВНАЯ ЗАДАЧА ТЕОРИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Под действием внешних сил, действующих на тело, возникают внутренние силы взаимодействия частиц этого тела. Интенсивность внутренних усилий называют напряжением [29]. Совокупность действия внешних и внутренних сил может вывести частицы тела из состояния равновесия, т. е. вызвать деформацию тела.

Определение величины внешних активных сил, напряжений и проектирование оптимальных схем деформаций, способных обеспечить получение изделия без дефектов при обработке его давлением, является одной из основных задач теории пластической деформации металлов и сплавов. Вопросы этой теории подробно рассмотрены в работах [29—38].

Решение задач обработки металлов давлением (ОМД) основано на использовании основных законов теории упругости и теории пластичности. Сложность решения таких задач связана со сложностью определения целевых функций, одновременно зависящих от многих переменных (температуры, скорости, физико-механических и химических свойств металла, структуры и др.).

Математическая теория пластической деформации, на совре-

менном этапе ее развития, полностью не отражает физическую сторону процессов ОМД. Поэтому при решении задач ОМД приходится пользоваться упрощенными формулами математической теории пластической деформации с рядом известных допущений.

При решении отдельных задач будут использованы формулы из теории упругости и пластичности и из курса «Сопrotивления материалов» [41, 43].

Для лучшего освоения методики решения задач, рассмотренных в гл. III, приведены основные сведения из теорий упругости и пластичности и теории обработки металлов давлением¹.

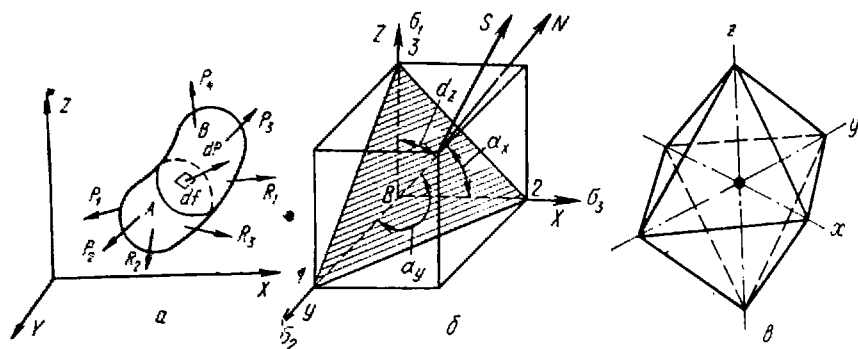


Рис. 31. Схемы к определению напряженного состояния: а — в точке; б — на поверхностях октаэдра; в — октаэдр

2. ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ВЕЛИЧИН, ВСТРЕЧАЮЩИХСЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ [43]

x, y, z — декартовы координаты тела в недеформированном состоянии;

N — нормаль к поверхности тела;

α_x, α_y и α_z — направляющие косинусы углов, образованных нормалью N и координатными осями X, Y и Z ;

ΔP — равнодействующая внутренних сил, действующих в сечении тела на весьма малой площадке ΔF ;

dP — равнодействующая внутренних сил, действующих на бесконечно малой площади dF (рис. 31);

$S = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta F} \right) = \frac{dP}{dF}$ — полное напряжение в точке;

¹ Все вопросы, рассмотренные в гл. III, достаточно подробно изложены в работе Н. П. Громова [29].

S_x , S_y и S_z — проекции полного напряжения S на координатные оси X , Y и Z , определяемого по уравнению

$$S^2 = s_x^2 + s_y^2 + s_z^2;$$

σ_x , σ_y и σ_z — нормальные напряжения (рис. 32), направленные параллельно произвольным координатным осям X , Y и Z ;

τ_{xy} и τ_{xz} — касательные напряжения, действующие на площадках с нормальными, параллельными оси X ;

τ_{yx} и τ_{yz} — касательные напряжения, действующие на площадках с нормальными, параллельными оси Y ;

τ_{zx} и τ_{xy} — касательные напряжения, действующие на площадках с нормальными, параллельными оси Z ;

σ_n и τ_n — нормальная и касательная компоненты полного напряжения $S = \sqrt{\sigma_n^2 + \tau_n^2}$;

$T_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_x, \tau_{xy}, \tau_{xz} \\ \tau_{yx}, \sigma_y, \tau_{yz} \\ \tau_{zx}, \tau_{zy}, \sigma_z \end{vmatrix}$ — тензор напряжений, т. е. совокупность напряжений, действующих на трех взаимно перпендикулярных площадках;

σ_1 , σ_2 и σ_3 — главные напряжения в точке, т. е. нормальные напряжения на площадках, проходящих через данную точку, на которых отсутствуют касательные напряжения, причем $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$;

$\tau_{12} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$ — главные касательные напряжения, действующие на площадках, которые делят пополам двугранные углы между площадками главных напряжений σ_1 и σ_2 ;

$\tau_{23} = \pm \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}$ — то же, на площадках, биссекторных к направлениям σ_2 и σ_3 ;

$\tau_{13} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ — то же, на площадках, биссекторных к направлениям σ_1 и σ_3 ;

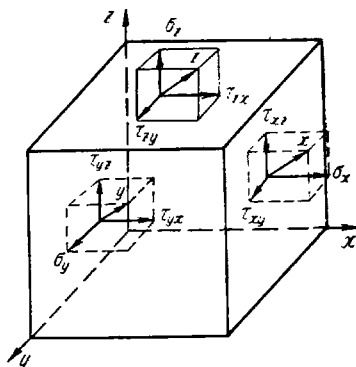


Рис. 32. Нормальные и касательные напряжения на гранях элементарного куба

$\sigma_{\text{окт}} = \sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ — нормальное напряжение на октаэдрических площадках (т. е. на площадках, равнонаклонных к главным осям), проходящих через рассматриваемую точку;

$\tau_{\text{окт}} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ — касательное напряжение на октаэдрических площадках;

$\tau_{\text{окт}} = \frac{2}{3} \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2}$ — касательное напряжение на октаэдрических площадках, выраженное через главные касательные напряжения;

$\sigma_i = \frac{3}{\sqrt{2}} \tau_{\text{окт}}$ — интенсивность напряжений (приведенное, расчетное напряжение);

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ и ε_z — относительные удлинения, направление которых совпадает с направлением соответствующих осей X, Y и Z ;

u_x, u_y и u_z — компоненты вектора перемещения точки сплошной среды: $\vec{u} = \vec{u}(x, y, z, t)$;

γ_{xy}, γ_{yz} и γ_{zx} — относительные сдвиги (в декартовых координатах; индексы указывают координатные плоскости, на которые проектируются соответствующие сдвиги);

$T_{\varepsilon} = \begin{vmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z \end{vmatrix}$ — тензор деформации, т. е. совокупность деформаций бесконечно малого объема (в форме параллелепипеда) в окрестности точки;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ и ε_3 — главные деформации удлинения;

$\gamma_{\text{max}} = \varepsilon_1 - \varepsilon_3$ — наибольший сдвиг;

$\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{1}{3} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)$ — средняя деформация удлинения (октаэдрическая деформация), т. е. удлинение в направлениях, нормальных к октаэдрическим площадкам;

$\gamma_{\text{окт}} = \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$ — октаэдрический сдвиг;

$\theta = 3\varepsilon_{\text{ср}}$ — относительная объемная деформация;

$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \gamma_{\text{окт}}$ — интенсивность деформации;

E и G — модули упругости первого рода (модуль Юнга) и второго рода (модуль сдвига);

ψ' — коэффициент Пуассона;

$$D_{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_1 - \sigma_{\text{ср}} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 - \sigma_{\text{ср}} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 - \sigma_{\text{ср}} \end{vmatrix} \text{ — девиатор напряжений;}$$

$$T_{\text{ш}} = \begin{vmatrix} \sigma_{\text{ср}} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\text{ср}} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\text{ср}} \end{vmatrix} \text{ — шаровой тензор;}$$

Δ_1 , Δ_2 и Δ_3 — инварианты напряжений [см. формулы (17-III)].

При решении задач по определению напряжений и деформации принята система единиц СИ.

3. ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЙ

При решении большинства типовых задач будем пользоваться формулами теории упругости и сопротивления материалов, что допустимо при решении аналогичных задач из области пластической деформации [45].

При определении пластической деформации учитывают следующие поправки:

1) коэффициент Пуассона

$$\psi' = \frac{\varepsilon'_b}{\varepsilon'_l} \quad (1-III)$$

принимают равным 0,5.

В формуле (1-III) ε'_b и ε'_l определяют по формулам (74-III);

2) вместо модуля упругости E вводят модуль пластичности E' , определяемый по формуле (63-III);

3) вместо модуля сдвига G принимают G' , определяемый по формуле (62-III).

Задача № 45. Для площадки, нормаль N к которой определяется направляющими косинусами: $\cos \alpha = \frac{1}{2} = \alpha_x$; $\cos \beta =$

$= \frac{1}{2} = \alpha_y$ и $\cos \gamma = \frac{1}{\sqrt{2}} = \alpha_z$, определить полное S , нормальное σ и касательное τ_n напряжения, если в точке тела известны компоненты напряжений $\sigma_x = 500 \text{ Мн/м}^2$; $\sigma_y = 0$; $\sigma_z = 300 \text{ Мн/м}^2$

и $\tau_{xy} = 500 \text{ Мн/м}^2$; $\tau_{yz} = -700 \text{ Мн/м}^2$; $\tau_{zx} = 800 \text{ Мн/м}^2$.

Решение. Полное напряжение

$$S = \sqrt{s_x^2 + s_y^2 + s_z^2}; \quad (2-III)$$

где

$$\left. \begin{aligned} S_x &= \sigma_x \alpha_x + \tau_{xy} \alpha_y + \tau_{xz} \alpha_z; \\ S_y &= \tau_{yx} \alpha_x + \sigma_y \alpha_y + \tau_{yz} \alpha_z; \\ S_z &= \tau_{zx} \alpha_x + \tau_{zy} \alpha_y + \sigma_z \alpha_z. \end{aligned} \right\} \quad (3\text{-III})$$

В случае объемного напряженного состояния элемента, согласно закону парности касательных напряжений,

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}; \tau_{xz} = \tau_{zx} \text{ и } \tau_{yz} = \tau_{zy}.$$

Обозначения касательных напряжений τ снабжены двумя индексами: первый из них соответствует оси, которая параллельна нормали к площадке действия данного напряжения, второй — оси, которой параллельно само напряжение (см. рис. 32).

Подставляем в уравнения (3-III) заданные по условию задачи компоненты напряжения:

$$S_x = 500 \cdot 0,5 + 500 \cdot 0,5 + 800 \frac{1}{\sqrt{2}} = 1068 \text{ Мн/м}^2 \text{ (106,8 кГ/мм}^2\text{);}$$

$$\begin{aligned} S_y &= 500 \cdot 0,5 + 0 \cdot 0,5 + (-700) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = \\ &= -247 \text{ Мн/м}^2 \text{ (24,7 кГ/мм}^2\text{);} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_z &= 800 \cdot 0,5 + (-700) \cdot 0,5 + 300 \frac{1}{\sqrt{2}} = \\ &= 263 \text{ Мн/м}^2 \text{ (26,3 кГ/мм}^2\text{).} \end{aligned}$$

Полное напряжение

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{(1068)^2 + (-247)^2 + (263)^2} = \\ &= \sqrt{1\,270\,802} = 1127 \text{ Мн/м}^2 \text{ (112,7 кГ/мм}^2\text{).} \end{aligned}$$

Определим нормальное σ_n напряжение на наклонной площадке по формуле

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_x \alpha_x^2 + \sigma_y \alpha_y^2 + \sigma_z \alpha_z^2 + 2\tau_{xy} \alpha_x \alpha_y + \\ &+ 2\tau_{yz} \alpha_y \alpha_z + 2\tau_{zx} \alpha_z \alpha_x, \end{aligned} \quad (4\text{-III})$$

или

$$\begin{aligned} \sigma_n &= 500 (0,5)^2 + 0 \cdot 0,5^2 + 300 \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 + 2(500) \cdot 0,5 \cdot 0,5 + \\ &+ 2(-700) \cdot 0,5 \frac{1}{\sqrt{2}} + 2 \cdot 800 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 0,5 = 125 + 0 + 150 + \\ &+ 250 - 497 + 568 = 596 \text{ Мн/м}^2 \text{ (59,6 кГ/мм}^2\text{).} \end{aligned}$$

Полное касательное напряжение

$$\tau_n = \sqrt{S^2 - \sigma_n^2} \quad (5\text{-III})$$

или

$$\begin{aligned}\tau_n &= \sqrt{(1127)^2 - (596)^2} = \sqrt{914\,913} = \\ &= 956 \text{ Мн/м}^2 \text{ (95,6 кГ/мм}^2\text{)}.\end{aligned}$$

Таким образом, $S = 1127 \text{ Мн/м}^2$ (112,7 кГ/мм²); $\sigma_n = 596 \text{ Мн/м}^2$ (59,6 кГ/мм²); $\tau_n = 956 \text{ Мн/м}^2$ (95,6 кГ/мм²).

Задача № 46. В точке тела имеется следующая система напряжений:

$$\begin{aligned}\sigma_x = \sigma_y &= 50 \text{ Мн/м}^2; \quad \sigma_z = -100 \text{ Мн/м}^2; \\ \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{xz} &= 0.\end{aligned}$$

Определить нормальные, касательные и полные напряжения на октаэдрических площадках, проведенных через данную точку.

Решение. Воспользуемся понятием о симметричном тензоре второго ранга.

Векторы, характеризующие напряженное состояние тела, записывают в виде симметричной таблицы, именуемой матрицей, которую называют тензором напряжений:

$$T_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix}. \quad (6\text{-III})$$

С учетом закона парности касательных напряжений тензор напряжения записывают в следующем виде:

$$T_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \cdot & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \cdot & \cdot & \sigma_z \end{vmatrix}. \quad (7\text{-III})$$

Точки в матрице указывают, что касательные напряжения, вместо которых они стоят, равны касательным напряжениям, расположенным симметрично относительно диагонали.

Если направления координатных осей совпадают с направлениями главных нормальных напряжений, то $\sigma_x = \sigma_1$, $\sigma_y = \sigma_2$ и $\sigma_z = \sigma_3$, а тензор напряжения имеет вид

$$T_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix} \quad (8\text{-III})$$

или

$$T_\sigma = \begin{vmatrix} 50 & 0 & 0 \\ 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & -100 \end{vmatrix}.$$

Нормальное октаэдрическое напряжение

$$\sigma_{\text{окт}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}, \text{ или } \sigma_{\text{окт}} = \frac{50 + 50 + (-100)}{3} = 0. \quad (9\text{-III})$$

Касательное октаэдрическое напряжение

$$\tau_{\text{окт}} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (10\text{-III})$$

или

$$\begin{aligned} \tau_{\text{окт}} &= \frac{1}{3} \sqrt{(50 - 50)^2 + [50 - (-100)]^2 + [(-100) - 50]^2} = \\ &= \frac{1}{3} \sqrt{45000} = 70,7 \text{ Мн/м}^2 \text{ (7,07 кГ/мм}^2\text{)}. \end{aligned}$$

Полное октаэдрическое напряжение

$$S_{\text{окт}} = \sqrt{\sigma_1^2 \alpha_1^2 + \sigma_2^2 \alpha_2^2 + \sigma_3^2 \alpha_3^2}, \quad (11\text{-III})$$

где

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \pm \frac{1}{\sqrt{3}},$$

или

$$\begin{aligned} S_{\text{окт}} &= \sqrt{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}{3}} = \sqrt{\frac{50^2 + 50^2 + (-100)^2}{3}} = \\ &= 50 \sqrt{2} = 70,7 \text{ Мн/м}^2 \text{ (7,07 кГ/мм}^2\text{)}, \end{aligned}$$

или $S_{\text{окт}} = \tau_{\text{окт}}$.

Задача № 47. В точке тела имеется следующая система напряжений: $\sigma_x = 50 \text{ Мн/м}^2$; $\sigma_y = 0$; $\sigma_z = 110 \text{ Мн/м}^2$; $\tau_{xy} = 30 \text{ Мн/м}^2$; $\tau_{yz} = 30 \text{ Мн/м}^2$; $\tau_{zy} = -80 \text{ Мн/м}^2$.

Определить значения полного, нормального и касательного напряжений на площадке с внешней нормалью N , направляющие косинусы которой имеют одинаковое значение.

Решение. По условию задачи, направляющие косинусы равны между собой или $\alpha_x = \alpha_y = \alpha_z = \alpha$.

На основании формулы

$$\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2 + \cos^2 \alpha_3 = 1 \quad (12\text{-III})$$

получим

$$\cos^2 \alpha = \frac{1}{3},$$

или

$$\cos \alpha = + \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,58.$$

По уравнениям (3-III) определяем полные напряжения:

$$S_x = \alpha (\sigma_x + \tau_{xy} + \tau_{xz}) = 0,58 (50 + 30 - 80) = 0;$$

$$S_y = \alpha (\tau_{yx} + \sigma_y + \tau_{yz}) = 0,58 (30 + 0 - 30) = 0;$$

$$S_z = \alpha (\tau_{zx} + \tau_{zy} + \sigma_z) = 0,58 (-80 - 30 + 110) = 0.$$

Тогда полное напряжение [см. уравнение (2-III)] равно нулю. Нормальное напряжение определяют по формуле (4-III):

$$\sigma_n = \alpha^2 (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) + 2\alpha^2 (\tau_{xy} + \tau_{yz} + \tau_{zx}), \quad (13-III)$$

или

$$\begin{aligned} \sigma_n &= (0,58)^2 \cdot (50 + 0 + 110) + 2 \cdot (0,58)^2 (30 - 30 - 180) = \\ &= 0,34 \cdot 160 - 0,68 \cdot 80 = 0. \end{aligned}$$

Полное касательное напряжение равно нулю, что соответствует ранее полученным значениям S и σ_n .

Ответ. Рассматриваемая площадка свободна от напряжений.

Задача № 48. Для некоторой точки тела известен тензор напряжений:

$$T_\sigma = \begin{vmatrix} 150 & 0 & 0 \\ 0 & 80 & 0 \\ 0 & 0 & -50 \end{vmatrix}.$$

Требуется разложить его на шаровой тензор и на девиатор напряжений и рассчитать второй инвариант девиатора напряжений. Компоненты тензора имеют размерность MH/M^2 ($KГ/M.M^2$).

Решение. Тензор напряжений можно представить как сумму двух тензоров: шарового тензора $T_{ш}$, связанного с различными объемными изменениями элемента тела без изменения формы, и девиатора напряжений D_σ , связанного с изменением формы элемента тела без изменения объема:

$$T_\sigma = T_{ш} + D_\sigma, \quad (14-III)$$

где

$$T_{ш} = \begin{vmatrix} \sigma_{ср} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{ср} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{ср} \end{vmatrix} = \sigma_{ср} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \sigma_{ср} T_1,$$

T_1 — единичный тензор;

$$\sigma_{ср} = \frac{150 + 80 - 50}{3} = 60 \text{ MH/M}^2 \text{ (6 KГ/M.M}^2\text{)}.$$

Тогда

$$T_\sigma = \begin{vmatrix} 150 & 0 & 0 \\ 0 & 80 & 0 \\ 0 & 0 & -50 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 60 & 0 & 0 \\ 0 & 60 & 0 \\ 0 & 0 & 60 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 90 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & -110 \end{vmatrix},$$

где

$$D_\sigma = \begin{vmatrix} 90 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & -110 \end{vmatrix}.$$

По знакам компонентов девиатора можно судить о виде напряженного состояния точки тела [47].

В частности, когда одна из трех составляющих девиатора положительна, а две другие отрицательны (причем каждая из этих двух последних по абсолютной величине меньше положительной), то имеет место растяжение. При равенстве двух отрицательных составляющих имеет место простое растяжение, а при равенстве нулю гидростатического давления — чистое растяжение.

Когда одна из трех главных нормальных составляющих девиатора отрицательна, а две другие положительны (причем каждая из двух последних по абсолютной величине меньше отрицательной составляющей), то имеет место сжатие. Когда две положительные составляющие девиатора между собой равны, сжатие будет простое.

Напряженное состояние называется сдвигом, когда одна из главных составляющих девиатора по абсолютной величине мала по сравнению с двумя другими, которые должны быть противоположны по знаку. В том случае, когда эти две составляющие по абсолютной величине равны, а третья равна нулю, имеет место простой сдвиг.

Когда шаровой тензор равен нулю, имеет место чистый сдвиг. Для иллюстрации Г. А. Смирнов-Аляев в своей работе [47] приводит несколько примеров (табл. 19).

Второй инвариант девиатора

$$\Delta'_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1, \quad (15-III)$$

или

$$\begin{aligned} \Delta'_2 &= 90 \cdot 20 - 20 \cdot 110 - 110 \cdot 90 = \\ &= -10\,300 \text{ МН/М}^2 \text{ (} -103 \text{ кг/ММ}^2 \text{)}. \end{aligned}$$

К основным характеристикам напряженного состояния в точке в теории напряжений относят инварианты тензора. В общем виде инварианты напряжений определяют по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z; \\ \Delta_2 &= \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2; \\ \Delta_3 &= \sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{zx}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2. \end{aligned} \right\} (16-III)$$

Инварианты как функции главных нормальных напряжений записывают в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \Delta'_1 &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma_{\text{окт}}; \\ \Delta'_2 &= \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1; \\ \Delta'_3 &= \sigma_1\sigma_2\sigma_3. \end{aligned} \right\} (17-III)$$

Примеры по определению напряженного состояния точки тела по составляющим девiatorу напряжений (47)

Тензор напряжений = Шаровой тензор + Девиатор напряжений	Вид напряженного состояния
$\begin{vmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & -38 & 0 \\ 0 & 0 & -32 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -20 & 0 & 0 \\ 0 & -20 & 0 \\ 0 & 0 & -20 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 30 & 0 & 0 \\ 0 & -18 & 0 \\ 0 & 0 & -12 \end{vmatrix}$	Растяжение
$\begin{vmatrix} 30 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} +10 & 0 & 0 \\ 0 & +10 & 0 \\ 0 & 0 & +10 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 20 & 0 & 0 \\ 0 & -10 & 0 \\ 0 & 0 & -10 \end{vmatrix}$	Простое растяжение
$\begin{vmatrix} 20 & 0 & 0 \\ 0 & -75 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -15 & 0 & 0 \\ 0 & -15 & 0 \\ 0 & 0 & -15 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 35 & 0 & 0 \\ 0 & -60 & 0 \\ 0 & 0 & 25 \end{vmatrix}$	Сжатие
$\begin{vmatrix} 42 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 18 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 20 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 20 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} +22 & 0 & 0 \\ 0 & -20 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{vmatrix}$	Сдвиг
$\begin{vmatrix} 42 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 21 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 21 & 0 & 0 \\ 0 & 21 & 0 \\ 0 & 0 & 21 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 21 & 0 & 0 \\ 0 & -21 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$	Простой сдвиг
$\begin{vmatrix} 21 & 0 & 0 \\ 0 & -21 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 21 & 0 & 0 \\ 0 & -21 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$	Чистый сдвиг

Инварианты тензора напряжений и главные нормальные напряжения не зависят от системы координат. Инварианты тензора напряжений Δ_1 , Δ_2 и Δ_3 входят в состав кубического уравнения, с помощью которого определяют три его корня, соответствующие величинам главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 , причем $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

Кубическое уравнение имеет вид

$$\sigma^3 - \Delta_1 \sigma^2 - \Delta_2 \sigma - \Delta_3 = 0. \quad (18-III)$$

Уравнение (18-III) называется характеристическим уравнением тензора напряжений. Касательное октаэдрическое напряжение равно

$$\tau_{\text{окт}} = \frac{\sqrt{2(\Delta_1^2 - 3\Delta_2)}}{3}. \quad (19-III)$$

Задача № 49 [43]. В некоторой точке сплошного тела известны напряжения: $\sigma_x = 100 \text{ Мн/м}^2$ (10 кг/мм^2); $\sigma_y = 50 \text{ Мн/м}^2$

(5 $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$); $\sigma_2 = -10 \text{ Мн}/\text{м}^2$ ($-1 \kappa\Gamma/\text{мм}^2$); $\tau_{xy} = 40 \text{ Мн}/\text{м}^2$ (4 $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$); $\tau_{xz} = -20 \text{ Мн}/\text{м}^2$ ($-2 \kappa\Gamma/\text{мм}^2$); $\tau_{zy} = 30 \text{ Мн}/\text{м}^2$ (3 $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$).

Найти значения главных нормальных напряжений и их направления в этой точке. Вычислить главные касательные напряжения.

Ответ. $\sigma_1 = 122 \text{ Мн}/\text{м}^2$ (12,2 $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$); $\sigma_2 = 50,1 \text{ Мн}/\text{м}^2$ (5,01 $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$); $\sigma_3 = -31 \text{ Мн}/\text{м}^2$ ($-3,1 \kappa\Gamma/\text{мм}^2$); $\tau_{13} = \pm 36 \text{ Мн}/\text{м}^2$ ($\pm 3,6 \kappa\Gamma/\text{мм}^2$); $\tau_{23} = \pm 40,5 \text{ Мн}/\text{м}^2$ ($\pm 4,05 \kappa\Gamma/\text{мм}^2$); $\tau_{31} = -77 \text{ Мн}/\text{м}^2$ ($-7,7 \kappa\Gamma/\text{мм}^2$); $\cos \alpha = \alpha_x = 0,87$; $\cos \beta = \alpha_y = 0,50$; $\cos \gamma = \alpha_z = 0,04$.

Эта задача предлагается для самостоятельного решения с помощью работы А. Д. Томленова [42] и Н. П. Громова [29]. При решении кубического уравнения типа $x^3 + px + q = 0$ рекомендуем воспользоваться работой А. Г. Куроша [48].

Задача № 50. Известны главные нормальные напряжения: $\sigma_1 = 600 \text{ Мн}/\text{м}^2$ (60 $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$), $\sigma_2 = 450 \text{ Мн}/\text{м}^2$ (45 $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$) и $\sigma_3 = 120 \text{ Мн}/\text{м}^2$ (12 $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$). Определить нормальное, касательное и полное октаэдрические напряжения.

Решение. Нормальное октаэдрическое напряжение

$$\sigma_{\text{окт}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{600 + 450 + 120}{3} = 390 \text{ Мн}/\text{м}^2 \text{ (39 } \kappa\Gamma/\text{мм}^2).$$

Октаэдрическое касательное напряжение, согласно уравнению (10-III), равно:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{окт}} &= \frac{1}{3} \sqrt{(600 - 450)^2 + (450 - 120)^2 + (120 - 600)^2} = \\ &= \sqrt{361\,800} = 601 \text{ Мн}/\text{м}^2 \text{ (60,1 } \kappa\Gamma/\text{мм}^2). \end{aligned}$$

Полное октаэдрическое напряжение, согласно уравнению (12-III), при $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \pm \frac{1}{3}$ равно:

$$\begin{aligned} S_{\text{окт}} &= \sqrt{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}{3}} = \sqrt{\frac{600^2 + 450^2 + 120^2}{3}} = \\ &= \sqrt{192\,300} = 438 \text{ Мн}/\text{м}^2 \text{ (43,8 } \kappa\Gamma/\text{мм}^2). \end{aligned}$$

Задача № 51. Напряженное состояние точки задано главными напряжениями: σ_1 , σ_2 и σ_3 .

Направление главных осей характеризуется значениями направляющих косинусов:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \pm \sqrt{\frac{1}{2}}; \quad \alpha_2 = \pm \sqrt{\frac{1}{2}}; \quad \alpha_3 = 0; \quad \alpha_1 = 0; \\ \alpha_2 &= \pm \sqrt{\frac{1}{2}}; \quad \alpha_3 = \pm \sqrt{\frac{1}{2}}; \quad \alpha_1 = \pm \sqrt{\frac{1}{2}}; \\ \alpha_2 &= 0; \quad \alpha_3 = \pm \sqrt{\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

Пользуясь кругом Мора, графически представить экстремальные значения касательных напряжений.

Решение. Если напряженное состояние точки задано главными напряжениями, выражения напряжений, составляющих полное напряжение S , по любому направлению значительно упрощаются.

Так, уравнение (4-III) примет вид

$$\sigma_n = \sigma_1 \alpha_1^2 + \sigma_2 \alpha_2^2 + \sigma_3 \alpha_3^2. \quad (20\text{-III})$$

Касательное напряжение, определяемое по формуле (5-III), в этом случае принимает вид:

$$\tau_n^2 = \sigma_1^2 \alpha_x^2 + \sigma_2^2 \alpha_y^2 + \sigma_3^2 \alpha_z^2 - (\sigma_1 \alpha_x^2 + \sigma_2 \alpha_y^2 + \sigma_3 \alpha_z^2)^2. \quad (21\text{-III})$$

Пользуясь уравнением (20-III) и условиями задачи, получим:

$$\sigma'_n = \sigma_1 \cdot \frac{1}{2} + \sigma_2 \cdot \frac{1}{2} + \sigma_3 \cdot 0 = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2);$$

$$\sigma''_n = \sigma_1 \cdot 0 + \sigma_2 \cdot \frac{1}{2} + \sigma_3 \cdot \frac{1}{2} (\sigma_2 + \sigma_3);$$

$$\sigma'''_n = \sigma_1 \cdot \frac{1}{2} + \sigma_2 \cdot 0 + \sigma_3 \cdot \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3).$$

По уравнению (21-III) находим величину главного касательного напряжения:

$$4\tau_{12}^2 = \sigma_1^2 \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right)^2 + \sigma_2^2 \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right)^2 + \sigma_3^2 \cdot 0 - \\ - \left[\sigma_1 \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right)^2 + \sigma_2 \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right)^2 + \sigma_3 \cdot 0 \right]^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2,$$

или

$$\tau_{12} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = R_2;$$

$$4\tau_{23}^2 = \sigma_1^2 \cdot 0 + \sigma_2^2 \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right)^2 + \sigma_3^2 \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right)^2 - \\ - \left[\sigma_1 \cdot 0 + \sigma_2 \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right)^2 + \sigma_3 \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right)^2 \right]^2 = (\sigma_2 - \sigma_3)^2,$$

или

$$\tau_{23} = \pm \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} = R_3;$$

$$4\tau_{13}^2 = \sigma_1^2 \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right)^2 + \sigma_2^2 \cdot 0 + \sigma_3^2 \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right)^2 - \\ - \left[\sigma_1 \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right)^2 + \sigma_2 \cdot 0 + \sigma_3 \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right)^2 \right]^2 = (\sigma_1 - \sigma_3)^2,$$

$$\tau_{13} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = R_1.$$

Экстремальные значения касательных и нормальных напряжений графически представлены на рис. 33.

Задача № 52. Для случая пластической деформации известно, что: $\sigma_1 = 600 \text{ Мн/м}^2$ (60 кг/мм^2), $\sigma_2 = 450 \text{ Мн/м}^2$ (45 кг/мм^2)

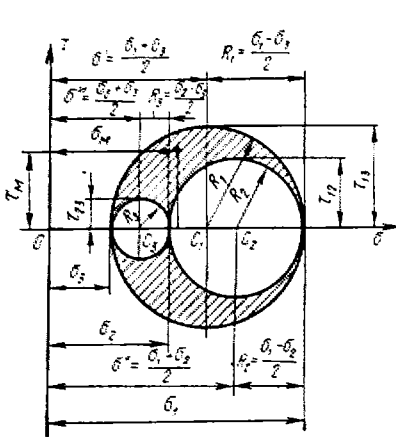


Рис. 33. Круг напряжений Мора для определения τ_{\max} и $\sigma_{\text{п}}$

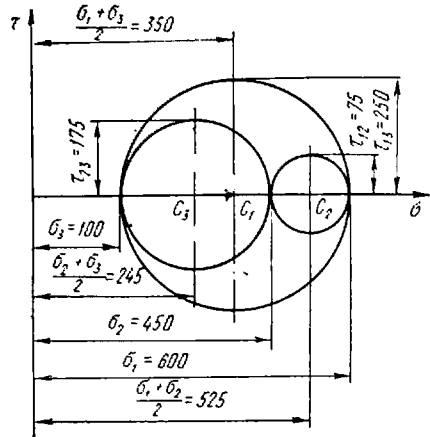


Рис. 34. Круг напряжений Мора по условиям задачи № 52 (напряжения даны в Мн/м^2)

и $\sigma_3 = 100 \text{ Мн/м}^2$ (10 кг/мм^2). Построить для данного случая круг напряжений Мора и с его помощью определить τ_{\max} .

Методика решения задачи основана на конечных результатах задачи № 51.

Ответ. $\tau_{(13) \max} = 250 \text{ Мн/м}^2$ (25 кг/мм^2).

Задача № 53. Тело под воздействием внешних сил находится в условиях объемного напряженного состояния. Главные нормальные напряжения при этом достигли следующих значений: $\sigma_1 = 550 \text{ Мн/м}^2$ (55 кг/мм^2), $\sigma_2 = 0$ и $\sigma_3 = -350 \text{ Мн/м}^2$ (-35 кг/мм^2).

Определить максимальное касательное напряжение в сечении, где действуют главные нормальные напряжения σ_1 и σ_3 , и доказать, что при заданных условиях объемного напряженного состояния наступит пластическая деформация тела, если известно, что предел текучести испытуемого тела $\sigma_{\tau} = 786 \text{ Мн/м}^2$ ($78,6 \text{ кг/мм}^2$).

Решение. Для определения наибольшего касательного напряжения воспользуемся уравнением (см. круг напряжений Мора из рис. 34):

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \quad (22-III)$$

или

$$\tau_{\max} = \frac{550 - (-350)}{2} = 450 \text{ Мн/м}^2 \text{ (45 кг/мм}^2\text{)}.$$

Для решения второго вопроса примем за основу уравнение Губера—Мизеса, согласно которому пластическая деформация тела наступает тогда, когда интенсивность напряжения достигает величины, равной пределу текучести [35]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_T. \quad (23\text{-III})$$

Введем в это уравнение известные величины:

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(550 - 0)^2 + [0 - (-350)]^2 + [(-350) - 550]^2} = \\ &= 786 \text{ Мн/м}^2 \text{ (78,6 кг/мм}^2\text{)}. \end{aligned}$$

Получено, что $\sigma_i = \sigma_T$. Следовательно, исследуемое тело находится в условиях пластического деформирования.

Задача № 54. Объемное напряженное состояние деформируемого тела характеризуется тензором напряжения:

$$T_{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_x, & \tau_{xy}, & \tau_{xz} \\ \tau_{yx}, & \sigma_y, & \tau_{yz} \\ \tau_{zx}, & \tau_{zy}, & \sigma_z \end{vmatrix},$$

где $\sigma_z > \sigma_y > \sigma_x$.

Нормальные σ и скальвающие τ напряжения определены в произвольных координатах x , y и z .

Определить вид уравнения Губера—Мизеса

$$\begin{aligned} (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) = \\ = 2\sigma_T^2. \end{aligned} \quad (24\text{-III})$$

в условиях плоского деформированного состояния тела, если его деформация в направлении оси z равна нулю ($\epsilon_z = 0$), а два других компонента тензора деформации ϵ_x и ϵ_y инвариантны к этому направлению.

Решение. Зависимость между деформацией в направлении оси Z и напряжением в условиях объемного напряженного состояния определяется уравнением

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \psi'(\sigma_x + \sigma_y)]. \quad (25\text{-III})$$

По условиям задачи $\epsilon_z = 0$. В этом случае $\sigma_z = 0,5(\sigma_x + \sigma_y)$.

Кроме того, ввиду отсутствия деформации в направлении оси Z скальвающие напряжения $\tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$.

Подставляя в уравнение (24-III) величину σ_z и значения скалярных напряжений τ_{zx} и τ_{zy} после несложных преобразований, получим уравнение Губера—Мизеса для случая плоского деформированного состояния:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = \frac{4}{3} \sigma_T. \quad (26-III)$$

Задача № 55. В плоскости элемента стального бруса по двум взаимно перпендикулярным сечениям действуют напряжения:

$$\begin{aligned} \sigma_\alpha &= 100 \text{ Мн/м}^2 \text{ (10 кГ/мм}^2\text{); } \sigma_\beta = 200 \text{ Мн/м}^2 \text{ (20 кГ/мм}^2\text{);} \\ \tau_\alpha &= -60 \text{ Мн/м}^2 \text{ (-6 кГ/мм}^2\text{); } \tau_\beta = 60 \text{ Мн/м}^2 \text{ (6 кГ/мм}^2\text{),} \end{aligned}$$

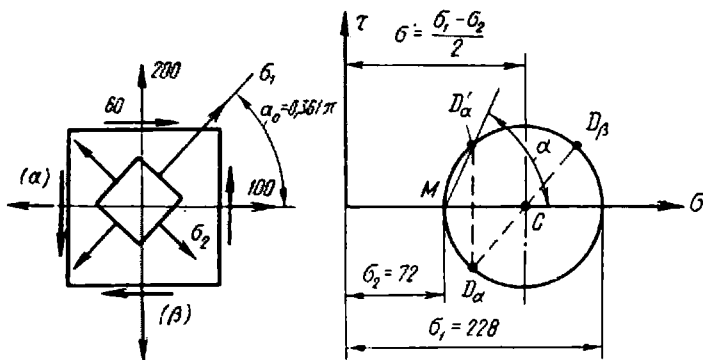


Рис. 35. Круг Мора для исследования плоского напряженного состояния по условиям задачи № 55 (напряжения даны в Мн/м^2)

где α и β — углы между нормальными к линиям сечения и главными нормальными напряжениями σ_1 и σ_2 .

Определить величину и направление главного напряжения σ_{\max} и σ_{\min} , пользуясь рис. 35.

Решение. Воспользуемся формулой преобразования компонентов тензора напряжений при изменении направлений координатных осей:

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2} [\sigma_\alpha + \sigma_\beta \pm \sqrt{(\sigma_\alpha - \sigma_\beta)^2 + 4\tau_\alpha^2}]. \quad (27-III)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{1}{2} [100 + 200 + \sqrt{(100 - 200)^2 + 4 \cdot 60^2}] = \\ &= \frac{1}{2} (300 + 156) = 228 \text{ Мн/м}^2 \text{ (22,8 кГ/мм}^2\text{);} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\min} &= \frac{1}{2} [100 + 200 - \sqrt{(100 - 200)^2 + 4 \cdot 60^2}] = \\ &= \frac{1}{2} (300 - 156) = 72 \text{ Мн/м}^2 \text{ (7,2 кГ/мм}^2\text{).} \end{aligned}$$

По формуле

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = -\frac{\tau_a}{\sigma_x - \sigma_{\min}}, \quad (28\text{-III})$$

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{-(-60)}{100-72} = 2,14.$$

Ответ. $\sigma_1 = 228 \text{ Мн/м}^2$ (22,8 кГ/мм²); $\sigma_2 = 72 \text{ Мн/м}^2$ (7,2 кГ/мм²); $\alpha_0 = 0,361 \text{ рад}$.

При графическом решении (см. рис. 35) отмечаем точки: D_α (100; -60) и D_β (200; 60). Строим окружность. Отмечаем D'_α , как зеркальное изображение D_α . Проводим луч MN и находим α_0 . Луч MN определяет величину и направление напряжения $\sigma_{\max} = \sigma_1$.

Задача № 56 [29]. Напряженное состояние точки a с координатами x , y и z на грани элементарного параллелепипеда определяется тензором напряжения:

$$T_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_x, \tau_{xy}, \tau_{xz} \\ \tau_{yx}, \sigma_y, \tau_{yz} \\ \tau_{zx}, \tau_{zy}, \sigma_z \end{vmatrix}.$$

Напряженное состояние точки a' , отстоящей от точки a на бесконечно малом расстоянии и имеющей координаты $x + dx$; $y + dy$ и $z + dz$, соответствует тензору напряжений:

$$T'_\sigma = \begin{vmatrix} \left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right), \left(\tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy \right), \\ \left(\tau_{xz} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} dz \right), \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} dx \right), \\ \left(\sigma_y + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} dy \right), \left(\tau_{yz} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} dz \right), \\ \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} dx \right), \left(\tau_{zy} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} dy \right), \\ \left(\sigma_z + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} dz \right). \end{vmatrix} \quad (29\text{-III})$$

Составить дифференциальное уравнение равновесия элементарного параллелепипеда с ребрами dx , dy и dz (рис. 36).

Решение. Определим силы, действующие на грани элементарного параллелепипеда. Известно, что эти силы равны произведению напряжений на площади соответствующих граней, или

$$P = \sigma F. \quad (30\text{-III})$$

После определения всех сил, действующих на грани параллелепипеда, составляем уравнения его равновесия по законам механики, а именно:

$$\sum x = 0, \quad \sum y = 0 \quad \text{и} \quad \sum z = 0, \quad (31\text{-III})$$

В этом случае в плоскости xoy , описываемой уравнением $z = 0$, дифференциальные условия равновесия внутренних сил представляются в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (34-III)$$

Задача № 57. Параллелепипед высотой h и шириной b квадратного сечения площадью F сжимается по оси X силой P_x ,

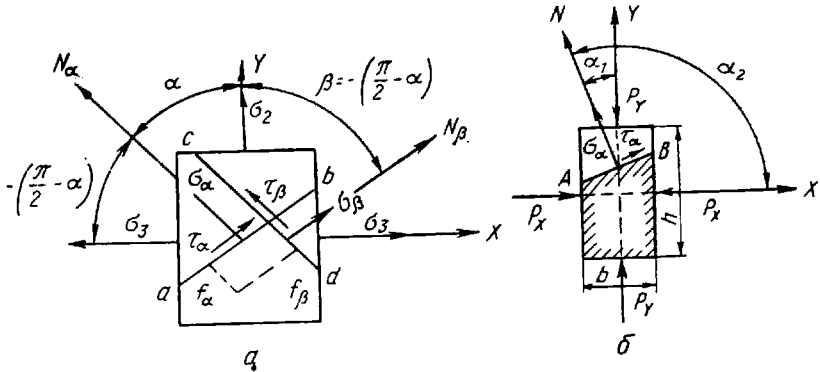


Рис. 37. Схемы плоского напряженного состояния:
 а — к выводу формул (35-III) — (39-III); б — к задаче № 57

а по оси Y силой P_y . Определить напряжения на наклонной площадке AB , нормаль к которой составляет с осью Y угол $\alpha = \frac{\pi}{4}$ рад (рис. 37).

Решение. Воспользуемся формулой

$$\sigma_\alpha = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_2 \sin^2 \alpha; \quad (35-III)$$

$$\sin^2 45 = \cos^2 45 = 0,5,$$

или

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}. \quad (36-III)$$

Определим отдельно главные нормальные напряжения в плоскостях, перпендикулярных направлениям действия сил P_x и P_y :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{P_y}{F}; \\ \sigma_2 &= \frac{P_x}{bh}. \end{aligned} \right\} \quad (37-III)$$

Значения σ_1 и σ_2 , полученные по формулам (37-III), подставляем в уравнение (36-III). Получим

$$\sigma_\alpha = \frac{\frac{P_y}{F} + \frac{P_x}{bh}}{2} \frac{P_y bh + P_x}{2Fbh} = \frac{P_y}{2F} + \frac{P_x}{2bh} = \frac{1}{2} \left(\frac{P_y}{F} + \frac{P_x}{bh} \right). \quad (38-III)$$

Скальвающее напряжение определим по формуле

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha. \quad (39-III)$$

При $\alpha = \frac{\pi}{4}$ рад, формула (39-III) имеет вид

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (40-III)$$

или

$$\tau_\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{P_y}{F} - \frac{P_x}{bh} \right).$$

Задача № 58. Стержень диаметром 60 мм растянут усилием $P = 0,25$ Мн (25 Т). Определить нормальное и касательное напряжения для сечения, нормаль к которому составляет с осью стержня угол $\pi/6$ рад. Определить, в каком сечении касательные напряжения достигают максимального значения, и вычислить их величину и величину полного напряжения на наклонной площадке S_α .

Решение. Определим напряжение в сечении, перпендикулярном оси стержня:

$$\sigma_1 = \frac{P}{F} = \frac{4P}{\pi d^2},$$

или

$$\sigma_1 = \frac{4 \cdot 0,25}{3,14 (0,06)^2} = 88,4 \text{ Мн/м}^2 (8,84 \text{ кг/мм}^2).$$

Нормальное напряжение в наклонной плоскости под углом $\pi/6$ рад (30°) к оси стержня определяем по формуле

$$\sigma_\alpha = \sigma_1 \cos^2 \alpha, \quad (41-III)$$

или

$$\sigma_\alpha = 88,4 \cdot \cos^2 30^\circ = 88,4 \cdot 0,75 = 66,3 \text{ Мн/м}^2 (6,63 \text{ кг/мм}^2).$$

Скальвающее напряжение определяем по формуле

$$\tau_\alpha = \frac{1}{2} \sigma_1 \sin 2\alpha \quad (42-III)$$

или

$$\tau_\alpha = \frac{88,4}{2} \sin 2 \cdot 30^\circ = 44,2 \cdot 0,87 = 38,5 \text{ Мн/м}^2 (3,85 \text{ кг/мм}^2).$$

Максимальные скалывающие напряжения определяем по формуле

$$\tau_{\alpha_{\max}} = \frac{1}{2} \sigma_1, \quad (43-III)$$

или

$$\tau_{\alpha_{\max}} = \frac{88,4}{2} = 44,2 \text{ Мн/м}^2 \text{ (4,42 кг/мм}^2\text{)}.$$

Скалывающие напряжения достигают своего максимума при $\alpha = \pm \frac{\pi}{4}$. Полное напряжение по наклонной площадке определяем по формуле

$$S_{\alpha} = \sigma_1 \cos \alpha \quad (44-III)$$

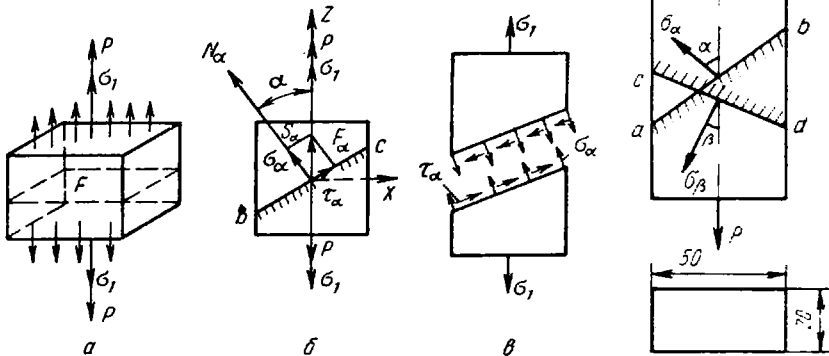


Рис. 38. Схемы линейного напряженного состояния (к задаче № 58):

a — направление действия силы P перпендикулярно площадке F ($\sigma_1 = P/F$; $\sigma_2 = 0$; $\sigma_3 = 0$); *б* — сила P составляет угол α с нормалью к площадке F ($\sigma_{\alpha} = \sigma_1 \cos^2 \alpha$; $\tau_{\alpha} = 0,5 \sigma_1 \sin 2\alpha$;

$S_{\alpha} = \sqrt{\sigma_{\alpha}^2 + \tau_{\alpha}^2} = \sigma_1 \cos \alpha$); *в* — напряжение σ_{α} и τ_{α} на наклонной площадке

или

$$S_{\alpha} = 88,4 \cos 30^{\circ} = 76,81 \text{ Мн/м}^2 \text{ (7,7 кг/мм}^2\text{)}.$$

При решении этой задачи использованы схемы линейного напряженного состояния элементов, представленные на рис. 38.

Задача № 59. Определить силу P , растягивающую стержень прямоугольного сечения размерами 50×20 мм, если известны величины нормальных напряжений $\sigma_{\alpha} = 20 \text{ Мн/м}^2$ (2 кг/мм^2) и $\sigma_{\beta} = 60 \text{ Мн/м}^2$ (6 кг/мм^2), действующих на двух взаимно перпендикулярных площадках ab и cd . Вычислить углы, образуемые нормальми к площадкам ab и cd с осью стержня (рис. 39).

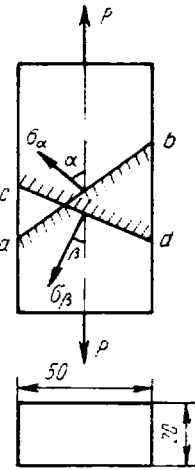


Рис. 39. Схема действия сил при растяжении стержня (к задаче № 59)

Решение. Выразим напряжения на наклонных площадках через напряжение в поперечном сечении стержня:

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_0 \cos^2 \alpha; \quad \sigma_{\beta} = \sigma_0 \sin^2 \alpha.$$

Суммируя эти выражения и подставив заданные значения σ_{α} и σ_{β} , получим

$$\sigma_0 = \sigma_{\alpha} + \sigma_{\beta} = 20 + 60 = 80 \text{ Мн/м}^2 \text{ (8 кг/мм}^2\text{)}.$$

Отсюда растягивающая сила

$$P = \sigma_0 \cdot F = 80 \cdot 0,001 = 0,08 \text{ Мн (8000 кг)}.$$

Определим углы между нормальными к площадкам и осью стержня:

$$\operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{60}{20} = 3; \quad \alpha = 60^{\circ}; \quad \beta = 30^{\circ}.$$

4. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ФОРМУЛЫ ИЗ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Пластическая деформация тела характеризуется перемещением любых его точек в пространстве [29, 31, 35, 42]. Подобно тензору напряжений, составляется тензор деформации

$$T_{\varepsilon} = \begin{vmatrix} \varepsilon_x, & \frac{1}{2} \gamma_{xy}, & \frac{1}{2} \gamma_{xz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{yx}, & \varepsilon_y, & \frac{1}{2} \gamma_{yz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{zx}, & \frac{1}{2} \gamma_{zy}, & \varepsilon_z \end{vmatrix}. \quad (45-III)$$

С учетом правила взаимности сдвигов [см. формулу (50-III)] деформированное состояние в точке достаточно полно определяется шестью компонентами деформации:

$$T_{\varepsilon} = \begin{vmatrix} \varepsilon_x, & \frac{1}{2} \gamma_{xy}, & \frac{1}{2} \gamma_{xz} \\ \cdot & \varepsilon_y, & \frac{1}{2} \gamma_{yz} \\ \cdot & \cdot & \varepsilon_z \end{vmatrix}, \quad (46-III)$$

где ε_x , ε_y и ε_z — проекции относительной деформации граней элементарного параллелепипеда;

γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{zx} — углы сдвига граней при деформации элементарного параллелепипеда (рис. 40).

Относительная деформация сдвига определяется углом между направлениями ребер в исходном состоянии и после деформации. Обозначают ее соответственно γ_{xy} , γ_{yz} и γ_{zx} , где первый индекс указывает направление оси, параллельно которой ребро находилось в исходном состоянии, а второй — ось, по направлению к которой повернулось ребро.

Деформации ϵ_x , ϵ_y и ϵ_z изменяют объем и форму параллелепипеда, а деформации сдвига изменяют только форму тела при постоянстве его объема.

Вектор полного перемещения AA_1 и проекции этого вектора u_x , u_y , u_z на оси координат, представленные на рис. 41, являются функциями координат и времени:

$$\left. \begin{aligned} u_x &= \varphi_1(x, y, z, t); \\ u_y &= \varphi_2(x, y, z, t); \\ u_z &= \varphi_3(x, y, z, t). \end{aligned} \right\} \quad (47-III)$$

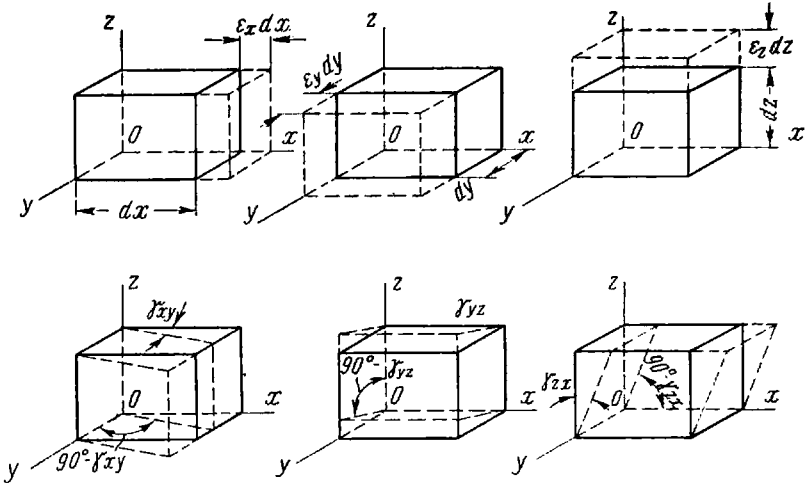


Рис. 40. Обозначения компонент тензора деформации

Проекции относительных деформаций удлинения граней элементарного параллелепипеда равны:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u_x}{\partial x}; \\ \epsilon_y &= \frac{\partial u_y}{\partial y}; \\ \epsilon_z &= \frac{\partial u_z}{\partial z}. \end{aligned} \right\} \quad (48-III)$$

Относительные сдвиги:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{xy} &= \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}; \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}; \\ \gamma_{zx} &= \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z}. \end{aligned} \right\} \quad (49-III)$$

Уравнения (48-III) и (49-III) иногда называют уравнениями Коши.

Равенства

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx}; \gamma_{yz} = \gamma_{zy} \quad \text{и} \quad \gamma_{zx} = \gamma_{xz} \quad (50\text{-III})$$

определяют взаимность сдвигов и представляют полную аналогию парности скалывающих напряжений.

В том случае, когда направления деформации ϵ_x , ϵ_y и ϵ_z совпадают с главными осями напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 , относительные деформации ϵ_1 , ϵ_2 и ϵ_3 называют главными деформациями.

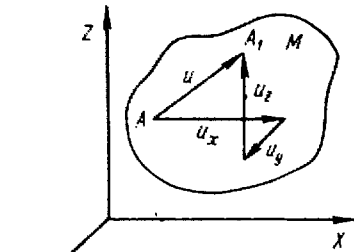


Рис. 41. Вектор перемещения u и его проекции на оси координат

Подобно главным напряжениям сдвига, главные деформации сдвига расположены на площадках, направленных под углом $\pi/4$ к главным плоскостям деформаций ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 . Главные деформации сдвига с главными деформациями удлинения связаны следующими равенствами:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{12} &= \epsilon_1 - \epsilon_2; \\ \gamma_{23} &= \epsilon_2 - \epsilon_3; \\ \gamma_{31} &= \epsilon_3 - \epsilon_1. \end{aligned} \right\} \quad (51\text{-III})$$

Между собою главные деформации сдвига связаны соотношением:

$$\gamma_{12} + \gamma_{23} + \gamma_{31} = 0. \quad (52\text{-III})$$

В плоскостях, перпендикулярных главным осям, относительные сдвиги равны нулю. Аналогично главным напряжениям главные деформации должны удовлетворять неравенству:

$$\epsilon_1 > \epsilon_2 > \epsilon_3. \quad (53\text{-III})$$

Различают три схемы главных деформаций (рис. 42). Две из них являются объемными и одна плоской. В случае плоской схемы в одном из координатных направлений деформации отсутствуют.

Тензор деформации в главных осях имеет вид:

$$T_\epsilon = \begin{vmatrix} \epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_3 \end{vmatrix}. \quad (54\text{-III})$$

Величина

$$\epsilon_{\text{ср}} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3}{3}$$

представляет собой среднюю главную деформацию, которая равна величине удлинения на октаэдрической площадке.

Подобно тому, как это было в теории напряжений [см. формулу (10-III)], октаэдрический сдвиг равен:

$$\gamma_{\text{окт}} = \frac{2}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \quad (55\text{-III})$$

или

$$\gamma_{\text{окт}} = \frac{2}{3} \sqrt{\gamma_{12}^2 + \gamma_{23}^2 + \gamma_{31}^2}. \quad (56\text{-III})$$

Так же, как и в теории напряжений, сумма главных деформаций растяжения или сжатия является инвариантной, т. е. она

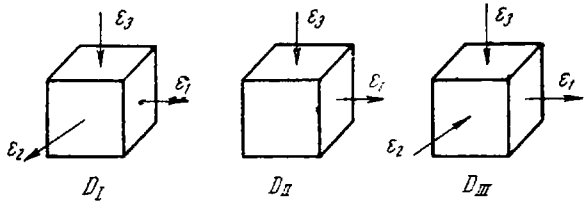


Рис. 42. Основные схемы действия главных деформаций

не изменяется при переходе от одной системы координат к другой:

$$\epsilon_{\text{ср}} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z}{3} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3}{3}.$$

При отсутствии объемного расширения имеем

$$\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3, \quad (57\text{-III})$$

что соответствует первому инварианту тензора деформации.

Подобно случаям простого растяжения и сжатия, когда соблюдается пропорциональность между ϵ и σ по закону Гука, при сдвиге

$$\tau = G\gamma, \quad (58\text{-III})$$

где τ — напряжение сдвига;

γ — относительный сдвиг;

G — модуль упругости сдвига.

При чистом сдвиге

$$\epsilon = \frac{1 + \nu'}{E} \tau. \quad (59\text{-III})$$

В произвольной системе координат:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{yx} &= \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy}; \\ \gamma_{zx} &= \gamma_{xz} = \frac{1}{G} \tau_{xz}; \\ \gamma_{zy} &= \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz}. \end{aligned} \right\} \quad (60\text{-III})$$

Связь между модулем сдвига G и модулем Томсона Юнга E выражается формулой

$$G = \frac{1}{2} \cdot \frac{E}{1 + \psi'} \quad (61\text{-III})$$

При коэффициенте Пуассона, равном 0,5,

$$G' = \frac{E'}{3} \quad (62\text{-III})$$

Величину E' определяют по формуле

$$E' = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}, \quad (63\text{-III})$$

где σ_i — интенсивность напряжений (или обобщенное напряжение), определяемая по формуле (23-III), или в общем виде:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}; \quad (64\text{-III})$$

ε_i — интенсивность деформации (или обобщенная деформация) равна:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \times \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}, \quad (65\text{-III})$$

или в главных деформациях

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}. \quad (66\text{-III})$$

В главных напряжениях и деформациях связь между ε и σ выражается в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{2G'} (\sigma_1 - \sigma_{cp}); \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{2G'} (\sigma_2 - \sigma_{cp}); \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{2G'} (\sigma_3 - \sigma_{cp}), \end{aligned} \right\} \quad (67\text{-III})$$

где G' определяют по формуле (62-III), а σ_{cp} по формуле (9-III).

Из уравнения (67-III) следует, что

$$\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = \frac{1}{G'},$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_{\text{ср}}}{\sigma_2 - \sigma_{\text{ср}}}; \\ \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3} &= \frac{\sigma_2 - \sigma_{\text{ср}}}{\sigma_3 - \sigma_{\text{ср}}}; \\ \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} &= \frac{\sigma_3 - \sigma_{\text{ср}}}{\sigma_1 - \sigma_{\text{ср}}}. \end{aligned} \right\} \quad (68\text{-III})$$

После несложных преобразований, пользуясь формулами (9-III) и (67-III), деформации можно определить по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{3G'} \left(\sigma_1 - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \right); \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{3G'} \left(\sigma_2 - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right); \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{3G'} \left(\sigma_3 - \frac{\sigma_2 + \sigma_1}{2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (69\text{-III})$$

При расчетах пластической деформации можно использовать те же формулы, что и при упругой деформации, с той лишь разницей, что вместо постоянной величины G принимают переменную величину G' — модуль пластичности второго рода, а линейную относительную деформацию $\varepsilon_{\text{ср}}$ считают равной нулю, если среда несжимаема.

5. СВЯЗЬ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ДЕФОРМАЦИЯМИ

Связь между деформациями и напряжениями в пределах упругой деформации выражается следующими формулами.

Для линейного напряженного состояния, когда $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, справедлив закон Р. Гука:

$$\sigma = \varepsilon E, \quad (70\text{-III})$$

где σ — нормальное напряжение;

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ — относительное удлинение стержня;

E — модуль нормальной упругости (модуль Юнга).

При плоском напряженном состоянии, когда $\sigma_3 = 0$,

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} (\sigma_1 - \psi' \sigma_2); \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} (\sigma_2 - \psi' \sigma_1). \end{aligned} \right\} \quad (71\text{-III})$$

При объемном напряженном состоянии, когда $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$,

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \psi'(\sigma_2 + \sigma_3)]; \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \psi'(\sigma_3 + \sigma_1)]; \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} [\sigma_3 - \psi'(\sigma_1 + \sigma_2)]. \end{aligned} \right\} \quad (72-III)$$

Формулы (70-III) и (71-III) можно получить из формулы (72-III) при условии, что в первом случае $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, а во втором — $\sigma_3 = 0$.

По известным значениям нормальных напряжений можно определить схему деформации тела. При решении такой задачи воспользуемся методом Иг. М. Павлова [38].

Задача № 60. Тело находится под влиянием трехосного сжатия. Главные напряжения имеют следующие значения: $\sigma_1 = 600 \text{ Мн/м}^2$ (60 кг/мм^2); $\sigma_2 = 300 \text{ Мн/м}^2$ (30 кг/мм^2); $\sigma_3 = 100 \text{ Мн/м}^2$ (10 кг/мм^2).

Каким образом будет происходить деформация данного тела?

Решение. Произведя анализ уравнений (72-III), определяющих связь деформаций с напряжениями, Иг. М. Павлов пришел к выводу, что при $\sigma_2 > \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ деформация проходит в направлении действия главного напряжения σ_2 , при $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ деформация по оси среднего напряжения отсутствует, а при $\sigma_2 < \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ деформация идет против направления действия главного напряжения σ_2 .

Пользуясь этим законом, рассмотрим условия деформации при заданных величинах напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 . По вертикальной оси z имеем

$$\sigma_1 > \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}$$

или

$$600 > \frac{300 + 100}{2}, \text{ т. е. } 600 > 200 \text{ Мн/м}^2 \text{ (} 60 > 20 \text{ кг/мм}^2 \text{)}.$$

Следовательно, в направлении оси z происходит обжатие тела. По оси y имеем

$$\sigma_2 < \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2},$$

или

$$300 < \frac{600 + 100}{2}, \text{ т. е. } 300 < 350 \text{ Мн/м}^2 \text{ (} 35 \text{ кг/мм}^2 \text{)}.$$

Металл поступает против направления действия среднего напряжения σ_3 .

По оси x имеем

$$\sigma_3 < \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2},$$

или

$$100 < \frac{600 + 300}{2}, \text{ т. е. } 100 \text{ Мн/м}^2 (10 \text{ кг/мм}^2) <$$

$$< 450 \text{ Мн/м}^2 (45 \text{ кг/мм}^2).$$

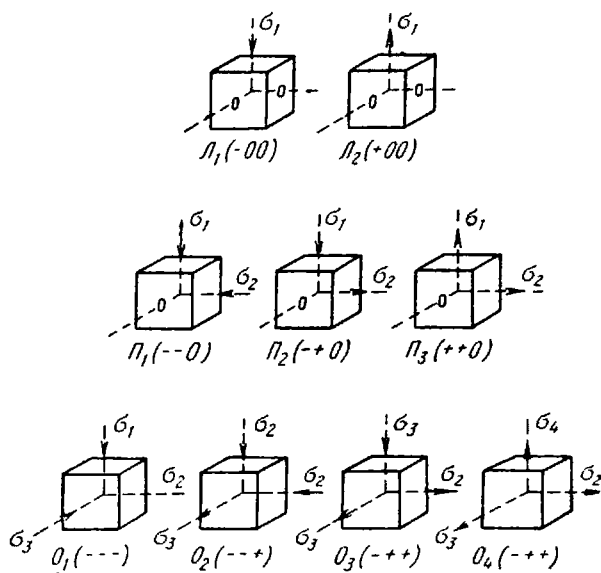


Рис. 43. Возможные схемы главных напряжений

Металл движется против направления действия напряжения σ_3 .

Таким образом, в данном случае деформация тела будет происходить по схеме D_1 (см. рис. 42).

Графическое представление о наличии и знаке главных нормальных напряжений в точке называют схемой напряженного состояния. Понятие о схемах главных напряжений в теории обработки металлов давлением ввел С. И. Губкин [34].

Основные схемы главных напряжений приведены на рис. 43. Всего имеется девять схем напряженного состояния: четыре объемные, три плоские и две линейные. При плоском напряженном состоянии одно из главных напряжений равно нулю, а при линейном — два главных напряжения равны нулю.

Схема называется одноименной, если напряжения этой схемы имеют одинаковые знаки (минус — сжатие, плюс — растяжение). Одноименные схемы: две — линейные, две — плоские и две — объемные; разноименные схемы — одна — плоская и две — объемные.

Аналогично схеме главных напряжений С. И. Губкин ввел понятие о схеме деформации (см. рис. 42).

Из условий постоянства объема при пластической деформации следует, что главные деформации не могут быть одного знака, а схемы деформации могут быть только разноименные.

Задача № 61. Определить относительное удлинение диагонали элемента квадратного сечения из углеродистой стали, претерпевающего чистый сдвиг, если известны сторона квадрата a , скалывающее напряжение $\tau = 200 \text{ Мн/м}^2$ (20 кг/мм^2), модуль упругости сдвига $G = 8,1 \cdot 10^4 \text{ Мн/м}^2$ ($8,1 \cdot 10^3 \text{ кг/мм}^2$).

Решение. Длина диагонали AC (рис. 44) равна:

$$l = a\sqrt{2}.$$

Абсолютное удлинение диагонали:

$$\Delta l = c_1 c_2 = c_1 c \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\gamma}{2}\right) \approx c c_1 \cos \frac{\pi}{4} = \frac{\Delta s}{\sqrt{2}}.$$

Относительное удлинение диагонали:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta s}{\sqrt{2} \cdot a \sqrt{2}} = \frac{1}{2} \frac{\Delta s}{a},$$

но

$$\frac{\Delta s}{a} = \text{tg } \gamma.$$

Тогда

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \text{tg } \gamma \approx \frac{1}{2} \gamma.$$

По закону Гука (58-III) для чистого сдвига при упругой деформации

$$\gamma = \frac{\tau}{G},$$

где γ — угол сдвига грани элемента.

В этом случае

$$\varepsilon = \frac{\tau}{2G} = \frac{200}{2 \cdot 8,1 \cdot 10^4} = 0,00124$$

или

$$\varepsilon = 0,124\%.$$

Задача № 62. Медный кубик свободно, но без зазоров вложен в стальную форму так, что две противоположные грани свободны (рис. 45). Сверху кубик подвергается удельному давлению p . Определить напряжение σ_x , деформации ϵ_y и ϵ_z , а также относительное изменение объема. Модуль упругости меди E_{Cu} , коэффициент Пуассона ψ' . Трением между кубиком и стенками пренебречь. Стальную форму принять абсолютно жесткой (недеформируемой).

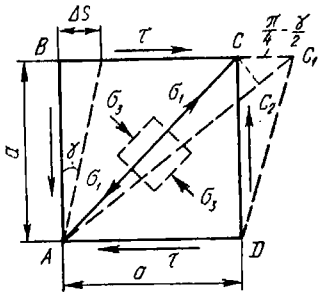


Рис. 44. Элемент тела, претерпевающий чистый сдвиг (к задаче № 61)

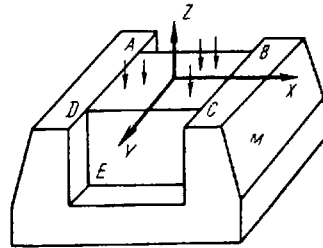


Рис. 45. Схема нагрузки на медный кубик в условиях плоской деформации (к задаче № 62)

Решение. По обобщенному закону Гука, по формулам (72-III) имеем:

$$\epsilon_x = \frac{1}{E_{Cu}} [\sigma_x - \psi' (\sigma_y + \sigma_z)];$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E_{Cu}} [\sigma_y - \psi' (\sigma_z + \sigma_x)];$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E_{Cu}} [\sigma_z - \psi' (\sigma_x + \sigma_y)].$$

По условию задачи: $\sigma_y = 0$; $\sigma_z = -p$ и $\epsilon_x = 0$. Используя эти условия, получаем:

$$\sigma_x = -\psi' p;$$

$$\epsilon_y = \frac{\psi' (1 + \psi')}{E_{Cu}} \cdot p;$$

$$\epsilon_z = -\frac{1 - (\psi')^2}{E_{Cu}} p.$$

Относительное изменение объема определяем по формуле

$$\epsilon_V = \frac{V_1 - V_0}{V_0} = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z. \quad (73-III)$$

После подстановки в уравнение (73-III) значений ε_x , ε_y и ε_z и несложных преобразований получим

$$\varepsilon_V = - \frac{(1 - 2\psi')(1 + \psi')}{E} p.$$

При решении данной задачи, в условиях пластической деформации тела, необходимо учитывать закон постоянства объема при деформации:

$$V_0 = V_1 = \text{const.}$$

В этом случае разность объемов

$$\Delta V = V_1 - V_0 = \frac{3\sigma_{\text{ср}}}{E} (1 - 2\psi') = 0.$$

Последнее уравнение будет равно нулю только тогда, когда коэффициент Пуассона $\psi' = 0,5$, что отвечает условиям пластической деформации. Если рассматривать задачу (62-III) в рамках пластической деформации, то требуется в формуле (72-III) заменить модуль упругости E модулем пластичности E' , определив его по формуле (63-III).

Решение данной задачи после внесения отмеченных изменений упрощается.

Задача № 63. Определить напряжения σ_1 и σ_2 , если относительные деформации по их направлениям равны соответственно $\varepsilon_1 = 10^{-3}$ и $\varepsilon_2 = -8^{-4}$, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^6 \text{ Мн/м}^2$ ($2 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2$), коэффициент Пуассона $\psi' = 0,3$.

Решение. Пользуясь формулой (72-III), определяем:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - (\psi')^2} (\varepsilon_1 + \psi' \varepsilon_2) = \frac{2 \cdot 10^6}{1 - 0,3^2} (10^{-3} - 0,3 \cdot 8^{-4}) \approx$$

$$\approx 167 \text{ Мн/м}^2 (16,7 \text{ кг/мм}^2);$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - (\psi')^2} (\varepsilon_2 + \psi' \varepsilon_1) = \frac{2 \cdot 10^6}{1 - 0,3^2} (-8^{-4} + 0,3 \cdot 10^{-3}) =$$

$$= -110 \text{ Мн/м}^2 (-11 \text{ кг/мм}^2).$$

6. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЕФОРМАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СМЕЩЕННОГО ОБЪЕМА

При определении технологических параметров прокатки приходится определять величину деформации тела в направлении трех взаимно перпендикулярных осей, где X — направление вытяжки металла, Y — направление уширения металла, Z — направление осадки металла. В расчетах принимаем следующие обозначения:

h_0 и h_1 — высота полосы до и после прокатки;

b_0 и b_1 — ширина полосы до и после прокатки;

l_0 и l_1 — длина полосы до и после прокатки.

Различают следующие параметры деформации.
 Главные деформации первого вида:

$$\varepsilon'_l = \frac{\Delta l}{l_0}; \quad \varepsilon'_b = \frac{\Delta b}{b_0}; \quad \varepsilon'_h = \frac{\Delta h}{h_0}. \quad (74\text{-III})$$

Главные деформации второго вида:

$$\varepsilon''_{l_1} = \frac{\Delta l}{l_1}; \quad \varepsilon''_{b_1} = \frac{\Delta b}{b_1}; \quad \varepsilon''_{h_1} = \frac{\Delta h}{h_1}. \quad (75\text{-III})$$

Главные деформации третьего вида:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon'''_h &= \int_{h_1}^{h_0} \frac{dh_x}{h_x} = \ln \frac{h_1}{h_0}; \\ \varepsilon'''_b &= \int_{b_0}^{b_1} \frac{db_x}{b_x} = \ln \frac{b_1}{b_0}; \\ \varepsilon'''_{l_1} &= \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl_x}{l_x} = \ln \frac{l_1}{l_0}. \end{aligned} \right\} \quad (76\text{-III})$$

Деформации первого и второго видов применимы для описания деформированного состояния только при малых степенях деформации (до 0,05), так как они не дают точного представления о степени изменения размеров, потому что в первом случае абсолютная деформация относится к начальному размеру, а во втором случае — к конечному, причем размер в процессе деформации все время меняется. Правильнее было бы относительную деформацию представлять как интеграл бесконечно малого приращения размера в каждый данный момент деформации, отнесенного к величине деформации в тот же момент. Поэтому главные деформации третьего вида называют действительными главными деформациями.

Задача № 64. На лабораторном стане прокатывают заготовку длиной $l_0 = 0,1$ м в три прохода. Изменение длины за три прохода получили следующее: $0,1 \rightarrow 0,125 \rightarrow 0,150 \rightarrow 0,2$ м.

Доказать, что главные деформации третьего вида [см. формулу (76-III)] обладают свойством аддитивности, а деформации первого рода этим свойством не обладают [см. формулу (74-III)].

Решение. Суммарная деформация

$$\sum \delta_l = \ln \frac{l_3}{l_0} = \ln \frac{0,2}{0,1} = 0,69.$$

После первого прохода

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{l_1}{l_0} = \ln \frac{0,125}{0,1} = 0,2232.$$

После второго прохода

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{l_3}{l_1} = \ln \frac{0,150}{0,125} = 0,1824.$$

После третьего прохода

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{l_3}{l_2} = \ln \frac{0,2}{0,15} = 0,2852.$$

$$\sum \delta_i = 0,2232 + 0,1824 + 0,2852 = 0,69.$$

Из этого расчета следует, что главные деформации третьего рода [см. формулы (76-III)] обладают свойством аддитивности, так как суммарная деформация равна сумме деформации за каждый проход: $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \sum \delta_i = 0,2232 + 0,1824 + 0,2852 = 0,69$.

Определим суммарную деформацию первого рода и деформации за каждый проход:

$$\sum \varepsilon = \frac{0,2 - 0,1}{0,1} = 1,0;$$

$$\varepsilon_1 = \frac{0,125 - 0,1}{0,1} = 0,25;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{0,150 - 0,125}{0,125} = 0,20;$$

$$\varepsilon_3 = \frac{0,2 - 0,150}{0,150} = 0,33.$$

Тогда

$$\sum' \varepsilon = 0,25 + 0,20 + 0,33 = 0,78,$$

т. е. деформации первого рода не обладают свойством аддитивности, так как $\sum \varepsilon > \sum' \varepsilon$.

Смещенный объем — это прибавленный или удаленный в процессе деформации объем в одном из главных направлений деформации.

В теории обработки металлов давлением, в частности при определении расхода работы на деформацию, пользуются понятием смещенного объема.

Смещенный объем в направлении координатных осей в процессе деформации металла при прокатке за каждый проход определяют по формулам:

$$\left. \begin{aligned} V'_{dh} &= V_0 \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} = V_0 \ln \frac{h_1}{h_0}; \\ V'_{db} &= V_0 \int_{b_0}^{b_1} \frac{db}{b} = V_0 \ln \frac{b_1}{b_0}; \\ V'_{dl} &= V_0 \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = V_0 \ln \frac{l_1}{l_0}, \end{aligned} \right\} \quad (77\text{-III})$$

где V_0 — объем тела до деформации.

В расчетах также используют следующие коэффициенты деформации:

$$\left. \begin{aligned} \text{коэффициент уменьшения высоты } \eta &= \frac{h_1}{h_0}; \\ \text{коэффициент уширения } \beta &= \frac{b_1}{b_0}; \\ \text{коэффициент вытяжки } \lambda &= \frac{l_1}{l_0}. \end{aligned} \right\} \quad (78\text{-III})$$

На основании закона постоянства объема имеем

$$\eta\beta\lambda = 1, \quad (79\text{-III})$$

или в логарифмическом виде:

$$\ln \eta + \ln \beta + \ln \lambda = 0. \quad (80\text{-III})$$

Из уравнения (80-III) следует, что истинные деформации не могут быть одного знака. Применительно, например, к осадке величина $\ln h_1/h_0$ отрицательная, а $\ln b_1/b_0$ и $\ln l_1/l_0$ — положительные.

Все перечисленные коэффициенты (78-III) входят в формулу И. Я. Гарновского:

$$\frac{\ln \beta}{\ln \frac{1}{\eta}} + \frac{\ln \lambda}{\ln \frac{1}{\eta}} = 1. \quad (81\text{-III})$$

В практических расчетах удобнее вместо натуральных логарифмов пользоваться десятичными, тогда

$$\frac{\lg \beta}{\lg \frac{1}{\eta}} + \frac{\lg \lambda}{\lg \frac{1}{\eta}} = 1. \quad (82\text{-III})$$

Отношение $\lg \beta / \lg 1/\eta$ показывает, какую долю составляет объем, смещенный в направлении ширины, от объема, смещенного

по высоте. Отношение $\lg \lambda / \lg 1/\eta$ показывает, какую долю составляет объем, смещенный в направлении длины, от объема, смещенного по высоте.

Приведем пример, в котором используется формула (82-III). *Задача № 65* [50]. Экспериментальное определение уширения при прокатке образцов быстрорежущей стали Р18 позволило получить значение показателя уширения $\Delta b/\Delta h = 0,545$ при температуре металла 1200°C .

Определить, какая часть из всего объема, смещенного по высоте, смещается в направлениях длины и ширины, если известны размеры образца после прокатки: $h_1 = 17,5 \text{ мм}$; $b_1 = 27,8 \text{ мм}$; $l_1 = 556 \text{ мм}$, и до прокатки: $h_0 = 20,8 \text{ мм}$; $b_0 = 26,0 \text{ мм}$ и $l_0 = 500 \text{ мм}$.

Решение. По данным условия задачи определяем линейное обжатие $\Delta h = h_0 - h_1 = 20,8 - 17,5 = 3,3 \text{ мм}$ и уширение $\Delta b = 0,545 \Delta h = 0,545 \cdot 3,3 = 1,8 \text{ мм}$.

Пользуясь коэффициентами деформации, получим:

$$\beta = \frac{b_1}{b_0} = \frac{27,8}{26,0} = 1,069; \quad \frac{1}{\eta} = \frac{h_0}{h_1} = \frac{20,8}{17,5} = 1,189.$$

Из формулы (82-III) следует, что

$$\frac{\lg \beta}{\lg \frac{1}{\eta}} = 1 - \frac{\lg \lambda}{\lg \frac{1}{\eta}}.$$

Подставляем известные величины и находим часть смещаемого объема металла, расходуемого в направлении ширины:

$$\frac{\lg \beta}{\lg \frac{1}{\eta}} = \frac{\lg 1,069}{\lg 1,189} = \frac{0,02898}{0,07518} = 0,384, \text{ или } 38,4\%.$$

Тогда

$$1 - \frac{\lg \lambda}{\lg \frac{1}{\eta}} = 0,384$$

или часть смещенного объема металла, расходуемого в направлении длины:

$$\frac{\lg \lambda}{\lg \frac{1}{\eta}} = 1 - 0,384 = 0,616, \text{ или } 61,6\%.$$

7. СКОРОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ

Не следует смешивать скорость деформации со скоростью деформирования. В первом случае учитывают изменение степени деформации тела в единицу времени или изменение удельного смещенного объема в единицу времени:

$$u_{\text{ср}} = \frac{d\delta_h}{dt} = \frac{dh}{dt} = \frac{dV dh}{V dt} \text{ сек}^{-1}. \quad (83-III)$$

Во втором случае учитывают скорость хода инструмента, осуществляющего деформирование металла в единицу времени, что следует из уравнения

$$v_h = \frac{dh}{dt} \text{ м/сек.} \quad (84\text{-III})$$

Скорость деформации зависит от скорости деформирования и размера тела в направлении деформации, что следует из уравнений (83-III) и (84-III):

$$u_{\text{ср}} = \frac{dh}{dh} = \frac{v_h}{h} \text{ сек}^{-1}. \quad (85\text{-III})$$

Скорость высотной деформации по дуге захвата и по сечению прокатываемого металла распределяется неравномерно, что создает определенные трудности при выводе формулы, по которой можно было бы точно определить величину $u_{\text{ср}}$.

Для приближенного вычисления средней скорости деформации при прокатке А. И. Целиков предложил формулу [30]:

$$u_{\text{ср}} = \frac{v_1}{l_x} \cdot \frac{\Delta h}{h_0} \text{ сек}^{-1}, \quad (86\text{-III})$$

где v_1 — скорость выхода полосы из валков, которую без учета опережения определяют по формуле:

$$v_1 = \frac{\pi D_p n}{60} \text{ м/сек},$$

где $\frac{\Delta h}{h_0}$ — главная деформация первого вида;

l_x — проекция длины дуги захвата на ось направления прокатки (см. табл. 20).

Для определения средней скорости деформации по высоте при продольной прокатке в технической литературе, кроме формулы А. И. Целикова, имеются другие формулы:

$$u_{\text{ср}} \approx \frac{\Delta h}{h_0 t}; \quad (87\text{-III})$$

$$u_{\text{ср}} = \frac{2v_B \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}}{h_0 + h_1} \text{ — формула С. Эжелунда}; \quad (88\text{-III})$$

$$u_{\text{ср}} = \frac{2h_1 v_B \mu \left[(h_1 + D) \frac{\Delta h}{h_0 h_1} \right] \ln \frac{h_0}{h_1 \cos \alpha}}{(h_1 + D)^2 \alpha} \text{ — формула Н. Н. Крейдлина}, \quad (89\text{-III})$$

где μ — вытяжка;

D — диаметр валков;

α — угол захвата, рад.

Из всех формул А. И. Целиков считает формулу (89-III) наиболее правильной, точной, но ввиду ее громоздкости она невыгодна для практических расчетов.

Одним из основных параметров технологии деформации металла при прокатке считается средняя скорость деформации слитка или заготовки, или изменение степени деформации в единицу времени:

$$u_{\text{ср}} = \frac{d\varepsilon}{dt},$$

где

$$d\varepsilon = \frac{dh}{h_0}.$$

Необходимо отметить, что в настоящей книге не приводятся данные математического анализа деформации тела в условиях осесимметричного напряженного состояния. Такое напряженное состояние может быть при осадке цилиндрической или конической заготовки, прессовании и волочении круглых прутков из круглых заготовок, а также при прокатке или волочении труб.

8. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

Для успешного решения производственных задач по определению напряжений и деформации при обработке металла давлением и лучшего усвоения всего материала, изложенного в гл. III, предлагаются вопросы для самопроверки.

При составлении ответов на все вопросы рекомендуется пользоваться работами Иг. М. Павлова [39], С. И. Губкина [32, 34], Н. П. Громова [29] и А. Д. Томленова [42], а также решениями типовых задач, помещенных в гл. III.

Вопросы

1. Какие векторные величины характеризуют напряженное состояние точки тела и в какой последовательности их записывают в матрице тензора напряжений?

2. Написать тензор напряжений в точке для следующих случаев:

- а) одноосное растяжение или сжатие;
- б) двухосное растяжение или сжатие;
- в) разноименное плоское напряженное состояние;
- г) трехосное растяжение или сжатие;
- д) разноименное объемное напряженное состояние.

3. Как называют площадки, которые не имеют касательных напряжений? Какие нормальные напряжения действуют на таких площадках?

4. В какой последовательности определяются напряжения в точке тела по любому направлению?

5. Выразить полное напряжение S через компоненты тензора напряжений и направляющие косинусы углов α_x , α_y и α_z .
6. Определить компоненты полного напряжения S — нормальное σ_n и касательное τ_n напряжения, если известны компоненты тензора напряжения.
7. Записать главный тензор напряжения и определить нормальное σ_n и касательное τ_n напряжения через его компоненты.
8. В чем сущность инвариантов напряжений?
9. В чем сущность методики определения главных нормальных напряжений в точке по данным компонентом тензора напряжений, выраженных в произвольных координатах?
10. Какие площадки называются октаэдрическими и по каким формулам определяются полное октаэдрическое $S_{\text{окт}}$, нормальное $\sigma_{\text{окт}}$ и касательное $\tau_{\text{окт}}$ напряжения, если напряженное состояние точки задано главными напряжениями?
11. Сколько всего характерных площадок напряжений и какие их основные параметры?
12. Как изменится вид матрицы тензора напряжения, если учесть закон о парности касательных напряжений и если напряженное состояние задано в главных напряжениях?
13. Одно из главных напряжений, например $\sigma_1 \neq 0$, а два остальных $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$. Определить нормальное касательное и полное напряжения на площадке, наклоненной к нормали N_α под углом α .
14. Два главных напряжения, например $\sigma_3 \neq 0$ и $\sigma_2 \neq 0$, а $\sigma_1 = 0$. Определить нормальное и касательное напряжения в сечении, если угол между нормалью N_α этого сечения и действующими напряжениями равен α .
15. Как определяют нормальное σ_α и касательное τ_α напряжения в точке с помощью круга напряжений Мора при плоской схеме деформации?
16. Для случая объемного напряженного состояния с помощью круга напряжений Мора определить три экстремальных значения касательных напряжений τ_{12} , τ_{13} и τ_{23} .
17. Представить тензор напряжений T_σ как сумму шарового тензора $T_{\text{ш}}$ и девiatorа напряжений D_σ и объяснить их физический смысл.
18. Написать тензор деформации в главных координатных осях.
19. Какова связь при объемном напряженном состоянии между напряжениями и деформациями в условиях пластической деформации?
20. Дать анализ уравнения пластичности Губера—Мизеса и Генки. Получить из общего уравнения пластичности уравнения для частных схем напряженного и деформированного состояний.
21. Составить дифференциальные уравнения равновесия элементарного параллелепипеда.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ

1. ОЧАГ ДЕФОРМАЦИИ И УСЛОВИЯ ЗАХВАТА МЕТАЛЛА ВАЛКАМИ

Очаг деформации

Очаг деформации при прокатке прямоугольной полосы в гладких валках представляет собой объем, находящийся между контактными поверхностями соприкосновения полосы и валков (рис. 46). Более точное представление о размерах и форме геометрического очага деформации при прокатке в калибрах можно получить путем построения его методами начертательной геометрии с помощью планиметра (рис. 47).

Геометрические параметры, характеризующие очаг деформации, перечислены в табл. 20. Схема к определению длины очага деформации l_x с учетом упругого сжатия валков при холодной прокатке показана на рис. 48.

Приведем несколько примеров по определению основных элементов очага деформации, пользуясь формулами табл. 20.

Задача № 66. В круглый калибр диаметром 60 мм задается овальная полоса шириной 56 мм и высотой 88,4 мм. Площадь овальной полосы равна $f_{ов} = \frac{2}{3} bh \approx 33 \text{ мм}^2$.

Определить величину среднего обжатия $\Delta h_{ср}$.

Решение. По формуле (18-IV) имеем: $\Delta h_{ср} = 58,9 - 47,1 = 11,8 \text{ мм}$.

Задача № 67. Дано: размеры полосы до прокатки $h_0 \times b_0 \times l_0 = 120 \times 150 \times 4000 \text{ мм}$, после прокатки — $h_1 \times b_1 \times l_1 = 90 \times 160 \times 5000 \text{ мм}$.

Рабочий диаметр валка $D_k = 600 \text{ мм}$. Определить: α , l_d , $l_{хорд}$, l_x и P_x (см. рис. 46).

Решение. По формулам (1-IV), (3-IV), (4-IV), (7-IV) и (13-IV) получим: $\alpha = 18^\circ 12' (0,317 \text{ рад})$; $l_d = 95,1 \text{ мм}$; $l_{хорд} = 94,9 \text{ мм}$; $l_x = 93,5 \text{ мм}$; $P_x = 14710 \text{ мм}^2 (0,0147 \text{ м}^2)$.

Задача № 68. Определить контактную площадь при прокатке сляба на трехвалковом стане 750/500/750. Ширина сляба до прокатки $b_0 = 250 \text{ мм}$, линейное обжатие $\Delta h = 30 \text{ мм}$, ширина сляба после прокатки $b_1 = 0,259 \text{ мм}$.

Решение. Пользуясь уравнением (14-IV), получим

$$P_x = 254,5 \sqrt{9000} = 24142 \text{ мм}^2.$$

Задача № 69. Квадратную заготовку сечением $14 \times 14 \text{ мм}$ прокатывают на стане дуо $D_k = 300 \text{ мм}$ в плоском овальном калибре $8,5 \times 22,6 \text{ мм}$.

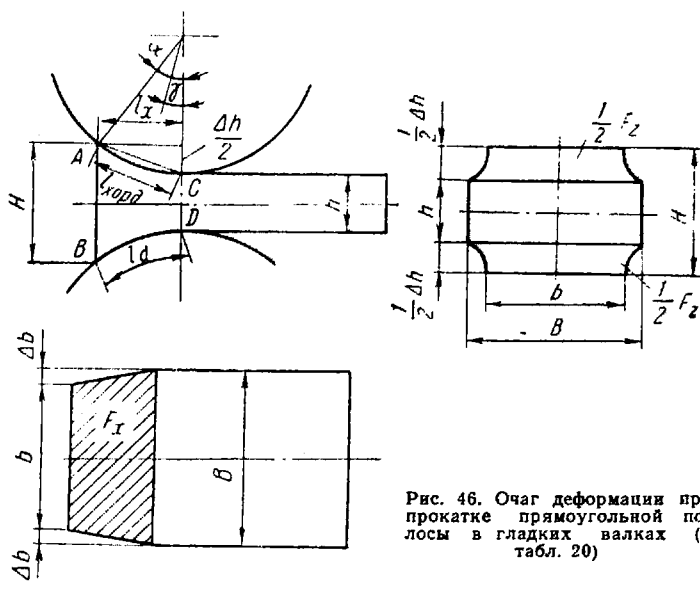


Рис. 46. Очаг деформации при прокатке прямоугольной полосы в гладких валках (к табл. 20)

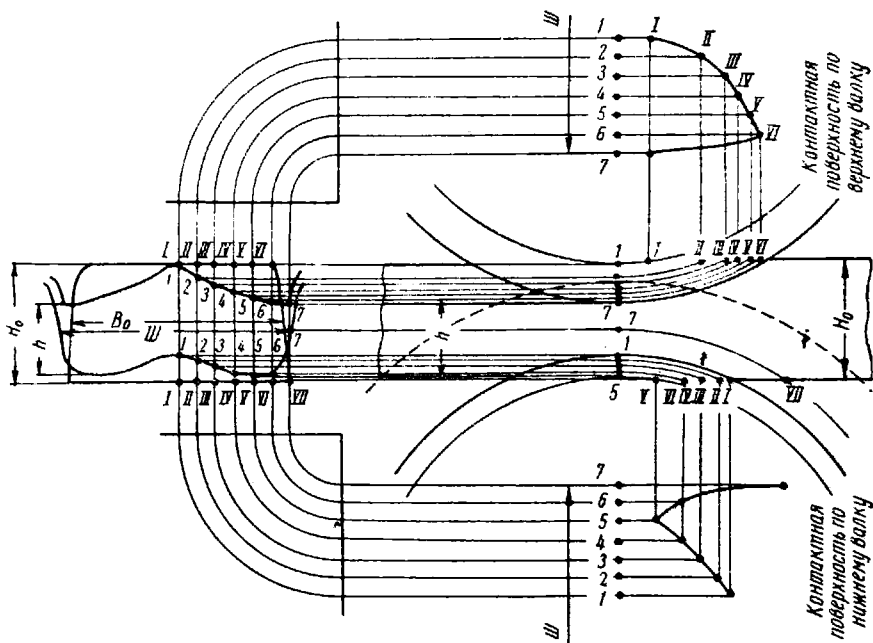


Рис. 47. Графическое определение контактной поверхности металла с валками при прокатке

Геометрические соотношения элементов очага деформации
(см. рис. 46)

Элементы очага деформации	Номер формулы	Формула для расчета	Обозначения и примечания
Длина дуги захвата	(1-IV) (2-IV)	$l_d = R_k \alpha_{\text{рад}}$ $l_d = 3,14 D_k \frac{\alpha^\circ}{360}$	l_d — длина дуги захвата; $\alpha_{\text{рад}}$ — угол захвата; D_k — катающий диаметр валка
Длина хорды дуги захвата	(3-IV)	$l_{\text{хорд}} = \sqrt{R_k \Delta h}$	$\Delta h = h_0 - h_1$ — абсолютное обжатие; $R_k = \frac{D_k}{2}$ — катающий радиус валка
Длина проекции дуги захвата	(4-IV)	$l_x = \sqrt{R_k \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}}$	Для простого процесса прокатки
То же, с учетом упругого сжатия	(5-IV)	$l_x = x_2 + \sqrt{R \Delta h + x_2^2},$ <p>где</p> $x_2 = \frac{8(1-\nu^2)}{\pi E} R p.$ <p>Для стальных валков при $E = 22,0 \cdot 10^4 \text{ Мн/м}^2$ ($2,2 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2$) и $\nu = 0,3$</p> $x_2 \approx \frac{R p}{9500} \text{ мм}$	См. рис. 48. ν — коэффициент Пуассона материала валков; E — модуль упругости; p — удельное давление металла на валки
То же, для случая прокатки в валках разных диаметров (стан Лаута)	(6-IV)	$l_x = \sqrt{\frac{DD'}{D+D'} \Delta h} =$ $= \sqrt{R_{\text{ср}} \Delta h},$ <p>где</p> $R_{\text{ср}} = \frac{DD'}{D+D'}$	D, D' — диаметры большего и меньшего валков
Угол захвата, град.	(7-IV) (8-IV)	$\alpha = \arccos \left(1 - \frac{\Delta h}{D_k} \right);$ $\alpha \approx 57,3 \sqrt{\frac{\Delta h}{R_k}}$	Допускаемые углы захвата (α) по данным А. И. Целикова

Элементы очага деформации	Номер формулы	Формула для расчета	Обозначения и примечания
Угол захвата в валках разного диаметра [37]	(9-IV)	$\alpha_r \cong \frac{2\beta}{1 + \frac{D'}{D}};$ $\alpha_R \cong \frac{2\beta}{1 + \frac{D}{D'}}$	α_r — угол захвата у вала меньшего диаметра D' ; α_R — то же, у вала большего диаметра D ; β — угол трения, f — коэффициент трения (см. табл. 23) ($f = \operatorname{tg} \beta$)
Критический угол, град.	(10-IV)	$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta} \right)$	—
То же, рад	(11-IV)	$\gamma = \frac{1,75 \cdot 10^{-2}}{2} \alpha \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta} \right)$	—
Максимально допустимое линейное обжатие [24]	(12-IV)	<p>Для обжимных, сортовых станов и стана кварто:</p> $\Delta h_{\max} = D_k \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + f^2}} \right)$ <p>Для стана трио Лаута:</p> $\Delta h_{\max} = \frac{D'}{D} (D + D') \times \sin^2 \left(\frac{21 - 2v}{1 + \frac{D'}{D}} \right)$	$\frac{\Delta h_{\max}}{D_k} = f \left(\frac{D'}{D} \right)$ <p>для окружных скоростей валков: 1,5—2,0; 0—2,5—3—3,5 м/сек; $\Delta h_{\max}/D_k$ определяют по номограмме (рис. 51)</p>
Проекция площади контакта на горизонтальную плоскость	(13-IV)	$\Pi_x = b_{\text{ср}} l_x =$ $= \frac{b_0 + b_1}{2} \sqrt{R_k \Delta h}$	l_x — см. формулу (3-IV); b_0, b_1 — ширина полосы до и после прокатки; $b_{\text{ср}}$ — средняя ширина полосы в очаге деформации; R_k — катающий радиус
То же, для валков с разными катающими диаметрами [56]	(14-IV)	$\Pi_x = \frac{b_0 + b_1}{2} \sqrt{\frac{2R_1 R_2}{R_1 + R_2}}$	$\Delta h R_1$ и R_2 — радиусы валков ($R_2 < R_1$)

Элементы очага деформации	Номер формулы	Формула для расчета	Обозначения и примечания
То же, при холодной прокатке	(15-IV)	$P_x = \frac{b_0 + b_1}{2} \times$ $\times (x_2 + \sqrt{R\Delta h + x_2^2})$	См. формулу (5-IV)
То же, [57]	(16-IV)	<p>Для квадрата прокатываемого из овала: $P_x = 0,75b_1 \sqrt{R\Delta h}$</p> <p>Для овала, прокатываемого из квадрата: $P_x = 0,54 (b_0 + b_1) \sqrt{R\Delta h}$</p> <p>Для ромба или квадрата, прокатываемого из ромба: $P_x = 0,67b_1 \sqrt{R\Delta h}$</p>	b_0, b_1 — максимальные значения ширины профиля до и после прокатки
Абсолютное обжатие при равномерной деформации	(17-IV)	$\Delta h = h_0 - h_1$	h_0, h_1 — начальная и конечная толщина
То же, при неравномерной деформации	(18-IV)	$\Delta h_{\text{ср}} = \frac{F_0}{b_0} - \frac{F_1}{b_1}$	F_0, F_1 — начальная и конечная площадь; b_0, b_1 — ширина полосы до и после прокатки
	(19-IV) (20-IV) (21-IV) (22-IV) (23-IV)	<p>Для ромба: $\Delta h_{\text{ср}} = 0,55 \div 0,6 (h_0 - h_1)$</p> <p>Для плоского овала: $\Delta h_{\text{ср}} = h_0 - 0,7h_1$</p> <p>Для круглого овала: $\Delta h_{\text{ср}} = h_0 - 0,85h_1$</p> <p>Для квадрата, прокатываемого из овала: $\Delta h_{\text{ср}} = (0,65 \div 0,7) h_0 -$ $- (0,55 \div 0,6) h_1$</p> <p>Для круга $\Delta h_{\text{ср}} = 0,85 h_0 - 0,79h_1$</p>	

Определить контактную площадь металла с валками, приняв линейное обжатие $\Delta h = h_0 - 0,7h_{\text{ов}}$.

Ответ. $P_x = 635,7 \text{ мм}^2$.

Задача № 70. Вычислить контактную поверхность при прокатке круга $d = 26 \text{ мм}$ из овала размерами $24,4 \times 35,5 \text{ мм}$ и квадрата $25 \times 25 \text{ мм}$ из овала $19,8 \times 49,5 \text{ мм}$. Диаметр валков $D_1 = 300 \text{ мм}$ при прокатке круга и $D_2 = 400 \text{ мм}$ при прокатке квадрата. Линейное обжатие определить по формулам (21-IV) и (22-IV).

Ответ. $P'_x = 853 \text{ мм}^2$; $P''_x = 1430 \text{ мм}^2$.

Задача № 71. Определить контактную площадь при прокатке ромба с размерами диагоналей $170 \times 199,2 \text{ мм}$ из ромба $219,2 \times 190,6 \text{ мм}$. Диаметр валков $D_k = 500 \text{ мм}$.

Ответ. $P_x = 16742 \text{ мм}^2$.

Условия захвата

Производительность прокатных станов, качество прокатанных изделий, особенно из труднодеформируемых сплавов, во многом зависят от условий захвата металла валками. Оптимальные условия захвата металла валками способствуют получению высокой производительности прокатного стана, увеличению температуры конца прокатки с более качественными передним и задним концами раската, позволяющими иметь меньшие отходы при обрезке концов полосы.

Механика захвата металла валками при горячей прокатке металла в валках с гладкой бочкой подробно изложена в работах Иг. М. Павлова [38], А. П. Чекмарева [37] и В. С. Смирнова [31].

Различают четыре случая прокатки, характеризуемые соотношением угла трения с углом захвата (рис. 49).

1. $\beta = \alpha$. В этот момент наблюдается подергивание заготовки и при незначительном вталкивающем усилии Q происходит захват металла валками.

2. $\beta < \alpha$. Захват происходит свободно.

3. $\beta > \alpha$. Захват принудительный, требующий действия вталкивающей силы Q , определяемой по формуле А. П. Чекмарева [37]:

$$Q = \frac{pb_{\text{ср}}R(\alpha - \beta^2)}{\cos \beta}, \quad (24\text{-IV})$$

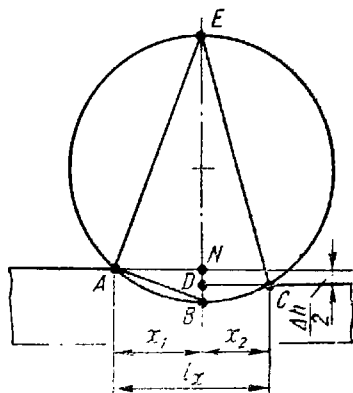


Рис. 48. К определению длины очага деформации с учетом упругого сжатия валков (к табл. 20)

где p — удельное давление;
 R — радиус вала;
 $b_{ср} = \frac{b_0 + b_1}{2}$ — средняя ширина раската;
 $\beta = \arctg f$ — угол трения при захвате;
 f — коэффициент контактного трения

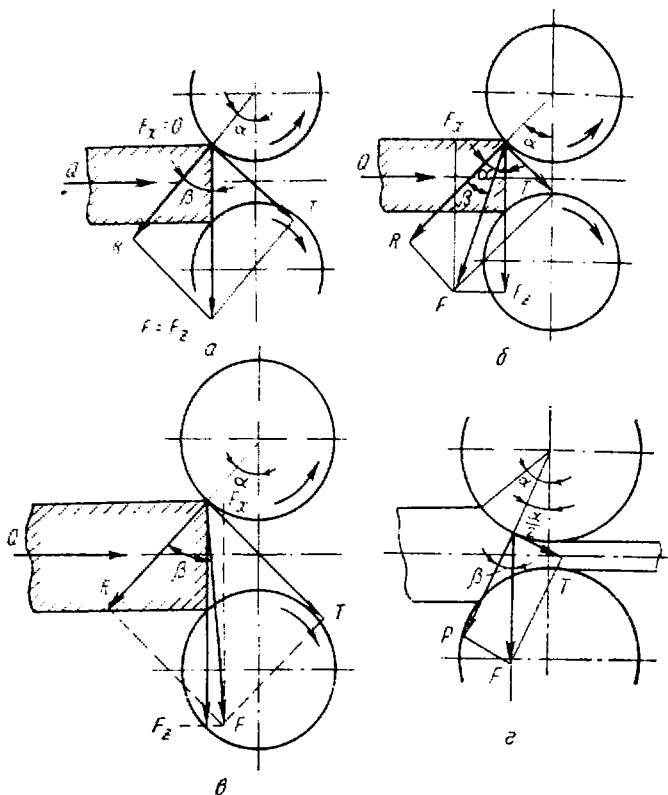


Рис. 49. Схема действия сил при различных условиях захвата:

$$a - \beta = \alpha; \quad б - \beta < \alpha; \quad в - \beta > \alpha; \quad г - \beta = \frac{\alpha}{2}$$

4. $\beta = \alpha/2$. В этом случае процесс прокатки считают установившимся. Равнодействующая давления металла на валок проходит через середину угла захвата.

Условия естественного захвата металла валками при несимметричной прокатке, т. е. в валках разного диаметра, например на стане трио Лаута, определяются неравенствами [37]:

$$\left. \begin{aligned} \beta &\geq (R_1 + R_2) \frac{\alpha_2}{2R_1} \\ \beta &\geq (R_1 + R_2) \frac{\alpha_1}{2R_2} \end{aligned} \right\} \quad (25-IV)$$

где R_1 и R_2 — радиусы валков;
 α_1 и α_2 — углы захвата.

Одновременно с этим по графику рис. 50 необходимо определять предельные обжатия, удовлетворяющие условиям захвата в трехвалковых листовых станах.

Угол захвата α является одним из важных технологических параметров горячей прокатки. Его величина зависит от многих

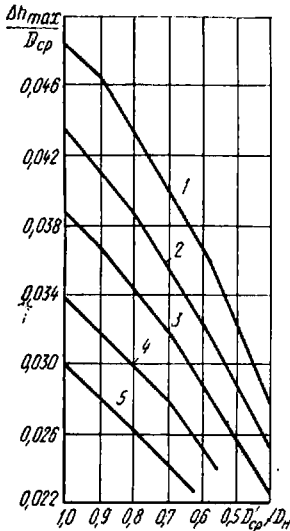


Рис. 50. Предельные обжатия из условий захвата в трехвалковых листовых станах. Скорость прокатки v , м/сек: 1—1,5; 2—2,0; 3—2,5; 4—3,0; 5—3,5

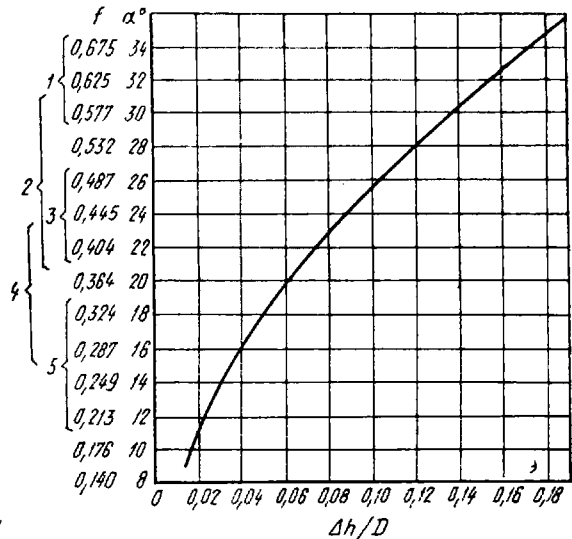


Рис. 51. Зависимость коэффициента захвата $\Delta h/D$ от коэффициента трения f и угла α : 1—5 — номера клеток

факторов, основные из которых: скорость прокатки v , сопротивление деформации прокатываемого металла p , температура металла t , коэффициент контактного трения f .

При расчете основных технологических параметров прокатки, а также при расчете калибровки валков сначала задаются величиной угла захвата α , пользуясь практическими данными. Затем по графику рис. 51 находят отношение $\Delta h/D$ и, при известном катающем диаметре валков D_k , определяют обжатие Δh и коэффициент трения f (см. табл. 23).

Угол захвата на станах горячей прокатки не превышает 26—33° при прокатке на стальных валках и 15—22° — на чугунных отбеленных валках [37]. Применяемые на практике наибольшие углы захвата указаны в табл. 21 [30].

При сравнительно небольших обжатиях, особенно при холодной прокатке, угол захвата рассчитывают по формуле (8-IV). При прокатке в валках разного диаметра угол захвата определяют по формулам (9-IV).

Т а б л и ц а 21

Рекомендуемые углы захвата [30]

Условия прокатки и прокатываемый металл	Угол захвата, град.	$\frac{\Delta h}{D_p}$
Холодная прокатка стали и сплавов без поджатия валков после захвата: со смазкой на хорошо отшлифованных валках без смазки, на грубых валках	3—4	1/700 ÷ 1/400
	6—8	1/250 ÷ 1/100
Горячая прокатка: стальных листов стальных сортовых профилей стальных профилей и на валках с насеченной, рифленной или наваренной поверхностями	18—22	1/20 ÷ 1/15
	22—24	1/15 ÷ 1/12
	27—34	1/9 ÷ 1/6
Горячая прокатка цветных металлов: алюминия при 350° латуни (Л1-82 и Л1-68) при 800° С никеля при 1100° С мельхиора при 950° С меди при 900° С	20—22	1/16 ÷ 1/15
	21—24	—
	22	1/15
	27	1/9
	27	1/9

Т а б л и ц а 22

Допускаемые углы захвата (по данным В. А. Тягунова)

Характеристика бочки валков	Углы захвата, град., при окружной скорости валков, м/сек								
	0*	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4÷7
Гладкая	25,5	24,5	23,5	22,5	19,5	16,0	12,5	12	—
Калиброванная	29	27,5	26	24,5	21	17	13	12	—
С насечкой	33	32	31	30	28	26	24	21	20

* Окружную скорость валков считают равной нулю в момент, когда слиток задается роульгангом в валки (начало вращения рабочих валков).

При определении угла захвата необходимо учитывать величину окружной скорости валков, так как практикой установлено, что с увеличением окружной скорости валков условия захвата металла валками ухудшаются.

В результате обобщения литературных данных и практических наблюдений В. А. Тягунов [24] установил зависимость допускаемых углов захвата от окружной скорости валков и состояния поверхности бочки валков (табл. 22).

Для ознакомления с методикой расчета углов захвата приведем несколько примеров для самостоятельного решения, с помощью табл. 20—23 и данных работы Д. Я. Гуревича [58].

Задача № 72. При прокатке полосы в валках с рабочим диаметром 800 мм получили обжатие $\Delta h = 27$ мм.

Определить угол захвата металла валками.

Ответ. $\alpha = 15^\circ$ (0,262 рад).

Задача № 73. До какой толщины можно обжать полосу толщиной 500 мм в валках диаметром $D_k = 1050$ мм, если коэффициент трения $f = 0,4$, а $\alpha = \beta$?

Ответ. $h_1 = 423,5$ мм.

Задача № 74. На стальных валках с рабочим диаметром 450 мм прокатали заготовку из стали 20 квадратного сечения, со стороной 100 мм. Определить, до какой толщины за один проход и при каком коэффициенте трения f можно прокатать эту заготовку, если $\frac{\Delta h}{D_k} = \frac{1}{12}$ и $\beta = \alpha$.

Ответ. $h_1 = 62,5$ мм; $f \approx 0,44$.

Задача № 75. Прокатали полосу высотой 100 мм. Диаметр валков 600 мм, коэффициент трения $f = 0,2$.

Возможен ли захват и прокатка полосы до толщины 90 мм за один проход?

Ответ. Прокатка возможна, так как $\alpha = 11,5^\circ$ и $\beta = 11,5^\circ$, т. е. $\alpha = \beta$.

Задача № 76. На непрерывном листовом стане 1680 кварто, рабочий диаметр валков которого равен $D_k = 610$ мм, прокатали в холодном состоянии полосу из стали 10Г2А толщиной 2,5 мм с относительным обжатием 28%. Определить угол захвата α и конечную толщину полосы h_1 .

Ответ. $h_1 = 1,8$ мм; $\alpha = 3^\circ$ (0,0524 рад).

Задача № 77. На трехвалковом стане Лаута 750/350/750 прокатали полосу из кованой сутунки из сплава ЭИ602 толщиной $h_0 = 45$ мм во втором проходе с обжатием $\Delta h = 5,8$ мм. Коэффициент контактного трения $f = 0,45$. Определить средний угол захвата $\alpha_{ср}$.

Решение. Задачу решают по формуле (9-IV). Угол захвата равен $\alpha_1 = 32^\circ 4'$ у валка с меньшим диаметром $D_1 = 350$ мм и $\alpha_2 = 15^\circ 10'$ у валка с большим диаметром $D_2 = 0,75$ м.

Средний угол захвата

$$\alpha_{ср} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = \frac{32^\circ 4' + 15^\circ 10'}{2} = 23^\circ 37'.$$

2. КОНТАКТНОЕ ТРЕНИЕ

При прокатке металла контактное трение имеет большое значение. Одновременно с полезным действием трения на процесс прокатки металла следует отметить затруднения в технологии изготовления изделий, которые возникают в результате действия контактного трения

При действии сил трения металл деформируется неравномерно, что приводит к разнородности его структуры, возникновению растягивающих напряжений в металле, которые иногда приводят к нарушению сплошности изделия. Под влиянием сил трения в ряде

случаев усилие деформации возрастает в несколько раз по сравнению с тем усилием, которое обусловлено истинным сопротивлением металла деформации. От характера и величины сил трения зависит степень износа инструмента (валки, бойки) и качество поверхности изделия.

Для облегчения решения задач по определению коэффициента трения все основные формулы сведены в табл. 23, а необходимые вспомогательные данные представлены в табл. 24—28.

Ниже приведено несколько примеров по определению коэффициента внешнего или контактного трения.

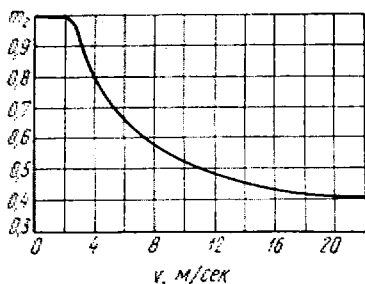


Рис. 52. Значения m_2 для расчетов коэффициента трения по уравнению Б. П. Бахтинова (к табл. 23)

Задача № 78 [37]. Прокатили сталь марки 08кп на стальных валках диаметром $D_k = 800$ мм. Поверхность валков — изношенная. Твердость поверхности валков 45 ед. по Шору. Окружная скорость валков $v_b = 3$ м/сек. Температура металла $t = 1100^\circ \text{C}$. Толщина полосы до прокатки $h_0 = 60$ мм, обжатие $\Delta h = 20$ мм. Ширина полосы до прокатки $b_0 = 150$ мм.

Рассчитать коэффициент контактного трения f , пользуясь данными, приведенными в табл. 23.

Решение. По формуле Экелунда с поправками Б. М. Бахтинова и М. М. Штернова (27-IV) коэффициент контактного трения при захвате

$$f = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 (1,05 - 0,0005t).$$

По данным табл. 24, $m_3 = 1,0$; из рис. 52 $m_2 = 0,9$; по данным, приведенным ниже, $m_1 = 1$.

Значения коэффициента m_1 в уравнении С. Экелунда [37] в зависимости от материала валков и их состояния:

	m_1
Новые стальные	1,1
Стальные с сеткой разгара	1,1—1,2
Новые чугунные полутвердые	0,8—0,9
Чугунные с сеткой разгара	1,0—1,1
Чугунные сортовые, чисто обточенные с отбеленной поверхностью	0,8
Чугунные листовые шлифованные	0,65—0,75
Стальные, термически обработанные, шлифованные (для лабораторных станов)	0,7—0,9

Тогда

$$f = 1,0 \cdot 0,9 \cdot 1,0 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot 1100) = 0,45.$$

По формуле Ш. Гелеи (29-IV):

$$f = 1,05 - 0,0005t - 0,056v =$$

$$= 1,05 - 0,0005 \cdot 1100 - 0,056 \cdot 3 = 0,332.$$

**Формулы для определения коэффициента внешнего трения
при прокатке**

Номер формулы	Формулы	Источ-ник	Обозначения и примечания
(26-IV)	Горячая прокатка $f = m_1 (1,05 - 0,0005t)$	[30]	<i>Формула Эклунда</i> Пригодна для расчета при захвате низкоуглеродистой стали при окружной скорости $v = 0,2 - 0,3$ м/сек. Для стальных валков $m_1 = 1$, а для отбеленных валков $m_1 = 0,8$
(27-IV)	$f = m_1 m_2 m_3 (1,05 - 0,0005t)$	[59]	Значения m_1 см. на с. 124, m_2 — см. рис. 52, m_3 — см. табл. 24
(28-IV)	При прокатке в стальных валках $f = 1,05 - 0,0005t - 0,056v$ При прокатке в чугунных валках $f = 0,92 - 0,0005t - 0,056v$ При прокатке в шлифованных стальных или чугунных валках $f = 0,82 - 0,0005t - 0,056v$	[33]	<i>Формулы Ш. Гелли</i> , действительны при окружной скорости валков $v < 5$ м/сек и температуре прокатки $t > 700^\circ \text{C}$
(29-IV)	$f_y = f_u \cdot k_t \cdot k_{III} \cdot k_v \cdot k_n \cdot k_C$	[37]	<i>Формула А. П. Чекмарева и В. А. Николаева</i> , где f_u — коэффициент трения установившегося процесса прокатки при $k_t = k_v = k_C = k_n = 1$ в функции угла захвата α и параметра l/H_{cp} (см. рис. 53)
(30-IV)	$f = \text{tg } \beta$, где β — угол трения	—	$\frac{l}{H_{cp}} = \frac{\sqrt{R\Delta h}}{\sqrt{Hh}};$ $\alpha = \frac{l}{R} = \frac{\sqrt{R\Delta h}}{R}$
(31-IV)	Холодная прокатка $f_x = k_M \left[0,07 - \frac{0,1v_B^2}{2(1+v_B) + 3v_B^2} \right]$	[60]	<i>Формула А. П. Грудева</i> . v_B — окружная скорость валков; k_M — коэффициент, учитывающий влияние смазки (см. табл. 25)

По формуле Чекмарева и В. А. Николаева

$$f_y = f_u \cdot k_t \cdot k_{ш} \cdot k_C \cdot k_v \cdot k_n$$

Из рис. 53 и 54 можно определить все коэффициенты данного уравнения.

При расчете f_u из рис. 53 сначала определяют значения:

$$\frac{l_d}{H_{cp}} = \frac{\sqrt{R \Delta h}}{\sqrt{Hh}} = \frac{\sqrt{400 \cdot 20}}{\sqrt{60 \cdot 40}} = \frac{89,5}{49,0} = 1,83$$

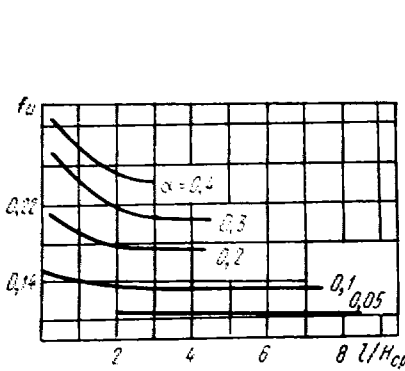


Рис. 53. Изменение исходного коэффициента трения f_u в зависимости от параметров l/H_{cp} и α (к табл. 23)

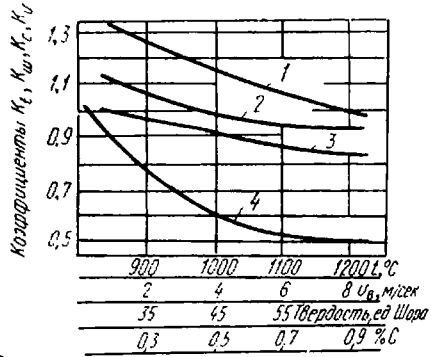


Рис. 54. Изменение поправочных коэффициентов в зависимости от соответствующих факторов (к табл. 23):
 1 — $k_t = F(t)$; 2 — $k_{ш} = F$ (твердость по Шору); 3 — $k_C = F(\% C)$; 4 — $k_v = F(v)$

и

$$\alpha = \frac{l}{R} = \frac{89,5}{400} = 0,223$$

Тогда $f_u = 0,19$. Коэффициенты k_t , $k_{ш}$, k_C и k_v находят из рис. 54. Коэффициент k_n берем из следующих данных.

Значения коэффициента k_n , учитывающего состояние поверхности валков [37]:

Валки грубошлифованные	k_n
Валки грубообработанные с налипшим металлом . . .	1,0
Валки с насечкой или накаткой	1,3
	1,5

Тогда

$$f_y = f_u \cdot k_t \cdot k_{ш} \cdot k_C \cdot k_v \cdot k_n =$$

$$= 0,19 \cdot 1,07 \cdot 0,99 \cdot 1,0 \cdot 0,69 \cdot 1,5 = 0,21$$

Задача № 79. На одноклетевом стане кварто прокатали ленту из нержавеющей стали в холодном состоянии со скоростью $v = 3$ м/сек.

Валки стальные, смазываются эмульсией. Определить коэффициент трения f_x .

Таблица 24

Значения коэффициента m_s в уравнении С. Эжелунда [61]

Стали	Типичная марка	m_s
Углеродистые Ледебуритные Перлитно-мартенситные	Ст. 1	1,00
	P18, X12	1,10
Аустенитные	ШХ15	1,30
	X13N4Г9 (ЭИ100)	1,40
Аустенитные с включениями феррита или ледебурита	1X18N10T	1,44
	1X17Ю5 (ЭИ431)	1,55
Ферритные		
Аустенитные с включениями карбидов	X15N60	1,62

Таблица 25

Влияние смазки на коэффициент трения [60]

Вид смазки	Средняя величина коэффициента трения $f_{уст}$	k_m
Сухие валки (чистые)	0,086	1,55
Машинное масло	0,075	1,35
Веретенное масло	0,070	1,25
Вода	0,058	1,0
Эмульсия (10%-ная)	0,056	1,0
Керосин	0,053	1,0
Хлопковое масло	0,057	0,9
Касторовое	0,050	0,9
Пальмовое	0,048	0,9

Решение. Расчет проводят по формуле А. П. Грудева (31-IV) [60]:

$$f_x = 0,07 - \frac{0,1 \cdot 3^2}{2(1+3) + 3 \cdot 3^2} = 0,07 - 0,0257 = 0,0443.$$

По опытным данным А. П. Грудева (табл. 25 и 26) [60] при прокатке нержавеющей стали с применением машинного масла и при скорости прокатки 0,3 м/сек коэффициент трения $f_x = 0,075$.

По формуле А. П. Грудева, приняв условия опытной прокатки, получим

$$f_x = 1,35 \left[0,07 - \frac{0,1 \cdot 0,3^2}{2(1+0,3) + 3(0,3)^2} \right] = 0,0905.$$

Таблица 26

Влияние смазки и скорости прокатки на коэффициент трения при холодной прокатке

Смазка	Скорость прокатки, м/сек			
	< 3	< 10	< 20	> 20
Эмульсия	0,14	0,12—0,10	—	—
Минеральное масло	0,12—0,10	0,10—0,09	0,08	0,06
Пальмовое масло	0,08	0,06	0,05	0,03

Полученное расхождение опытных данных с расчетными дает основание формулу А. П. Грудева считать неточной и пригодной только для предварительных расчетов.

3. ПРОДОЛЬНОЕ ТЕЧЕНИЕ МЕТАЛЛА В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ

Направления течения металла при прокатке показаны на рис. 55. В очаге деформации можно отметить четыре основные зоны течения металла: зона I — направление движения частиц металла совпадает с направлением прокатки, причем скорость их больше, чем скорость валков (опережение); зона II — движение частиц металла противоположно направлению прокатки со скоростью, меньшей, чем скорость валков (отставание); зоны III и IV — наблюдается течение металла в поперечном направлении (зоны уширения).

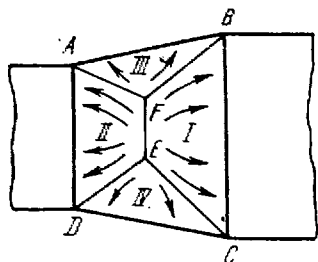


Рис. 55. Направления течения металла при прокатке

Границей между зонами I и II, т. е. между зонами опережения и отставания, является линия Ef , которая считается горизонтальной проекцией так называемого нейтрального сечения, в котором горизонтальная скорость течения металла v_h и валков v_b равны между собой.

Ниже рассмотрены методы количественного определения опережения и отставания частиц металла в очаге деформации без разбора теоретических вопросов кинематики процесса прокатки, которые подробно изложены в работах [31, 37, 62].

Наибольшее различие между скоростями металла и валков наблюдается на входе в очаг деформации. В нейтральном сечении скорости металла и валков равны. По мере продвижения металла к выходу из очага деформации, после прохождения нейтрального сечения, частицы металла перемещаются со скоростью большей, чем скорость вращения валков:

$$v_{h_1} > v_b > v_{h_0}, \quad (32-IV)$$

где v_{h_1} — скорость выхода металла из очага деформации;

v_b — окружная скорость валков;

v_{h_0} — скорость металла при захвате его валками.

Для лучшего усвоения формул, перечисленных в табл. 27, приведем несколько решений технических задач по определению кинематических условий процесса прокатки.

Задача № 80 [62]. Прокатка полосы в валках происходит при следующих условиях: угол захвата $\alpha = 20^\circ$, окружная скорость валков $v_b = 2$ м/сек, горизонтальная скорость полосы при

Формулы по кинематике процесса прокатки

Номер формулы	Формулы	Источ-ник	Обозначения и примечания
(33-IV)	$v_B = \frac{\pi D_K n}{60}$	—	v_B — окружная скорость валков, D_K — катающий диаметр валка; n — число оборотов валков
(34-IV)	$v_\gamma = v_B \cos \gamma$	—	v_γ — горизонтальная проекция скорости частиц металла в критическом сечении
(35-IV)	$\cos \gamma = \frac{D_K + h_1}{2D_K} \pm$ $\pm \sqrt{\left(\frac{D_K + h_1}{2D_K}\right)^2 - \frac{v_{h_1}}{v_B} \frac{h_1}{D}}$ <p>Это уравнение дает возможность рассчитать величину критического угла γ, по величине опережения S;</p> $S = \frac{v_{h_1}}{v_B} - 1$	[62]	γ — критический угол; v_{h_1} — скорость полосы при выходе из очага деформации; h_1 — толщина полосы после прокатки. Критический угол γ определяют по формуле (10-IV), приведенной в табл. 20
(36-IV)	$\frac{v_{h_1}}{v_{h_0}} = \frac{F_{h_0}}{F_{h_1}} = \mu$	[62]	μ — коэффициент вытяжки; F_{h_0} и F_{h_1} — площадь сечения полосы до и после прокатки; v_{h_0} и v_{h_1} — скорость полосы при входе и выходе из валков
(37-IV)	$v_x = v_{h_1} \frac{h_1}{D_K (1 - \cos \delta) + h_1}$	[62]	v_x — скорость течения металла в любом сечении очага деформации, δ — произвольный угол захвата

Номер формулы	Формулы	Источник	Обозначения и примечания
(38-IV)	$S = \frac{v_{h_1} - v_B}{v_B}$	[62]	S — опережение; L_{h_1} , L_B — расстояние между отпечатками на полосе и на валке;
(39-IV)	$S = \frac{L_{h_1} - L_B}{L_B}$	[62]	$\alpha = 13 \cdot 10^{-6}$ — коэффициент теплового расширения стали
(40-IV)	$L_h = L_x (1 + \alpha t)$		
(41-IV)	$1 + S = \frac{v_{h_1}}{v_B}$ $1 + S_{h_0} = \frac{\mu \cos \alpha}{1 + S}$	[37]	$1 + S$ — коэффициент опережения; $1 + S_{h_0}$ — коэффициент отставания
(42-IV)	$\frac{v_M - v_B}{v_B} = \frac{v_{zM} - v_{zB}}{v_{zB}} =$ $= \frac{v_{xM} - v_{xB}}{v_{xB}}$	[62]	Справедливо для зоны опережения; v_x и v_z — составляющие скорости валков и металла
(43-IV)	$\frac{v_B - v_M}{v_M} = \frac{v_{zB} - v_{zM}}{v_{zM}} =$ $= \frac{v_{xB} - v_{xM}}{v_{xM}}$	[62]	Справедливо для зоны отставания
(44-IV)	$v_0 \cdot F_0 = v_{h_1} \cdot F_{h_1},$ где $v_h = v_B (1 + S)$	[62]	Используют при определении чисел оборотов валков непрерывных станов
(45-IV)	$S'_{h_0} = \frac{D}{h_0} (\cos \gamma - \cos \alpha) \times$ $\times 100, \%$	—	S'_{h_0} — скольжение в первой зоне очага деформации
(46-IV)	$S''_{h_0} = \frac{\mu \cos \alpha}{1 + S} - 1$	[37]	S''_{h_0} — отставание
(47-IV)	$S = \frac{[D(1 - \cos \gamma) + h_1] \cos \gamma}{h_1} - 1$	[31]	Уравнение Финка
(48-IV)	$S = \left(\frac{R}{h_1} - 0,5 \right) \gamma^2$	[30]	Уравнение А. И. Целикова

Номер формулы	Формулы	Источник	Обозначения и примечания
(49-IV)	$S = \gamma^2 \frac{R}{h_1} \cdot 100, \%$	—	Уравнение Дрездена, или упрощенное уравнение Финка. Пригодна для случая прокатки тонких полос, когда R значительно больше h
(50-IV)	$S_{\Delta b} = C_0 \left\{ \frac{[D(1 - \cos \gamma) + h_1] \cos \gamma}{h_1} - 1 \right\}$	—	Уравнение Иг. М. Павлова, где C_0 — коэффициент, зависящий от γ/α и $\beta = b_1/b_0$. Значения этого коэффициента приведены в работе [35] с. 381
(51-IV)	$S_{\Delta b} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma}{\alpha} \right) f \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} + \frac{1}{1 - \frac{\mu - 1}{\mu} (\gamma/\alpha)^2} - 1$	[63]	Уравнение Б. П. Бахтинова для определения опережения с учетом уширения
(52-IV)	$S = \frac{(D_K - h) \Delta h}{16 D_K h_1} \times \left(2 - \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{2 \Delta h}{D_K}} \right)^2$	[64]	Формула Финка, преобразованная М. М. Штерновым
(53-IV)	$u_{cp} = \frac{v_{h_1}}{l_x} \cdot \frac{\Delta h}{h_0};$ $l_x \approx \sqrt{R \Delta h}$	[30]	Уравнение скорости деформации, полученное А. И. Целиковым

Условия непрерывной прокатки

(54-IV)	$v_1 F_1 = v_2 F_2 = \dots = v_n F_n = \text{const}$	[59]	$C = F D n (1 + S)$ — постоянная калибровки
(55-IV)	$F_1 D_1 n_1 (1 + S_1) = F_2 D_2 n_2 (1 + S_2) = \dots = F_n D_n n_n (1 + S_n) = C$		
(56-IV)	$\frac{v_2 (1 + S_2) F_2}{v_1 (1 + S_1) F_1} >$		
(57-IV)	$v_n = \frac{v_{n+1}}{\mu}$	—	μ — коэффициент вытяжки в клетѣ

входе в валки $v_{л_0} = v_{x_м} = 1,6$ м/сек. Определить скольжение в разных направлениях в момент захвата металла валками.

Решение. По формулам табл. 27 определим скольжения: горизонтальное

$$S_x = \frac{v_{xв} - v_{xм}}{v_{xв}} = \frac{v_b \cos \alpha - 1,6}{v_b \cos \alpha} = \frac{2 \cos 20^\circ - 1,6}{2 \cos 20^\circ} =$$

$$= \frac{2 \cdot 0,93969 - 1,6}{2 \cdot 0,93969} = 0,14865, \text{ или } 14,865 \%,$$

вертикальное

$$S_z = \frac{v_{zв} - v_{zм}}{v_{zв}} = \frac{v_b \sin \alpha - v_{xм} \operatorname{tg} \alpha}{v_b \sin \alpha} = \frac{2 \sin 20^\circ - 1,6 \operatorname{tg} 20^\circ}{2 \sin 20^\circ} =$$

$$= \frac{2 \cdot 0,34202 - 1,6 \cdot 0,36397}{0,68404} = 0,14865, \text{ или } 14,9 \%,$$

и касательное

$$S = \frac{v_b - v_m}{v_b} = \frac{2 - \frac{v_{xм}}{\cos \alpha}}{2} = \frac{2 - \frac{1,6}{\cos 20^\circ}}{2} =$$

$$= \frac{2 - \frac{1,6}{0,93969}}{2} = \frac{2 - 1,7027}{2} = 0,14865, \text{ или } 14,865 \%.$$

Скольжение оказалось одинаковым во всех трех направлениях. Следовательно, для определения скольжения достаточно знать величину скорости в одном из трех направлений.

Задача № 81. Определить величину скольжения и опережения при прокатке полосы в один проход при следующих данных: толщина полосы до прохода $h_0 = 100$ мм, после прохода $h_1 = 70$ мм. Катающий диаметр валков $D_k = 650$ мм, окружная скорость валков $v_b = 2$ м/сек.

Решение. Скольжение определяем по формуле (45-IV).

Предварительно определяем следующие величины:

$$\cos \alpha = \frac{D_k - (h_0 - h_1)}{D_k} = \frac{650 - (100 - 70)}{650} = 0,955,$$

или $\alpha = 17^\circ 20'$; критический угол по формуле (10-IV), считая, что $\beta = \alpha_{\max}$, равен

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta} \right) = \frac{17^\circ 20'}{2} \left(1 - \frac{17^\circ 20'}{2 \cdot 17^\circ 20'} \right) = 8^\circ 40' \left(1 - \frac{1}{2} \right) = 4^\circ 20';$$

скольжение

$$S_H = \frac{D_k}{h_0} (\cos \gamma - \cos \alpha) = \frac{650}{100} (\cos 4^\circ 20' - \cos 17^\circ 20') =$$

$$= 6,5 (0,99714 - 0,955) = 0,2739, \text{ или } 27,39 \%.$$

Опережение в этом случае по формуле (47-IV)

$$S = \frac{\cos \gamma [D(1 - \cos \gamma) + h_1]}{h_1} =$$

$$= \frac{0,99714 [650(1 - 0,9974) + 70]}{70} - 1 = 0,024, \text{ или } 2,4\%.$$

Задача № 82 [62]. Определить максимальную длину петли (рис. 56) между клетями № 2 и 3, расположенными в одну линию, если известны масса мотка $Q = 80 \text{ кг}$ и плотность стали $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$. Время паузы для передачи полосы из клетки № 2 в клетку № 3 $t = 0,25 \text{ сек.}$ Диаметры валков $D_2 = 260 \text{ мм}$ и $D_3 = 265 \text{ мм}$. Число оборотов валков $n_2 = n_3 = 600 \text{ об/мин.}$ Толщина полосы до прохода в клетку № 2 $H_2 = 7,5 \text{ мм}$, после прохода $h_2 = 7 \text{ мм}$, а до прохода в клетку № 3 $H_3 = 7 \text{ мм}$, после прохода $h_3 = 6 \text{ мм}$. Сечение проволоки перед задачей в клетку № 3 $q = 40 \text{ мм}^2$, коэффициент трения $f_2 = f_3 = 0,25$. Задача предлагается для самостоятельного решения.

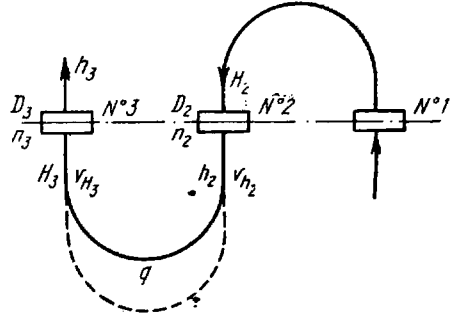


Рис. 56. К расчету длины петли при прокатке проволоки

Определяют параметры прокатки: рабочие диаметры в клетях № 2 и 3 с учетом того, что

$D'_2 = D_2 - \frac{h_2}{2}$ и $D'_3 = D_3 - \frac{h_3}{2}$, окружные скорости валков v_2 и v_3 , углы захвата α_2 и α_3 , угол трения β , критические углы γ_2 и γ_3 .

Затем определяют скорости металла на выходе из клеток № 2 и 3 v_{h_2} и v_{H_3} с учетом опережения:

$$v_{h_2} = v_2 \frac{[D'_2(1 - \cos \gamma_2) + h_2]}{h_2} \cos \gamma_2;$$

$$v_{H_3} = v_3 \frac{[D'_3((1 - \cos \gamma_3) + h_3)]}{h_3} \cos \gamma_3.$$

Определяют длину мотка после клетки № 2:

$$L_2 = \frac{Q}{\rho q}. \quad (58-IV)$$

Находят максимальную длину петли:

$$L_{\max} = L_2 \left(1 - \frac{v_{H_3}}{v_{h_2}} \right) + tv_{H_3}. \quad (59-IV)$$

Ответ. В условиях прокатки проволоки в двух клетях максимальная длина петли равна $L_{\max} = 32,5$ м.

Задача № 83. Определить отношение числа оборотов валков двух клетей непрерывного стана при прокатке блума. Дано: $H_2 = 200$ мм; $D_2 = 600$ мм, $H_3 = h_3 = 160$ мм, $D_3 = 620$ мм, $h_3 = 120$ мм, $f_2 = 0,42$, $f_3 = 0,47$. Рабочие диаметры $D_2' = 440$ мм и $D_3' = 500$ мм.

Решение. Натяжение металла между клетями и продольное сжатие полосы при прокатке на непрерывном стане не наблюдается, когда $v_{h_2} = v_{h_3}$.

Из этого условия, как доказано Иг. М. Павловым и Я. С. Галлаем [62], следует, что:

$$\frac{n_2}{n_3} = \frac{R_3'}{R_2'} \cdot \frac{h_3 + R_3' \gamma_3^2}{h_2 + R_2' \gamma_2^2}. \quad (60-IV)$$

Рассчитывая по известным формулам, получим: $\alpha_2 = 24^\circ 36'$; $\alpha_3 = 23^\circ$; $\beta_2 = 24^\circ 45'$; $\beta_3 = 25^\circ 10'$; $\gamma_2 = 6^\circ 13'$; $\gamma_3 = 6^\circ 15'$; $R_2' = 220$ мм; $R_3' = 250$ мм. Подставляя значения этих величин в формулу (60-IV) получим:

$$\frac{n_2}{n_3} = \frac{250}{220} \cdot \frac{120 + 250 (0,109)^2}{160 + 220 (0,1085)^2} = 1,135 \cdot \frac{123}{162,6} = 0,86.$$

Задача № 84. При 1000° С в стальных валках с катающим диаметром $D_k = 0,6$ м прокатали полосу из стали марки Ст.5 размерами $120 \times 150 \times 4000$ мм на полосу с $90 \times 160 \times 5000$ мм. Скорость валков $v_b = 2,5$ м/сек. Определить кинематические параметры прокатки: опережение S , отставание S_H скорость входа v_{h_0} и выхода v_{h_1} металла из валков и скорость деформации u_c .

Решение. По формуле Экелунда — Бахтинова коэффициент трения равен $f = 0,55$, а $\beta = 0,503$ рад. Опережение по формуле Финка — Штернова (52-IV)

$$S = \frac{(D_k - h_1) \Delta h}{16 D_k h_1} \left(2 - \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{2 \Delta h}{D_k}} \right)^2 =$$

$$= \frac{(0,6 - 0,09) \cdot 0,03}{16 \cdot 0,6 \cdot 0,09} \left(2 - \frac{1}{0,503} \sqrt{\frac{2 \cdot 0,03}{0,6}} \right)^2 = 0,0335, \text{ или } 3,35\%.$$

По формуле Б. П. Бахтинова (51-IV) при $\frac{\gamma}{2} = 0,342$ и $\mu = 1,25$

$$S_{\Delta b} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma}{\alpha} \right) f \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} + \frac{1}{1 - \frac{\mu - 1}{\mu} \left(\frac{\gamma}{\alpha} \right)^2} - 1 =$$

$$= \frac{1}{3} \cdot 0,342 \cdot 0,55 \sqrt{\frac{30}{300}} + \frac{1}{1 - \left(\frac{1,25 - 1}{1,25} \right) (0,342)^2} - 1 =$$

$$= 0,0437, \text{ или } 4,37\%.$$

Скорость выхода полосы из валков

$$v'_h = v_b (1 + S_{\Delta b}) = 2,5 \cdot 1,0437 = 2,61 \text{ м/сек.}$$

Скорость входа полосы в валки

$$v'_{h_0} = \frac{v_h}{\mu} = \frac{2,61}{1,25} = 2,088 \text{ м/сек.}$$

Если принять данные, полученные при расчете опережения по формуле Финка — Штернова, то

$$v'_{h_1} = 2,5 \cdot 1,0335 = 2,584 \text{ м/сек и } v'_{h_0} = \frac{2,584}{1,25} = 2,067 \text{ м/сек.}$$

Коэффициент отставания по формуле (41-IV)

$$1 + S_0 = \frac{\mu \cos \alpha}{1 + S} = \frac{1,26 \cdot \cos 18,2^\circ}{1 + 0,0335} = 1,149.$$

Тогда $S_{h_0} = 0,149$, или 14,9%.

Явление отставания имеет меньшее практическое значение при прокатке, чем опережение.

Скорость деформации металла по формуле А. И. Целикова (54-IV)

$$u_{cp} = \frac{2584 \cdot 30}{93,6 \cdot 120} = 6,9 \text{ сек}^{-1},$$

по формуле Б. П. Бахтинова

$$u_{cp} = \frac{v_{h_1} - v_{h_0}}{l_x} = \frac{2610 - 2088}{93,6} = 5,57 \text{ сек}^{-1}.$$

Задача № 85. Определить скорость прокатки в клетки № 9 непрерывного четырнадцатиклетового стана 300, имеющего четыре клетки с вертикальным расположением валков, если известно, что из клетки № 10 с валками диаметром $D_{10} = 330 \text{ мм}$ при $n_{10} = 400 \text{ об/мин}$ выходит полоса размерами $81 \times 6 \text{ мм}$ при $t_{10} = 900^\circ\text{C}$. Толщина полосы по выходе из клетки № 9 $h_9 = 8 \text{ мм}$ при $t_9 = 925^\circ\text{C}$. Материал валков — чугуи. Материалы полосы Ст. 1.

Решение. По известным уравнениям получили для клетки № 10: скорость прокатки $v_{10} = 6,9 \text{ м/сек}$, обжатие $\Delta h_{10} = 2 \text{ мм}$, поперечное сечение $F_{10} = 486 \text{ мм}^2$.

Для определения площади сечения в клетки № 9 необходимо знать уширение в клетки № 10 Δb_{10} . Тогда $b_9 = b_{10} - \Delta b_{10}$.

Перед определением Δb_{10} по формуле (27-IV) определяем коэффициент трения $f = 0,29$. Затем по уравнению (63-IV) определяем $\Delta b_{10} = 2,1 \text{ мм}$. Тогда:

$$b_9 = 81 - 21 = 78,9 \text{ мм. Площадь } F_9 = 630 \text{ мм}^2.$$

По формуле (56-IV) определяем константу $C = F_{10} \cdot D_{10} \cdot n_{10} = 486 \cdot 330 \cdot 400 = 640 \cdot 10^5$.

Число оборотов

$$n_9 = \frac{C}{F_9 D_9} = \frac{640 \cdot 10^6}{630 \cdot 330} = 307 \text{ об/мин.}$$

Скорость прокатки $v_9 = 5,3 \text{ м/сек.}$

Задача № 86. Из валков клетки № 11 непрерывного листового стана 1700 выходит лист из стали марки Ст.3 толщиной $h_{11} = 1,5 \text{ мм}$ со скоростью (с учетом опережения) $v_{11} = 12,5 \text{ м/сек.}$ Определить скорость прокатки металла в клетях № 10, 9, 8, 7 и 6, если известны соответствующие коэффициенты вытяжки: $\mu_{11} = 1,133$; $\mu_{10} = 1,35$; $\mu_9 = 1,44$; $\mu_8 = 1,58$ и $\mu_7 = 1,73$. При решении пользуются формулой (57-IV).

Ответ. $v_{11} = 12,5 \text{ м/сек.}$; $v_{10} = 11 \text{ м/сек.}$; $v_9 = 8,2 \text{ м/сек.}$; $v_8 = 5,7 \text{ м/сек.}$; $v_7 = 3,6 \text{ м/сек.}$; $v_6 = 2,10 \text{ м/сек.}$

4. ПОПЕРЕЧНОЕ ТЕЧЕНИЕ МЕТАЛЛА В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ (УШИРЕНИЕ)

В третьей и четвертой областях очага деформации (см. рис. 55) металл течет в поперечном направлении. Деформация металла в поперечном направлении называется уширением.

Подробно природа всех видов уширения (свободного, ограниченного и вынужденного) рассмотрена в работах [30, 31, 37].

Для усвоения аналитических методов определения уширения ниже приведены решения нескольких примеров, в которых используются формулы из табл. 28 и данные табл. 29 и 30.

Задача № 87. Определить уширение металла при следующих условиях прокатки: материал полосы — Ст.5, температура прокатки 1000°C , размеры полосы до прокатки $h_0 \times b_0 \times l_0 = 120 \times 150 \times 4000 \text{ мм}$ и $h_1 \times b_1 \times l_1 = 90 \times 160 \times 5000 \text{ мм}$ — после прокатки. Известны $D_k = 600 \text{ мм}$ и $n_9 = 80 \text{ об/мин.}$

Решение. По формуле Жеза (61-IV):

$$1) \Delta h = h_0 - h_1 = 120 - 90 = 30 \text{ мм.}$$

$$2) \Delta b = (0,35 \div 0,48) \cdot 30 = 10,5 \div 14,5 \text{ мм.}$$

По формуле Зибеля (62-IV):

$$\Delta b = (0,35 \div 0,45) \frac{30}{120} \sqrt{300 \cdot 30} = 8,3 \div 10,8 \text{ мм.}$$

По формуле Б. П. Бахтинова (63-IV):

$$\Delta b = 1,15 \cdot \frac{3}{2 \cdot 120} \left(\sqrt{300 \cdot 30} - \frac{30}{2 \cdot 0,55} \right) = 9,7 \text{ мм.}$$

По формуле С. Экелунда (64-IV):

Формулы для определения уширения

Номер формулы	Формулы	Источник	Обозначения и примечания
(61-IV)	$\Delta b = m \Delta h$	[61]	Формула Жеза. m — коэффициент, учитывающий влияние химического состава стали на уширение (см. табл. 29)
(62-IV)	$\Delta b = (0,35 \div 0,45) \times \frac{\Delta h}{h_0} \sqrt{R \Delta h}$	[7]	Формула Зибеля
(63-IV)	$\Delta b = 1,15 \frac{\Delta h}{2h_0} \times \left(\sqrt{R \Delta h} - \frac{\Delta h}{2f} \right)$	[59]	Формула Б. П. Бахтинова
(64-IV)	где $\Delta b = b - b_0$, $b = -A + \sqrt{A^2 + b_0^2 + 4ml_x(3h_0 - h_1)}$; $l_x = \sqrt{R \Delta h}$; $m = \frac{1,6fl_x - 1,2\Delta h}{h_0 + h_1}$; $A = 2m(h_0 + h_1) \frac{l_x}{b_0}$	[65]	Формула С. Эжелунда. b_0 и b — ширина полосы зон после прокатки
(65-IV)	где $\Delta b = (\beta - 1) b_0$, $\lg \beta = \lg \frac{1}{\eta} \cdot \frac{k'}{1 + \frac{A}{k_1}}$; $A = \left(\frac{b_0}{l_x} \right)^{4f}$	[35]	Формула И. Я. Тарновского $\eta = \frac{h}{h_0}$; f_1 — коэффициент трения; k_1' — коэффициент, учитывающий влияние внешних недеформируемых зон; $k_1' = \varphi(A)$ (см. табл. 30); k_1 — коэффициент, учитывающий влияние инструмента (см. рис. 58)

Таблица 29

Значения коэффициента m , учитывающего влияние химического состава стали на уширение [61]

Сталь	m	Сталь	m	Сталь	m
Ст.1	1,0	38ХМЮА	1,35	X18H25C2	1,44
У7А	1,24	X10С2М	1,35	X23H13	1,53
ШХ15	1,29	4X14H14B2M	1,36	1X17Ю5	1,55
20МА	1,29	X13H4Г9	1,42	X15H60	1,62
4X13	1,33	1X18H9T	1,44		

Таблица 30

Влияние жестких концов на уширение, выраженное коэффициентом k'_1 в функции от $A = \left(\frac{b}{l_x}\right)^{4f_{уст}}$
(по данным И. Я. Тарновского)

A	0,670	0,800	0,900	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400
k'_1	1,000	0,949	0,906	0,864	0,820	0,779	0,748	0,698
A	1,500	1,600	1,700	1,800	1,900	2,000	2,100	2,200
k'_1	0,658	0,622	0,587	0,552	0,517	0,484	0,454	0,430
A	2,400	2,600	2,800	3,000	3,500	4,000	4,500	5,000
k'_1	0,385	0,345	0,311	0,280	0,230	0,216	0,244	0,370

Примечание. При $A < 0,670$ коэффициент $k'_1 = 1$.

1. Коэффициент трения по формуле (27-IV) (см. табл. 23):

$$f = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot 1000) = 0,55.$$

$$2. l_x = \sqrt{300 \cdot 30} = 94,9 \text{ мм.}$$

$$3. m = \frac{1,6 \cdot 0,55 \cdot 94,9 - 1,2 \cdot 30}{120 + 90} = 0,225.$$

$$4. A = 2 \cdot 0,225 (120 + 90) \frac{94,9}{150} = 59,6.$$

$$5. b = -59,6 +$$

$$+ \sqrt{(59,6)^2 + (150)^2 + 4 \cdot 0,225 \cdot 94,9 (3 \cdot 120 - 90)} = 162 \text{ мм.}$$

$$6. \Delta b = 162 - 150 = 12 \text{ мм.}$$

По А. Ф. Головину согласно графику рис. 57:

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = \varphi\left(\frac{h_{\text{ср}}}{b_{\text{ср}}}, \frac{l_x}{b_{\text{ср}}}\right) \approx 0,3;$$

$$\Delta b = 0,3\Delta h = 0,3 \cdot 30 = 9,0 \text{ мм.}$$

Задача № 88 [37]. Определить уширение при прокатке стали 08кп на стальных валках диаметром $D = 800$ мм.

Поверхность валков изношена. Твердость поверхности 45 ед. по Шору. Окружная скорость валков $v = 3$ м/сек. Температура

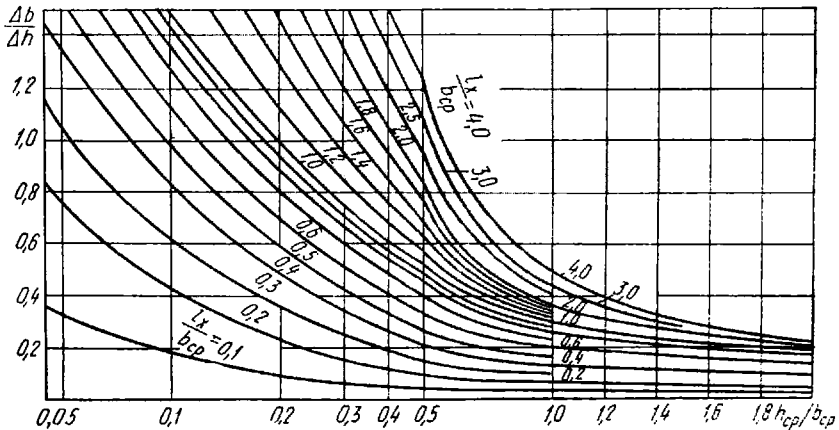


Рис. 57. Зависимость показателя уширения $\Delta b/\Delta h$ от $l_x/b_{\text{ср}}$ и $h_{\text{ср}}/b_{\text{ср}}$ (для $h_{\text{ср}}/b_{\text{ср}} = 0,5$ логарифмическая шкала заменяется линейной шкалой) (к задаче № 87)

металла $t_1 = 1100^\circ \text{C}$. Толщина полосы до прокатки $h_0 = 60$ мм, обжатие $\Delta h = 20$ мм. Ширина полосы $b_0 = 150$ мм. Коэффициент контактного трения между металлом и валком приняли при расчетах равным $f = 0,356$.

По формуле Б. П. Бахтинова (63-IV)

$$\Delta b = 1,15 \frac{20}{2 \cdot 60} \left(\sqrt{400 \cdot 20} - \frac{20}{2 \cdot 0,356} \right) = 11,8 \text{ мм.}$$

По формуле И. Я. Тарновского (65-IV):

1) логарифм высотной деформации

$$\lg \frac{1}{\eta} = \lg \frac{h_0}{h_1} = \lg \frac{60}{40} = \lg 1,5 = 0,176;$$

2) угол захвата

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{20}{800}\right) = 12^\circ 48' (0,233 \text{ рад});$$

3) длина дуги захвата

$$l_x = R\alpha = 400 \cdot 0,233 = 93,2 \text{ мм};$$

$$4) A = \left(\frac{b_0}{l_x} \right)^{4f_y} = \left(\frac{150}{93,2} \right)^{4 \cdot 0,356} = (1,68)^{1,42} = 2,10,$$

а по табл. 30 при $A = 2,10$ коэффициент $k'_1 = 0,454$. При $\frac{\Delta h}{D} = \frac{20}{800} = 0,025$ по графику рис. 58 находим коэффициент $k' =$

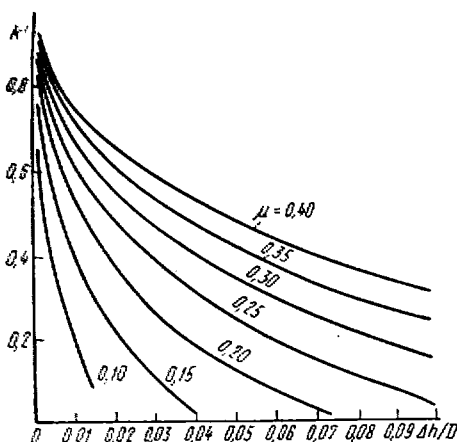


Рис. 58. Номограмма для определения коэффициента формы инструмента k' в первой зоне очага деформации (к задаче № 88)

$= 0,60;$

5) логарифм поперечной деформации

$$\lg \beta = 0,176 \left(\frac{0,454}{1 + \frac{1}{0,6} \cdot 2,1} \right) = 0,176 \cdot 0,1 = 0,0176$$

или

$$\beta = 1,04;$$

6) ширина после прокатки

$$b_1 = \beta b_0 = 1,04 \cdot 150 = 156 \text{ мм};$$

7) уширение равно $\Delta b = 156 - 150 = 6 \text{ мм}$.

При проектировании калибровок валков, на основании опытных данных Н. В. Литовченко и др. [7] рекомендуют расчет уширения производить по формулам Б. П. Бахтинова (62-IV) и Зибеля (63-IV), а Ю. М. Чижиков [65] — по формуле С. Экелунда (64-IV).

Формула Зибеля дает удовлетворительные результаты при среднем значении показателя уширения $k_{cp} = 0,35$.

С помощью вариационного метода И. Я. Тарновский вывел формулы для определения уширения не только при прокатке на гладкой бочке, но и на калиброванных валках [36]. В результате получились довольно сложные уравнения, мало пригодные для повседневных практических расчетов¹.

Наиболее приемлемые из многих уравнений И. Я. Тарновского для практических расчетов основных параметров прокатки использованы при решении следующей задачи.

Задача № 89 [35]. Определить вытяжку, уширение и ширину полосы после прокатки за один проход. Дано: сторона исходной полосы квадратного сечения $a = 60 \text{ мм}$, полосу прокатывают в ром-

¹ В последнее время широкое распространение получили электронные вычислительные машины (ЭВМ), которые позволяют эффективно использовать подобные формулы для практических расчетов. (Прим. ред.)

бическом калибре с отношением диагоналей $\frac{b}{h} = 1,4$; $D_k = 400$ мм и $f = 0,30$.

Решение по методу И. Я. Тарновского [35]. Диагональ заготовки $h_0 = b_0 = 60\sqrt{2} = 84,8$ мм.

Если предварительно взять степень заполнения $\delta = 0,95$, то из неравенства $\frac{h_0}{h} < \frac{b}{h} \frac{h_0}{b_0} \delta$ получается, что $\frac{h_0}{h} < 1,4 \times 1,0 \cdot 0,95$, или $\frac{h_0}{h} < 1,330$. Следовательно, $h > \frac{84,8}{1,33} \approx 63,8$ мм.

Принимаем:

$h = 65$ мм. Тогда: $\frac{h_0}{h} = \frac{84,8}{65} \approx 1,305$. По табл. 31 с учетом значений h_0/h и δ получили $1/\eta = 1,270$.

Таблица 31

Значения $1/\eta$ для ромбических калибров [35]

δ	Значения $1/\eta$ при различных значениях h_0/h									
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
1,00	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500	1,600	1,700	1,800	1,900	2,000
0,95	1,088	1,173	1,265	1,348	1,440	1,532	1,620	1,702	1,800	1,890
0,90	1,078	1,160	1,250	1,332	1,410	1,500	1,580	1,667	1,750	1,830
0,85	1,072	1,154	1,238	1,312	1,390	1,472	1,550	1,630	1,710	1,787
0,80	1,068	1,148	1,228	1,298	1,375	1,450	1,525	1,600	1,675	1,750
0,75	1,066	1,144	1,220	1,287	1,363	1,430	1,500	1,572	1,642	1,718
0,70	1,064	1,140	1,212	1,277	1,354	1,415	1,475	1,552	1,618	1,687

Абсолютное обжатие по диагонали: $\Delta h = h_0 - h = 84,8 - 65 = 19,8$ мм. Среднее абсолютное обжатие

$$\Delta h_{\text{ср}} = \frac{2}{3} \Delta h = \frac{2}{3} \cdot 19,8 = 13,2 \text{ мм или } \frac{\Delta h_{\text{ср}}}{D_k} = \frac{13,2}{400} = 0,033.$$

Далее определяем $b'_0 = 0,815$. $b_0 = 0,815 \cdot 84,8$ и $\frac{b'_0}{D_k} = \frac{0,815 \cdot 84,8}{400} = 0,173$. По этим данным и, учитывая, что $f = 0,3$, из рис. 59 находим $A' = 0,923$ и по табл. 30 $k'_1 = 0,896$. По графику рис. 60 находим $k' = 0,163$ при $\text{tg } \theta_0 = \frac{1}{\left(\frac{b}{h}\right)} = \frac{1}{1,4} = 0,715$, где θ_0 —

угол, характеризующий форму калибра.

Из уравнения

$$\frac{\lg \beta'}{\lg \frac{1}{\eta'}} = \frac{k'_1}{1 + \frac{A'}{k'}} \quad (66\text{-IV})$$

получим

$$\frac{\lg \beta'}{\lg \frac{1}{\eta'}} = \frac{0,896}{1 + \frac{0,923}{0,163}} = 0,134.$$

Обжатие в каждой зоне очага деформации (рис. 61) $\frac{\Delta^*h}{\Delta h} = 0,08$ или $\Delta^*h = 13,2 \cdot 0,08 = 1$ мм.

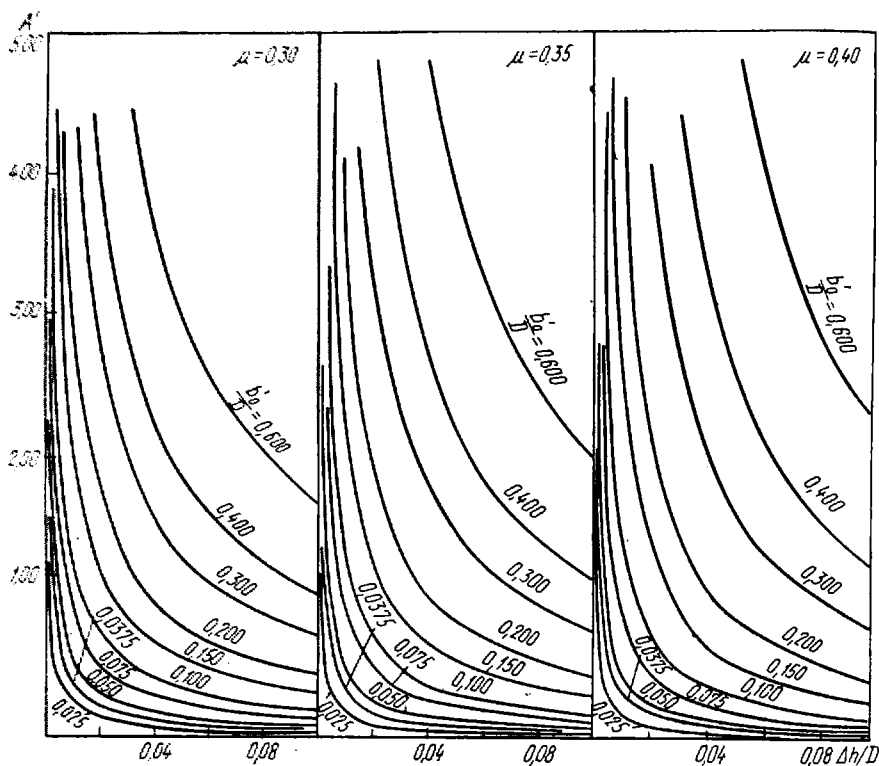


Рис. 59. Диаграмма для определения критерия A' в функции от $\Delta h/D$, b_0'/D и μ (к задаче № 89)

Затем определяем значения $1/\eta''$ и $1/\eta'$ по формулам:

$$\frac{1}{\eta''} = \frac{h + \Delta^*h}{h} = \frac{65 + 1}{65} = 1,015 \quad \text{и} \quad \frac{1}{\eta'} = \frac{\left(\frac{1}{\eta''}\right)}{\left(\frac{1}{\eta''}\right)} = \frac{1,270}{1,015} = 1,250.$$

Отсюда

$$\lg \frac{1}{\eta'} = \lg 1,250 = 0,969.$$

Следовательно, $\lg \beta' = 0,134 \lg \frac{1}{\eta'} = 0,134 \cdot 0,969 = 0,01298$,
а $\beta' = 1,03$.

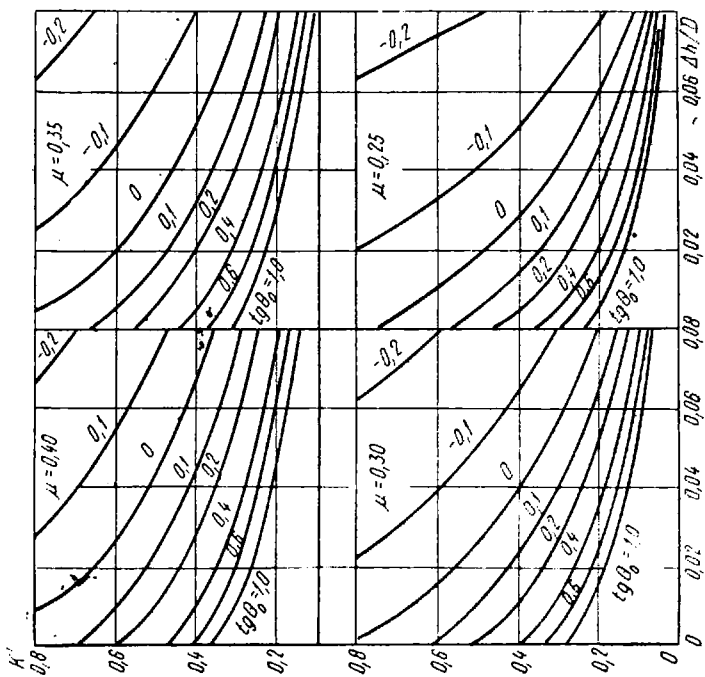


Рис. 60. Диаграммы для определения коэффициента формы инструмента K' в первой зоне при прокатке в калибрах (к задаче № 89)

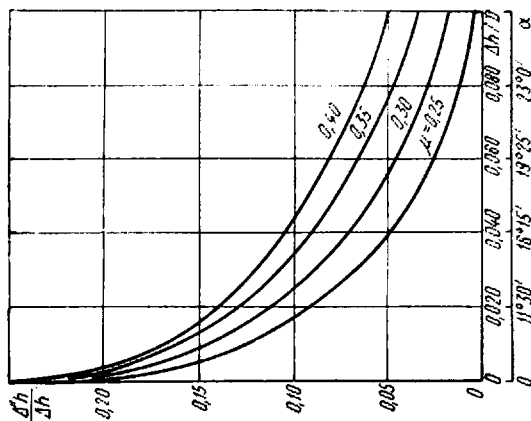


Рис. 61. Диаграмма для определения абсолютного обжатия во второй зоне очага деформации (к задаче № 89)

Во второй зоне вследствие ее малости поперечной деформацией можно пренебречь. При прокатке в гладких валках по формуле

$$\begin{aligned} \frac{\Delta''h}{\Delta h} &= 0,25 \left(1 - \frac{1}{f} \sqrt{0,5 \frac{\Delta h_{\text{ср}}}{D}} \right)^2 = \\ &= 0,25 \left(1 - \frac{1}{0,3} \sqrt{0,5 \cdot 0,033} \right)^2 = 0,0816 \approx 0,08. \end{aligned} \quad (\text{A})^*$$

Тогда

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{\eta}{\beta'} = \frac{1,270}{1,030} = 1,233; \\ \frac{F_1}{h^2} &= \frac{a^2}{\lambda h_{\text{усл}}^2} = \frac{60^2}{1,233 \cdot 65^2} = 0,694. \end{aligned}$$

Степень заполнения калибра

$$\delta = 1 - \sqrt{1 - \frac{2}{\left(\frac{b}{h}\right)} \cdot \frac{F_1}{h^2}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{2}{1,4} \cdot 0,694} = 0,908.$$

(67-IV)

Тогда

$b = 65 \cdot 1,4 = 91$ мм и $b_1 = 91 \cdot 0,908 = 82,8$ мм, т. е. меньше начальной ширины, равной $b_0 = 84,8$ мм.

Это означает, что принятое обжатие слишком мало (при малых обжатиях металл полосы в области ребер даже не соприкасается с валками). Делаем перерасчет. Ранее было определено, что $h_0 > 63,8$ мм.

Имея в виду, что $65 > h_0 > 63,8$ мм, принимаем $h_0 = 64,4$ мм. Тогда

$$\frac{h_0}{h} = \frac{84,8}{64,4} \approx 1,320.$$

По табл. 31 при $\delta = 0,95$ находим: $\frac{1}{\eta} = 1,282$;

$$\frac{1}{\eta'} = \frac{1,282}{1,015} = 1,262; \quad \lg \frac{1}{\eta'} = 0,1011;$$

$\lg \beta' = 0,1011 \cdot 0,134 = 0,01355$; $\beta' = \beta = 1,032$;

$$\lambda = \frac{1,282}{1,032} = 1,240; \quad \frac{F}{h^2} = \frac{60^2}{1,240 (64,4)^2} = 0,699.$$

* При $\frac{\Delta h_{\text{ср}}}{D_k} = 0,033$ и $f = 0,3$ значение $\frac{\Delta''h}{\Delta h}$ можно определить по формуле (A*).

По уравнению (67-IV) получим $\delta = 0,963$, тогда

$$b = 64,4 \cdot 1,4 = 90,1 \text{ мм}; \quad b_1 = 90,1 \cdot 0,963 = 86,7 \text{ мм}.$$

Увеличение горизонтальной диагонали:

$$\Delta b = b_1 - b_0 = 86,7 - 84,8 = 1,9 \text{ мм}.$$

Задача № 90. Определить вытяжку λ , заполнение калибра δ , уширение Δb и ширину полосы b при прокатке ромбической полосы с отношением диагоналей $\frac{h_0}{b_0} = 1,3$ и стороной $a_0 = 60$ мм в ромбическом калибре с отношением диагоналей $\frac{b}{h} = 1,3$. Диаметр валков $D = 400$ мм и коэффициент трения $f = 0,3$.

Решение по методу И. Я. Тарновского [35]. Находим диагонали заготовки:

$$h_0 = 2a_0 \sin \frac{\alpha_0}{2} = 2 \cdot 60 \cdot 0,793 = 95 \text{ мм};$$

$$b_0 = 2a_0 \cos \frac{\alpha_0}{2} = 2 \cdot 60 \cdot 0,609 = 73,1 \text{ мм}.$$

Так как $\operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} = \frac{b}{h} = 1,3$, то $\frac{\alpha_0}{2} = 52,5^\circ$ и $\sin 52,5^\circ = 0,793$, а $\cos 52,5^\circ = 0,609$.

Площадь сечения ромбической полосы

$$F_0 = \frac{h_0 b_0}{2} = \frac{95 \cdot 73,1}{2} = 3470 \text{ мм}^2.$$

Из выражения $\frac{h_0}{h} < \left(\frac{b}{h}\right)^2 \cdot \delta$ при $\delta = 0,95$ получим

$$\frac{h_0}{h} < (1,3)^2 \cdot 0,95 = 1,605.$$

Приняв $\frac{h_0}{h} = 1,5$, получим

$$h = \frac{h_0}{1,5} = \frac{95}{1,5} = 63,3 \text{ мм}.$$

По табл. 31 находим: $\frac{1}{\eta} = 1,443$; $\Delta h = h_0 - h_1 = 95 - 63,3 = 31,7$ мм. Тогда $\Delta h_{\text{ср}} = \frac{2}{3} \Delta h = \frac{2}{3} \cdot 31,7 \approx 21,2$ мм, а

$$\frac{\Delta h_{\text{ср}}}{D_{\text{к}}} = \frac{21,2}{400} = 0,053.$$

По диаграмме рис. 61 определим:

$$\frac{\Delta^*h}{\Delta h_{\text{ср}}} = 0,052; \quad \Delta^*h = 0,052 \cdot 21,2 = 1,1 \text{ мм};$$

$$\frac{1}{\eta^*} = \frac{h + \Delta^*h}{h} = \frac{63,3 + 1,1}{63,3} = 1,017;$$

$$\frac{1}{\eta'} = \frac{1/\eta}{1/\eta^*} = \frac{1,443}{1,017} = 1,422;$$

$$\lg \frac{1}{\eta'} = 0,1529.$$

Находим относительный объем, смещенный в поперечном направлении. По уравнению $b'_0 = 0,815 b_0 = 0,815 \cdot 73,1$

$$\frac{b'_0}{D_{\text{к}}} = \frac{0,815 \cdot 73,1}{400} = 0,149.$$

Из диаграммы рис. 61 при $\frac{\Delta h_{\text{ср}}}{D_{\text{к}}} = 0,053$, $\frac{b'_0}{D_{\text{к}}} = 0,149$ и $f = 0,3$ находим $A' = 0,530$.

По табл. 30:

$$k'_1 = 1,0;$$

$$\text{tg } \theta_0 = \frac{1}{b/h} = \frac{1}{1,3} = 0,770,$$

где θ — угол между нормалью к стороне ромба и вертикальной диагональю ромба.

По диаграмме рис. 60 находим $k' = 0,115$. Тогда

$$\frac{\lg \beta'}{\lg \frac{1}{\eta'}} = \frac{1}{1 + \frac{A'}{k'}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{0,530}{0,115}} = 0,178;$$

$$\lg \beta' = 0,178 \cdot 0,1529 = 0,0266; \quad \beta' = \beta = 1,063.$$

Уширением во второй зоне очага деформации пренебрегаем. Тогда

$$\lambda = \frac{1}{\beta'} = \frac{1,443}{1,063} = 1,355;$$

$$\frac{F_1}{h^2} = \frac{a^2}{\lambda h^2} = \frac{3470}{1,355 (63,3)^2} = 0,642.$$

Степень заполнения калибра

$$\delta = 1 - \sqrt{1 - \frac{2}{\left(\frac{b}{h}\right) \frac{F_1}{h^2}}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{2}{1,3} \cdot 0,642} = 0,890;$$

$$b = h \left(\frac{b}{h} \right) = 63,3 \cdot 1,3 = 82,2 \text{ мм}; \quad b_1 = b\delta = 82,2 \cdot 0,89 = 73,1 \text{ мм},$$

т. е.

$$b_1 = b_0.$$

Это значит, что обжатие можно увеличить.

Для этого делаем перерасчет. Принимаем $h = 62,5 \text{ мм}$, тогда

$$\frac{h_0}{h} = \frac{95}{62,5} = 1,520.$$

По табл. 31

$$\frac{1}{\eta} = 1,458; \quad \frac{1}{\eta'} = \frac{1,458}{1,015} = 1,435; \quad \lg \frac{1}{\eta'} = 0,1568;$$

$$\lg \beta' = 0,1568 \cdot 0,174 = 0,0273; \quad \beta' = \beta = 1,065;$$

$$\lambda = \frac{1,458}{1,065} = 1,370 \quad \frac{F_1}{\lambda h^2} = \frac{3470}{1,37(62,5)^2} = 0,648.$$

Степень стеснения, определенная ранее указанным методом:

$$\delta = 0,945; \quad b = 62,5 \cdot 1,3 = 81,2 \text{ мм};$$

$$b_1 = 81,2 \cdot 0,945 = 76,7 \text{ мм}.$$

Абсолютное уширение

$$\Delta b = b_1 - b = 76,7 - 73,1 = 3,6 \text{ мм}.$$

Заключение. Метод расчета уширения при прокатке в калибрах, предложенный И. Я. Тарновским [35, 36], не может претендовать на получение результатов, совпадающих с данными практики по следующим соображениям:

1. Метод не учитывает много факторов, влияющих на уширение (см. рис. 54). Главные из них: скорость деформации металла (u) сопротивление деформации p . Опытные данные указывают на зависимость уширения от u_{cp} и p .

2. Формула (65-IV) не охватывает все виды уширения металла, имеющие место при прокатке в фасонных калибрах. Этот метод расчета уширения с достаточной степенью точности совпадает с практическими данными только при прокатке металла на гладкой бочке.

Применение номограмм и таблиц и особенно ЭВМ значительно упрощает расчеты уширения по методу И. Я. Тарновского.

5. НЕРАВНОМЕРНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ

При деформации металла, в процессе обработки его давлением (ковка, прокатка, волочение), во всех точках его объема возникает неодинаковое объемное напряженное состояние. В этих условиях развивается неравномерная деформация тела, что приводит

к появлению дополнительных напряжений, которые снижают пластичность металла, повышают деформирующие усилия и искажают форму тела.

Неравномерность деформации приводит к неоднородности физико-механических свойств готовых изделий, к различным видам брака (рванинам, трещинам, серповидности, разнотолщинности и др.).

Поэтому на практике прибегают к различным мерам, уменьшающим неравномерность деформации.

Степень неравномерной деформации зависит от коэффициента контактного трения f и значения отношений:

$$b/h; h_0/D_k; h_0/l_d \text{ и } l_d/h_{ср.}$$

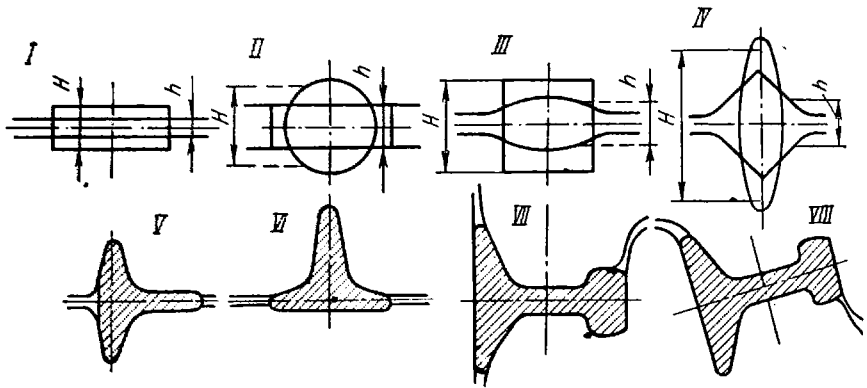


Рис. 62. Типовые схемы прокатки:

I — прямоугольная полоса в валках с прямой бочкой; *II* — заготовка сложной формы в валках с прямой бочкой; *III* — прямоугольная заготовка в калиброванных валках; *IV* — заготовка сложной формы в калиброванных валках; *V* — отсутствие симметрии относительно вертикальной оси; *VI* — отсутствие симметрии относительно горизонтальной оси; *VII* — отсутствие симметрии относительно обеих осей; *VIII* — косое расположение калибра

Разница в линейных и относительных обжатиях металла по ширине калибра, неравномерность температурного поля в прокатываемом металле, структура и химический состав также влияют на неравномерность деформации.

Более подробные сведения о неравномерной деформации металла при прокатке и ее последствиях имеются в работах И. Я. Тарновского [35], А. И. Целикова [30] и С. И. Губкина [32, 34].

Ясное представление о неравномерной деформации металла при прокатке можно получить при рассмотрении типовых схем прокатки, предложенных Иг. М. Павловым (рис. 62).

При анализе типовых схем прокатки Иг. М. Павлов принимает коэффициент вытяжки μ для всех частей прокатываемой полосы постоянным, благодаря чему все части полосы, выходящие из калибра, имеют одинаковую вытяжку. Выравнивание вытяжки

разных частей полосы по ширине калибра происходит в результате действия «жестких концов».

В этом случае будет справедливым равенство

$$\mu_{\text{ср}} = \frac{b_0 h_0}{b_1 h_1} = \frac{l_1}{l_0}. \quad (68\text{-IV})$$

В случае неравномерности высотного обжатия по ширине на основании закона постоянства объема и правила замкнутых контуров, для анализа поперечной деформации Иг. М. Павловым предложено следующее соотношение:

$$\frac{b_1}{b_0} = \frac{h_0}{\mu_{\text{ср}} h_1}, \quad (69\text{-IV})$$

где b_0 и b_1 — ширина выделенного участка до и после прокатки;
 h_0 и h_1 — толщина этого участка до и после прокатки;
 $\mu_{\text{ср}}$ — общая вытяжка всей полосы, представляющая собой среднюю величину от частных вытяжек отдельных частей тела.

Из равенства (69-IV) следует, что при $\frac{h_0}{h_1} = \mu_{\text{ср}}$ поперечная деформация в пределах данного контура отсутствует, т. е. $b_1 = b_0$, а при $\frac{h_0}{h_1} > \mu_{\text{ср}}$ данный контур деформируется с уширением, т. е. $b_1/b_0 > 1$. В этом случае уширение называют вынужденным. При $\frac{h_0}{h_1} < \mu_{\text{ср}}$ появляется утяжка по ширине тела или $b_1/b_0 < 1$.

В результате неравномерной деформации в теле, кроме рабочих напряжений, возникают дополнительные напряжения. Дополнительные напряжения не полностью уравниваются внутри деформированного тела. Часть из них остается в теле в виде так называемых остаточных напряжений, которые считаются вредными для производства по причинам, отмеченным ранее.

Рассмотрим несколько случаев неравномерной деформации при прокатке. На рис. 63 приведены формы и размеры деформируемых тел.

Задача № 91. Требуется определить размеры и форму прокатываемой полосы в тавровом калибре при $\mu_{\text{ср}} = 1,5$, соблюдая равенство вытяжки разных частей профиля.

Решение. Воспользуемся правилом замкнутых контуров Иг. М. Павлова, согласно которому относительные уменьшения площадей любых замкнутых контуров в поперечном сечении тела, деформируемого в условиях постоянства вытяжки, равны между собой или

$$\mu = \frac{F_1}{F_2} = \frac{F_3}{F_4} = 1,5, \quad (70\text{-IV})$$

где F_1 и F_2 — площадь шейки тавра до и после прокатки;

$F_1 = 1000 \cdot 1,5 = 1500 \text{ мм}^2$; $F_2 = 20 \cdot 50 = 1000 \text{ мм}^2$. F_3 и F_4 — площадь головки тавра до и после прокатки; $F_3 = 1200 \cdot 1,5 = 1800 \text{ мм}^2$; $F_4 = 30 \cdot 40 = 1200 \text{ мм}^2$.

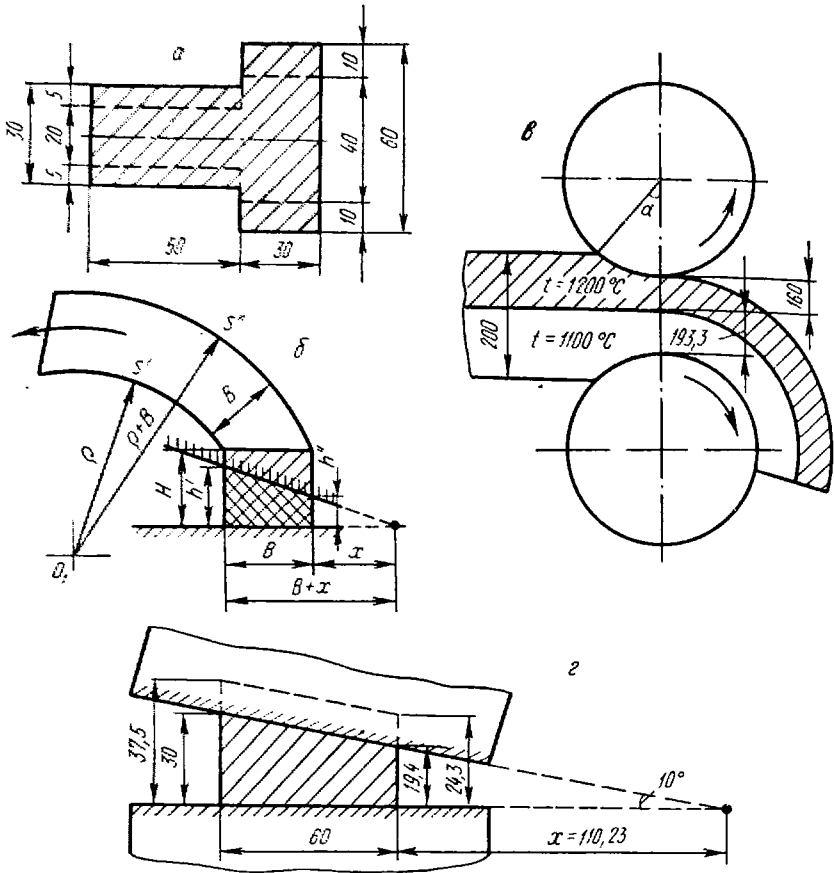


Рис. 63. Условия неравномерной деформации:

a — прокатка полосы в тавровом калибре (к задаче № 91); *б* — прокатка полосы с разными обжатиями по краям (к задаче № 92); *в* — прокатка неравномерно нагретой полосы (к задаче № 94); *г* — прокатка трапецидальной полосы на гладкой бочке валков (к задаче № 93)

Пренебрегая уширением и переходом металла из одной части профиля в другую, получим размеры и форму задаваемой полосы. Форма полосы — тавровая.

Размеры его шейки $h_1 \times b_1 = [(1500 : 50) \times 50] = 30 \times 50 \text{ мм}$.

Размеры головки $h_2 \times b_2 = [(1600 : 30) \times 30] = 60 \times 30 \text{ мм}$.

В этих условиях соблюдается равенство (70-IV) и постоянство вытяжки в обеих частях тавра, $\mu = 1,5 = \text{const}$.

Задача № 92 [38]. Определить радиус искривления полосы ρ , прокатанной в один проход, и перекося валков. Размеры полосы до прокатки $25 \times 400 \times 10\,000$ мм. После прокатки левый край полосы $h' = 21$ мм, правый край полосы $h'' = 17,5$ мм. Ширина полосы $b = 40$ мм (уширением пренебрегаем) (см. рис. 63, б).

Решение. Расчет производим по методу Иг. М. Павлова.

1. Определяем угол перекося валков:

$$h' = (B + x) \operatorname{tg} \varphi, \text{ или } 21 = (40 + x) \operatorname{tg} \varphi;$$

$$h'' = x \operatorname{tg} \varphi, \text{ или } 17,5 = x \operatorname{tg} \varphi.$$

Отсюда $\operatorname{tg} \varphi = 0,0875$, или $\varphi = 5^\circ$ ($0,08727$ рад).

2. Определяем расстояние x от точки пересечения осей валков до края полосы, у которой $h'' = 17,5$ мм:

$$17,5 = x \operatorname{tg} 5^\circ, \text{ или } x = \frac{17,5}{\operatorname{tg} 5} = \frac{17,5}{0,0875} = 200 \text{ мм.}$$

3. Естественные длины для обоих краев полосы:

$$L'_2 = L_1 \frac{H}{h'} = 10 \cdot \frac{25}{21} = 11,9 \text{ м;}$$

$$L''_2 = L_1 \frac{H}{h''} = 10 \cdot \frac{25}{17,5} = 14,3 \text{ м.}$$

Длины дуг S' и S'' относятся как радиусы $(\rho + B)$ и ρ и как естественные длины L'' и L' , т. е.

$$\frac{S''}{S'} = \frac{\rho + B}{\rho} \text{ и } \frac{S''}{S'} = \frac{L''_2}{L'_2} = \frac{14,3}{11,9} \approx 1,2.$$

Так как $\frac{\rho + B}{\rho} = 1,2$, радиус искривления ρ полосы равен:

$$\rho + 40 = 1,2 \rho \text{ или } \rho = \frac{40}{0,2} = 200 \text{ мм.}$$

Следовательно, радиус искривления полосы ρ и расстояние от точки пересечения осей валков x до края полосы равны, т. е. $x = \rho$.

Из этого следует, что полоса выйдет из валков прямой, без всяких искривлений, тогда, когда оси валков будут строго параллельны, т. е. когда $X = \infty$, а $\operatorname{tg} \varphi = 0$ или $\varphi = 0$.

Эта задача имеет практическое значение. При настройке валков поэтому придерживаются следующего правила: если полоса изгибается влево, то следует увеличить расстояние между валками со стороны правой шейки валков, если полоса изгибается вправо, то, наоборот, следует увеличить расстояние между вал-

ками со стороны левой шейки валков. Положение вальцовщика в это время должно соответствовать месту задачи металла в валки.

Задача № 93. После прокатки трапецидальный профиль из стали 45 имеет размеры: $h_1 = 30$ мм, $h_2 = 19,4$ мм, нижнее основание трапеции $B = 60$ мм.

Определить размеры этой полосы до прокатки, если коэффициент вытяжки за проход $\mu = 1,25$. Валки чугунные. Серповидность не допускается. Уширением пренебречь (см. рис. 63, г).

Решение. Прямолинейность полосы при выходе из валков достигается при условии равенства вытяжек по краям, т. е.:

$$\frac{H_1}{h_1} = \frac{H_2}{h_2} = \mu, \text{ или } \frac{H_1}{30} = \frac{H_2}{19,4} = 1,25.$$

Тогда размеры трапеции до прокатки $H_1 = 37,5$ мм, $H_2 = 24,3$ мм. $B_0 = B$. Угол наклона оси верхнего валка

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{h_1 - h_2}{B} = \frac{30 - 19,4}{60} = 0,176 \text{ или } \varphi = 10^\circ.$$

По данным А. И. Целикова, при применении шарнирных шпинделей допускаемый максимальный угол перекося валков составляет $\varphi = 10^\circ$. Таким образом, полученный перекося валков находится в пределах установленных норм.

Задача № 94. При прокатке стального бруса размерами $200 \times 200 \times 1500$ мм марки 18ХНВА произошло оковывание нижнего валка диаметром, равным верхнему $D_c = D_n = 500$ мм.

Определить обжатие со стороны обоих валков, если известно, что со стороны верхнего валка $\Delta h_B = 40$ мм, температура поверхности металла, соприкасающейся с ним, $t_c = 1200^\circ \text{C}$, а со стороны нижнего валка $t_n = 1100^\circ \text{C}$. Сопротивление деформации металла при 1200°C $\rho_1 = 20$ Мн/м² (2 кг/мм²), а при 1100°C $\rho_2 = 49$ Мн/м² (4,9 кг/мм²).

Решение. В условиях несимметричной деформации частные обжатия слоев металла, имеющих различную пластичность, обратно пропорциональны квадратам сопротивления деформации соответствующих слоев [38]:

$$\frac{\Delta h_B}{\Delta h_n} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2. \quad (71-IV)$$

Тогда

$$\Delta h_n = \frac{\Delta h_B}{\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2} = \frac{40}{\left(\frac{49}{20} \right)^2} = 6,7 \text{ мм.}$$

Определим коэффициент вытяжки обеих сторон без учета уширения: $\Delta h_B = h_0 - h_1 = 40$ мм, $h_1 = 200 - 40 = 160$ мм,

откуда $\mu_n = \frac{200}{160} = 1,25$, $\Delta h_n = h_0 - h_2 = 6,7$, $h_2 = 200 - 6,7 = 193,3$ мм, откуда $\mu_n = \frac{200}{193,3} = 1,035$.

Вытяжка верхнего слоя больше нижнего в 1,21 раза, поэтому верхняя часть не может иметь свободного движения вперед. Нижняя часть будет задерживать движение верхней части бьюма. В результате этого полоса будет изгибаться вниз и получится оковывание нижнего валка (рис. 63, в).

6. ДАВЛЕНИЕ МЕТАЛЛА НА ВАЛКИ

Задача состоит в определении силы полного давления металла на валок P , которую вычисляют по общеизвестной формуле:

$$P = p_{cp} b_{cp} \sqrt{R \Delta h} \quad (72-IV)$$

или

$$P = p_{cp} b_{cp} l_d, \quad (73-IV)$$

где p_{cp} — среднее удельное давление.

Ниже приведены ориентированные значения полного давления P , Mn (T) для некоторых станов [37]:

Блюминги	5—15 (500—1500)
Слябинги	6—18 (600—1800)
Непрерывные тонколистовые станы	5—20 (500—2000)
Рельсобалочные и крупносортовые станы	1,5—7 (150—700)
Среднесортные станы	0,5—2 (50—200)
Мелкосортные станы	0,15—0,60 (15—60)

Определение среднего удельного давления представляет в ряде случаев значительные трудности, в основном из-за недостатка опытных данных по механическим свойствам металла.

В общем виде полное удельное давление равно:

$$p = p_0 n_f,$$

где p_0 — непосредственно действующее со стороны металла удельное давление, зависящее от внутреннего сопротивления металла деформации, химического состава металла и его физического состояния, определяемого температурой нагрева, структурой, скоростью и степенью деформации;

n_f — коэффициент, учитывающий влияние внешних сопротивлений, зависящих главным образом от параметра формы очага деформации l/h_{cp} , γ/α и коэффициента трения f между прокатываемой полосой и валками.

Формулы для определения среднего удельного давления металла на валки, получившие наибольшее распространение, приведены в табл. 32 и 33.

Формулы для определения среднего удельного давления
металла на вальки при горячей прокатке

Номер формулы	Формулы и последовательность расчетов	Обозначения и примечания
(74-IV)	$P_{\text{ср}} = \beta \sigma_{\text{н}} n_{\sigma}'' \left(\frac{P_{\text{ср}}}{k} \right)$	<p>Формула А. И. Целикова [30, 37].</p> <p>$\beta = 1 \div 1,15$ — коэффициент, учитывающий неравномерность напряженного состояния (коэффициент Лодэ, $\beta = 1$ для очень узких полос и $\beta = 1,15$ для широких полос); $\sigma_{\text{н}} = \varphi(u, t^{\circ}, \epsilon)$ — истинное сопротивление деформации [56, 5]; u — скорость деформации (54-IV); n_{σ}'' — коэффициент, учитывающий влияние внешних концов, определяют по графику рис. 66; $(P_{\text{ср}}/k) = \varphi(\delta, \epsilon)$ — коэффициент напряженного состояния определяют по графику рис. 65</p> $\delta = 2f \sqrt{\frac{R}{\Delta h}} \approx \frac{2f}{\alpha};$ <p>t — температура металла; $\epsilon = \frac{\Delta h}{H} \cdot 100\%$ — степень деформации</p>
(75-IV)	$P_{\text{ср}} = k_f P_0,$ $P = k_v \left[1 + \beta (0,95 t_{\text{пл}} - t) + \frac{\beta^2 (0,95 t_{\text{пл}} - t)^2}{2} \right] \sigma_{\text{в}};$	<p>Формула С. И. Губкина [34].</p> <p>k_v — скоростной коэффициент, при $v = 0,1 \div 0,25$ м/сек $k_v = 1,2 \div 1,6$, при $v = 0,25 - 0,75$ м/сек $k_v = 1,6 \div 2$, при $v = 1$ м/сек $k_v = 2,5$; $\beta = 0,008 \div 0,0120$ — температурный коэффициент (верхний предел принимают для твердых растворов с большой концентрацией);</p>

Номер формулы	Формулы и последовательность расчетов	Обозначения и примечания
(75-IV)	$k_f = k_\sigma \left(1 + 1,3f \sqrt{\frac{R}{h_0}} \right)$	<p>$t_{пл}$ — см. рис. 67; $k_\sigma = 1 \div 1,3$ — коэффициент неравномерности распределения температурных напряжений; $\sigma_B = 4 \div 6 \text{ Мн/м}^2$ $(0,4 \div 0,6 \text{ кг/мм}^2)$ предел прочности, соответствующий температуре $0,95t_{пл}$ и скорости деформирования 0,04—0,05 м/мин [34]; f — коэффициент трения (см. табл. 23)</p>
(76-IV)	<p>где</p> $p_{ср} = (1 + m) (2k + \eta u),$ $m = \frac{1,6f \sqrt{R \Delta h} - 1,2 \Delta h}{h_0 + h_1};$ $2k = 9,81 (14 - 0,1t) \times (1,4 + C + Mn + 0,3Cr);$ $\eta = 0,098 (14 - 0,01t) c;$ $u = \frac{2v \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}}{H_0 + h_1}$	<p>Формула С. Эклунда [30].</p> <p>m — коэффициент, учитывающий внешнее сопротивление; $2k$ — статическое сопротивление деформации; η — коэффициент вязкости металла, Мн·сек/м²; c — коэффициент, зависящий от скорости деформирования v. При v равном 6; 10; 15 и 20 м/сек, коэффициент соответственно равен 1; 0,8; 0,65 и 0,6; u — относительная скорость деформации</p>
(77-IV)	$p_{ср} = k_f \left(1 + Cf \frac{l_d}{h} \sqrt[4]{v} \right),$ <p>где $k_f = 0,015 (1400 - t)$ — для нелегированных углеродистых сталей; $k_f = (0,014 + 0,01C + 0,01Mn + 0,003Cr) \times (1400 - t)$ — для высокоуглеродистых сталей, содержащих Mn и Cr</p>	<p>Формула Ш. Гелли [33].</p> <p>k_f — сопротивление линейной деформации; C — см. рис. 68; v — окружная скорость валков, м/сек</p>

Номер формулы	Формулы и последовательность расчетов	Обозначения и примечания
(78-IV)	<p>где</p> $p_{\text{ср}} = k_f k_t \sigma_{\text{в}},$ $k_f = 1 + f \left(\frac{l_x}{h_{\text{ср}}} - 1 \right);$ $\frac{l_x}{h_{\text{ср}}} = \frac{2 \sqrt{R \Delta h}}{h_0 + h_1}$	<p>Формула А. Ф. Головина и В. А. Тягунова [24].</p> <p>$\sigma_{\text{в}}$ — предел прочности стали в холодном, отожженном состоянии (см. рис. 67);</p> <p>t — температура нагрева металла, при $t \geq (t_{\text{пл}} - 575^\circ)$</p> $k_t = \frac{(t_{\text{пл}} - 75^\circ) - t_0}{1500},$ <p>при $t < (t_{\text{пл}} - 575^\circ)$</p> $k_t = \left(\frac{t_{\text{пл}} - t}{1000} \right)^2;$ <p>$t_{\text{пл}}$ — см. рис. 67</p>
(79-IV)	<p>где $k = n_\sigma n_\tau \sigma_{\text{т}}$;</p> $p_{\text{ср}} = n_\sigma n_\beta n_3 k,$ $n_\sigma = 1 + \frac{\delta}{\varepsilon} (1 - \sqrt{1 - \varepsilon})^2;$ $n_3 = 2 - \sqrt{\frac{l_x}{h_{\text{ср}}}}$	<p>Формула В. С. Смирнова [31].</p> <p>n_σ — коэффициент, учитывающий влияние контактного трения и наличие заднего и переднего натяжений (коэффициент подпора);</p> <p>n_β — коэффициент, учитывающий влияние среднего главного напряжения, т. е. влияние ширины полосы;</p> $n_\beta = 1 + \frac{f_{\text{уст}}}{3}$ <p>при</p> $0 \leq \frac{b_{\text{ср}}}{n_{\text{ср}}} \leq \frac{0,465}{f_{\text{уст}}}$ <p>и $n_\beta = 1,155$</p> $\frac{b_{\text{ср}}}{h_{\text{ср}}} > \frac{0,465}{f_{\text{уст}}};$ <p>n_3 — коэффициент, учитывающий влияние внешних зон;</p>

Номер формулы	Формулы и последовательность расчетов	Обозначения и примечания
(79-IV)	$n_3 = 2 - \sqrt{\frac{l_x}{h_{cp}}}$	<p>n_v — коэффициент, учитывающий влияние скорости деформации (см. рис. 71);</p> <p>n_n — коэффициент, учитывающий влияние наклепа (при горячей прокатке $n_n = 1$);</p> <p>σ_T — предел текучести при испытании на растяжение [12, 13]</p>
(80-IV)	$\rho_{cp} = \beta \sigma_n \left[1 + \left(\frac{\rho_{cp}}{k} - 1 \right) n_\Phi \right],$ <p>где $n_\Phi = \frac{\Pi}{2b}$</p>	<p>Формула А. П. Чекмарева [37].</p> <p>n_Φ — коэффициент формы калибра (см. табл. 33);</p> <p>Π — периметр калибра;</p> <p>b — ширина калибра по разему;</p> <p>$\frac{\rho_{cp}}{k}$ — см. формулу (74-IV)</p>

Значения коэффициента формы n_Φ для различных калибров (37):

	n_Φ
Квадратный	1,41
Ромбический, с углом при вершине, град.:	
100	1,30
110	1,20
120	1,15
Круглый	1,40
Овальный однорадиусный	
с $b/h = 1,5$	1,27
2	1,15
3	1,09
Овальный плоский	1,1—1,15
Шестигранный	1,15
Угловой и зетовый:	
чистовые	1,41
черновые	1,2—1,25
Калибры двутавровой балки:	
№ 30	1,7—1,9
№ 16	2,1—2,2
Калибры швеллера:	
№ 30	1,7—1,8
№ 16	1,8—2,0
№ 8	2,1—2,3
Рельс Р-50	2—2,1
Шпунт Л-5	1,8—2,1

**Формулы для расчета среднего давления
холодной прокатки**

Номер формулы	Формулы и последовательность расчетов	Обозначения и примечания
(81-IV)	$\rho_{\text{ср}} = \frac{2k}{\varepsilon\delta} \left[\left(\frac{1}{1-\varepsilon} \right)^{\frac{\delta-1}{2}} - \left(1 - \frac{\varepsilon}{2} \right) \right] \left(1 - \frac{\xi_0 + \xi_1}{2} \right),$ <p>где</p> $k = 1,15\sigma_T; \quad \varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}; \quad \xi_0 = \frac{\sigma_0}{k_0};$ $\xi_1 = \frac{\sigma_1}{k_1}; \quad k_0 = 1,15\sigma_T, \quad k_1 = 1,15\sigma_T$	<p><i>Формула А. А. Королева [67].</i></p> <p>σ_T — предел текучести металла до его обжатия в валках (см. табл. 35);</p> <p>σ_T — предел текучести металла после его обжатия в валках (см. табл. 34);</p> <p>ξ_0 и ξ_1 — коэффициенты, учитывающие изменение заднего σ_0 и переднего σ_1 натяжений; при $\xi_0 = \xi_1 = 0$ — натяжение отсутствует. Остальные обозначения — см. формулу (74-IV)</p>
(82-IV)	$\rho_{\text{ср}} = \frac{\xi_1 k_1}{m} \left[\left(\frac{\xi_0 k_0}{\xi_1 k_1} \right)^{\frac{h_0}{h_0+h_1}} e^m - \frac{\xi_0 k_0}{\xi_1 k_1} \cdot \frac{h_0}{h_0+h_1} - \frac{h_1}{h_0+h_1} \right],$ <p>где</p> $\xi_0 = 1 - \frac{\sigma_0}{k_0}; \quad \xi_1 = 1 - \frac{\sigma_1}{k_1};$ $m = \frac{fl}{h_{\text{ср}}}.$	<p><i>Формула А. И. Целикова [68].</i></p> <p>Если $\xi_0 = \xi_1 = 1$, то натяжение отсутствует. Остальные обозначения см. формулу (74-IV)</p>
(83-IV)	$\rho_{\text{ср}} = k \frac{h_N}{2fl} \left\{ \frac{1}{\delta-1} (\xi_0\delta-1) \times \left[\left(\frac{h_0}{h_N} \right)^\delta - \frac{h_0}{h_N} \right] + \left(\frac{h_0}{h_N} + 1 \right) + \frac{1}{\delta+1} (\xi_1\delta+1) \left[\left(\frac{h_1}{h_N} \right)^\delta - \frac{h_1}{h_N} \right] - \left(1 - \frac{h_1}{h_N} \right) \right\},$ <p>где</p> $\frac{h_N}{h_1} = \left[\frac{1 + \sqrt{1 + (\xi_0\delta-1) \times \left(\frac{h_0}{h_1} \right)^\delta}}{\xi_1\delta+1} \right]^{\frac{1}{\delta}}$	<p><i>Формула А. И. Целикова, учитывающая натяжение и наклеп [69].</i></p> <p>$\frac{h_N}{h_1}$ — отношение толщины полосы в нейтральном сечении к толщине изделия (см. рис. 14). Остальные обозначения — см. формулу (82-IV)</p>

Ниже приведено несколько примеров решения задач по определению среднего удельного давления металла на валки.

Задача № 95 [37]. Дано: сталь марки 08кп. Диаметр стальных валков $D_k = 800$ мм. Окружная скорость валков $v_b = 3$ м/сек. Температура металла 1100°C . Толщина полосы до прокатки $h_0 = 60$ мм, обжатие $\Delta h = 20$ мм. Ширина полосы $b_0 = 150$ мм. Коэффициент контактного трения $f_y = 0,356$.

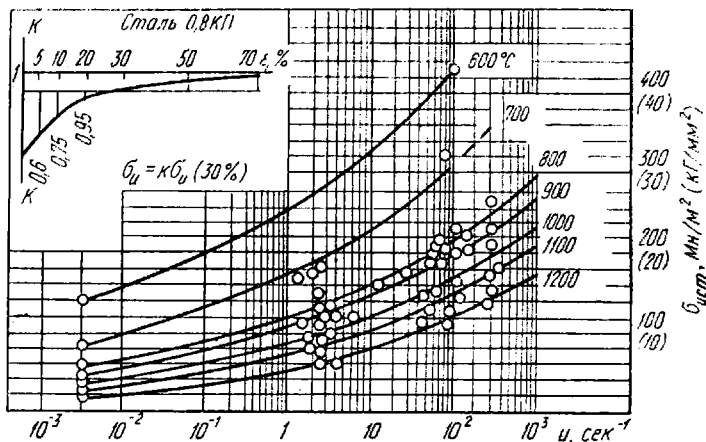


Рис. 64. Истинное сопротивление деформации стали 08кп (к задаче № 95)

По условию задачи определить среднее удельное давление $p_{\text{ср}}$ по формулам (74-IV) — (78-IV).

Решение по методу А. И. Целикова. Определим компоненты формулы (74-IV). Коэффициент $\beta = 1,15$. Длина проекции дуги захвата $l_x = 89,45$ мм (см. табл. 22). Опережение не предусматривается, поэтому $v_h = v_b = 3$ м/сек, обжатие $\Delta h = 20$ мм; $h_0 = 60$ мм.

В этом случае, согласно формуле А. И. Целикова, скорость деформации $u = 11,2$ сек $^{-1}$. Истинное сопротивление деформации металла $\sigma_k = 103$ Мн/м 2 (10,2 кг/мм 2) (рис. 64). Определяем значения $\delta = 3,21$ и $\epsilon = 0,33$. По графику рис. 65 находим $\frac{p_{\text{ср}}}{k} = 1,4$. Коэффициент, учитывающий влияние внешних зон при $\frac{l_x}{h_{\text{ср}}} = \frac{89,2}{50} = 1,78$, определяем по графику рис. 66: $n_\sigma'' = 1,0$.

По полученным данным среднее удельное давление равно:

$$p_{\text{ср}} = \beta \sigma_k \left(\frac{p_{\text{ср}}}{k} \right) n_\sigma''$$

или

$$p_{\text{ср}} = 1,15 \cdot 103 \cdot 1,40 \cdot 1,0 = 166 \text{ Мн/м}^2 \text{ (16,6 кг/мм}^2\text{)}.$$

Решение по методу С. И. Губкина. Имеем следующие значения компонентов формулы (75-IV): $k_v = 2,5$; $\beta = 0,008$. Температура плавления металла по графику рис. 67 $t_{пл} = 1550^\circ \text{C}$. По данным С. И. Губкина $\sigma_n = 5 \text{ Мн/м}^2$ ($0,5 \text{ кг/мм}^2$). Тогда $\rho_0 = 104,8 \text{ Мн/м}^2$ ($10,48 \text{ кг/мм}^2$). При $k_\sigma = 1,3$; $f = 0,356$ и

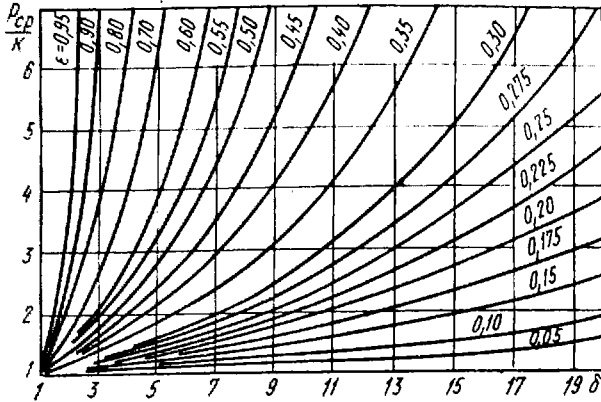


Рис. 65. График для определения отношения ρ_{cp}/k по А. И. Целикову (к задаче № 95):

$$\delta = \frac{2f}{\Delta h} l_d = 2f \sqrt{\frac{R}{\Delta h}} \approx \frac{2f}{\alpha}$$

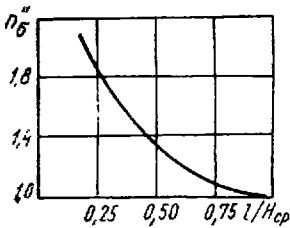


Рис. 66. Зависимость n_σ от параметра l/H_{cp} (к задаче № 95)

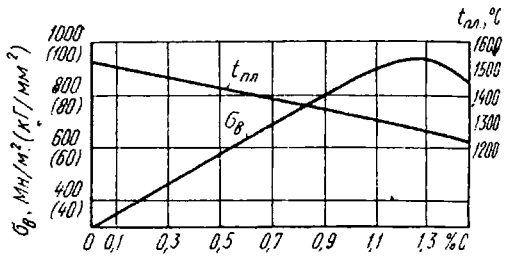


Рис. 67. Кривые для определения $t_{пл}$ и σ_n углеродистых сталей (к задаче № 95)

$\sqrt{\frac{R}{h_0}} = \sqrt{\frac{400}{60}} \approx 2,6$ величина $k_f = 1,69$. Тогда $\rho_{cp} = k_f \rho_0 = 1,69 \cdot 10,48 = 17,7 \text{ кг/мм}^2$ или 177 Мн/м^2 .

Решение по формуле С. Экелунда. Для определения ρ_{cp} , как видно из формулы (76-IV), необходимо вычислить следующие компоненты:

$$m = \frac{1,6 \cdot 0,356 \sqrt{400 \cdot 20} - 1,2 \cdot 20}{60 + 40} = 0,269;$$

$$2k = 9,81 (14 - 0,01 \cdot 1100) (1,4 + 0,08 + 0,4) \approx 56,4 \text{ Мн/м}^2 (5,64 \text{ кг/мм}^2),$$

$$\eta = 0,098 (14 - 0,01 \cdot 1100) \cdot 1 = 0,294.$$

Скорость деформации

$$u = \frac{2 \cdot 3000 \sqrt{\frac{20}{400}}}{60 + 40} = 13,4 \text{ сек}^{-1}.$$

Подставляя значения этих параметров в формулу (76-IV), получим:

$$\rho_{\text{ср}} = (1 + 0,269) (5,64 + 0,294 \cdot 13,4) =$$

$$= 121 \text{ Мн/м}^2 (12,1 \text{ кг/мм}^2).$$

Решение по формуле Ш. Гелеи. Вначале определяем сопротивление деформации по формуле (77-IV) $k_f = 45 \text{ Мн/м}^2 (4,5 \text{ кг/мм}^2)$. По известным величинам $l_x = \sqrt{R\Delta h} = 89,45 \text{ мм}$ и $\frac{l_x}{h} = \frac{89,5}{40} = 2,24$ определяем коэффициент $C = 2,2$ (см. рис. 68). Скорость валков $v_b = 3 \text{ м/сек}$. Тогда

$$\rho_{\text{ср}} = 4,5 (1 + 2,2 \cdot 0,356 \cdot 2,24 \sqrt[4]{3}) \approx$$

$$\approx 144 \text{ Мн/м}^2 (14,4 \text{ кг/мм}^2).$$

Решение по формуле А. Ф. Головина и В. А. Тягунова. При $f = 0,356$ и $\frac{l_x}{h_{\text{ср}}} = \frac{2 \cdot \sqrt{400 \cdot 20}}{60 + 40} = 1,79$ внешнее сопротивление $k_f = 1,28$ (78-IV). Температура плавления металла 1550°С и $\sigma_b = 200 \text{ Мн/м}^2 (20 \text{ кг/мм}^2)$ (см. рис. 67). Температурный коэффициент

$$k_t = \frac{(1500 - 75) - 1100}{1500} = 0,317.$$

Тогда $\rho_{\text{ср}} = 1,28 \cdot 0,317 \cdot 20 = 81 \text{ Мн/м}^2 (8,1 \text{ кг/мм}^2)$.

Задача № 96. По формуле В. С. Смирнова (79-IV) определить удельное давление металла на валки $\rho_{\text{ср}}$ при горячей прокатке крупной заготовки, если известно, что $h_0 = 320 \text{ мм}$, $h_1 = 270 \text{ мм}$, $b_0 = 320 \text{ мм}$ и $b_1 = 325 \text{ мм}$. Диаметр валков $D_k = 670 \text{ мм}$, скорость прокатки $v_b = 3 \text{ м/сек}$, температура прокатки 1100°С , коэффициент трения $f = 0,3$. Содержание углерода в стали $0,3\%$; $\sigma_b \cong \sigma_T = 40 \text{ Мн/м}^2 (4 \text{ кг/мм}^2)$ при 1100°С (см. рис. 67).

Решение. Упругое сплющивание валков не учитывают, так как истинное сопротивление деформации нагретого металла велико и, более того, имеет место уменьшение длины контактной поверхности вследствие утяжки заднего конца.

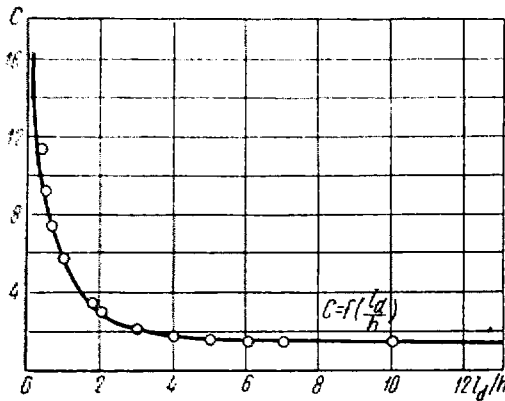


Рис. 68. Значение коэффициента c в зависимости от l_d/h (по данным Ш. Гелен)

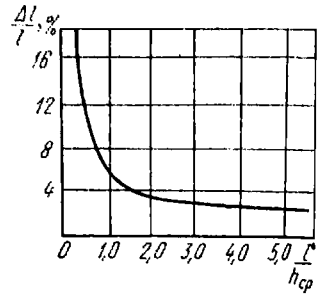


Рис. 69. Сокращение длины контактной поверхности вследствие высотной утяжки в зависимости от параметра l/h_{cp} (к задаче № 96)

Длина контактной поверхности без учета утяжки заднего конца

$$l = \sqrt{0,5D_k \Delta h} = \sqrt{0,5 \cdot 670 \cdot 50} = 129 \text{ мм.}$$

Средняя высота очага деформации

$$h_{cp} = \frac{h_0 + h_1}{2} = \frac{320 + 270}{2} = 295 \text{ мм.}$$

Отношение

$$a = \frac{l'}{h_{cp}} = \frac{129}{295} = 0,44.$$

По номограмме рис. 69 при $\frac{l'}{h_{cp}} = 0,44$ имеем:

$$\frac{\Delta l}{l} = 12\%, \text{ т. е. } \Delta l = 0,12l' = 0,12 \cdot 129 = 15,5 \text{ мм.}$$

Тогда длина контактной поверхности с учетом утяжки $l' = l - \Delta l = 129 - 15,5 = 113,5 \text{ мм}$, а $\frac{l}{h_{cp}} = \frac{113,5}{295} = 0,385$.

Коэффициент, учитывающий влияние внешних зон, равен:

$$n_3 = 2 - \sqrt{\frac{l}{h_{cp}}} = 2 - 0,385 = 1,38.$$

Средняя ширина очага деформации

$$b_{\text{ср}} = \frac{320 + 325}{2} = 323 \text{ мм.}$$

Отношение $\frac{b_{\text{ср}}}{h_{\text{ср}}} = \frac{323}{295} = 1,1$, что меньше, чем $\frac{0,465}{f_{\text{уст}}} = \frac{0,465}{0,3} = 1,55$.

В этом случае коэффициент, учитывающий величину среднего главного напряжения σ_2 , будет равен:

$$n_{\beta} = 1 + \frac{f}{3} \cdot \frac{b_{\text{ср}}}{h_{\text{ср}}} = 1 + \frac{0,3}{3} \cdot 1,1 = 1,11.$$

Угол захвата

$$\alpha = \frac{\Delta h}{l} = \frac{40}{113,5} = 0,44$$

и

$$\delta = \frac{2f_{\text{уст}}}{\alpha} = \frac{2 \cdot 0,3}{0,44} = 1,36.$$

Относительное обжатие при прокатке

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{50}{320} = 0,157.$$

По данным $\delta = 1,36$ и $\varepsilon = 0,157$ определяем величину критерия A , характеризующего наличие участков скольжения и прилипания:

$$A = \frac{\delta}{2 \sqrt{\frac{\delta^2 - 1}{(1 - \varepsilon)^\delta} + 1}} = \frac{1,36}{2 \sqrt{\frac{(1,36)^2 - 1}{(1 - 0,157)^{1,36} + 1}}} = 0,49,$$

т. е. критерий $A > f_{\text{уст}}$ (рис. 70). Следовательно, на контактной поверхности имеется участок прилипания. Поэтому коэффициент подпора, учитывающий влияние контактного трения:

$$n_{\sigma} = 1 + \frac{\delta}{\varepsilon} (1 - \sqrt{1 - \varepsilon})^2 = 1 + \frac{1,36}{0,157} (1 - \sqrt{1 - 0,157})^2 = 1,05.$$

Для определения коэффициента n_v , учитывающего влияние скорости деформирования, вычисляем среднюю скорость деформации:

$$u_{\text{ср}} = \frac{v_{\text{в}}}{l} \cdot \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{3000}{113,5} \cdot 0,157 = 4,15 \text{ сек}^{-1}.$$

По номограмме рис. 71 находим $n_v = 2,5$. При горячей прокатке коэффициент наклепа $n_{\text{н}} = 1$.

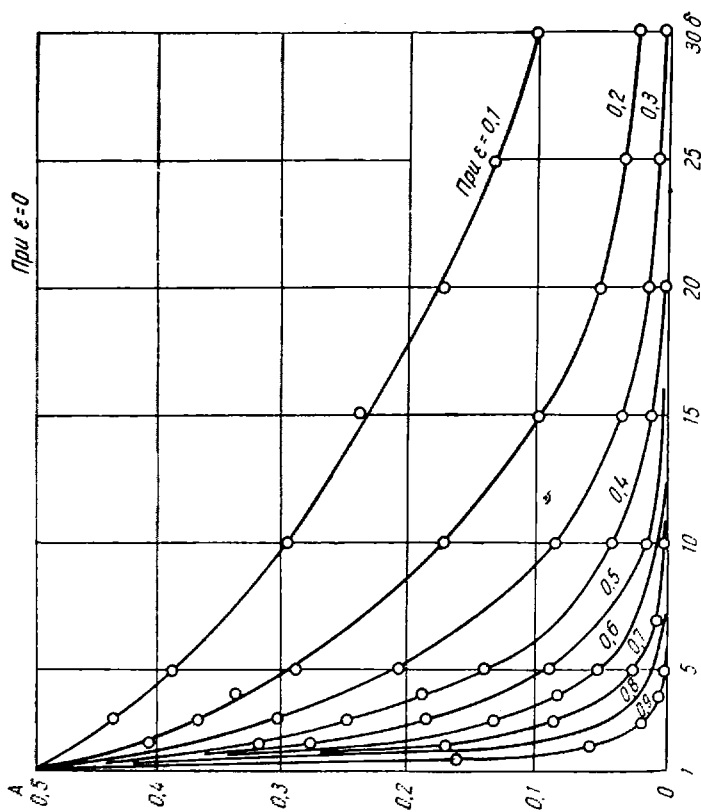


Рис. 70. Номограмма критерия A , характеризующего наличие участков скольжения и прилипания (к задаче № 96)

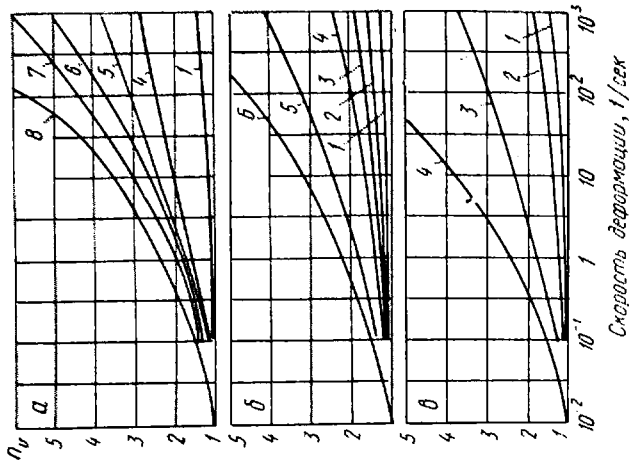


Рис. 71. Изменение коэффициента ν , учитывающего влияние скорости (к задаче № 96):
 a — сталь; $б$ — медь; $в$ — алюминий.
 1 — 20; 2 — 300; 3 — 400; 4 — 600; 5 — 700;
 6 — 800; 7 — 1000; 8 — 1200

Таким образом, истинное сопротивление деформации равно:

$$k = n_v n_n \sigma_T = 2,5 \cdot 1 \cdot 40 = 100 \text{ Мн/м}^2 \text{ (10 кг/мм}^2\text{)}.$$

Среднее удельное давление на валки:

$$p_{cp} = n_\sigma \cdot n_\beta \cdot n_3 \cdot k = 1,05 \cdot 1,11 \cdot 1,38 \cdot 100 = 160 \text{ Мн/м}^2 \\ \text{(16 кг/мм}^2\text{)}.$$

Задача № 97. По методу А. П. Чекмарева определить p_{cp} для случая прокатки круга диаметром $d = 20 \text{ мм}$ из стали 08кп при температурно-скоростных условиях деформации задачи № 95.

Решение. В формуле (80-IV)

$$\beta = 1,15; \sigma_u = 103 \text{ Мн/м}^2 \text{ (10,3 кг/мм}^2\text{)}; \frac{p_{cp}}{k} = 1,4 \text{ и } n_{cp} = 1,4 \\ \text{(табл. 34)}$$

Тогда

$$p_{cp} = 1,15 \cdot 103 [1 + (1,4 - 1) 1,4] = \\ = 185,0 \text{ Мн/м}^2 \text{ (18,50 кг/мм}^2\text{)}.$$

Для случая плоской деформации $p_{cp} = 166 \text{ Мн/м}^2 \text{ (16,6 кг/мм}^2\text{)}$ (см. задачу № 95).

По данным А. П. Чекмарева [37], заметное влияние формы калибра на напряженное состояние наблюдается при прокатке сравнительно тонких полос, когда коэффициент $n_\sigma = p_{cp}/k$ имеет высокое значение. При деформации толстых полос коэффициент n_σ незначительно отличается от единицы и влияние формы калибра мало заметно.

Задача № 98 [67]. По методу А. А. Королева определить среднее удельное давление p_{cp} металла на валки при холодной прокатке жести в третьей клети пятиклетевого стана.

Дано: $D_k = 400 \text{ мм}$, $h_0 = 2,2 \text{ мм}$; $h_1 = 1,35 \text{ мм}$; $h_2 = 0,8 \text{ мм}$; $h_3 = 0,5 \text{ мм}$; $h_4 = 0,32 \text{ мм}$; $h_5 = 0,24 \text{ мм}$. Ширина полосы 1000 мм . Материал полосы — сталь 20.

Валки и полоса смазываются теплой водной эмульсией, содержащей 5% касторового или хлопкового масла. В этих условиях смазки коэффициент трения принимают равным $f_{уст} = 0,065$.

Решение. Прокатку производят при следующем режиме обжатия:

$$\Delta h = 0,85 \text{ мм} \rightarrow 0,55 \text{ мм} \rightarrow 0,30 \text{ мм} \rightarrow 0,18 \text{ мм} \rightarrow 0,08 \text{ мм}.$$

Соответственно:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = 0,386 \rightarrow 0,407 \rightarrow 0,375 \rightarrow 0,36 \rightarrow 0,25.$$

Суммарное относительное обжатие:

$$\varepsilon_\Sigma = 0,386 \rightarrow 0,635 \rightarrow 0,77 \rightarrow 0,855 \rightarrow 0,89.$$

Предел текучести материала прокатываемой полосы по данным А. А. Королева после второго прохода ($\varepsilon_2 = 0,407$) $\sigma_{T0} = 520 \text{ Мн/м}^2 \text{ (52 кг/мм}^2\text{)}$; после третьего прохода ($\varepsilon_3 = 0,375$) $\sigma_{T1} = 620 \text{ Мн/м}^2 \text{ (62 кг/мм}^2\text{)}$.

Сопротивление деформации металла:

$$k_0 = 1,15\sigma_0 = 1,15 \cdot 520 = 600 \text{ Мн/м}^2 \text{ (60 кг/мм}^2\text{);}$$

$$k_1 = 1,15\sigma_1 = 1,15 \cdot 620 = 710 \text{ Мн/м}^2 \text{ (71 кг/мм}^2\text{)}.$$

Прокатку необходимо производить с натяжением полосы между второй и третьей клетями, в этом случае $\sigma_0 = 150 \text{ Мн/м}^2$ (15 кг/мм²) и между третьей и четвертой клетями, где $\sigma_1 = 120 \text{ Мн/м}^2$ (12 кг/мм²).

Длина зоны контакта металла с валками в третьей клети без учета упругого сплющивания валков:

$$l_x = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{200 \cdot 0,3} = 7,74 \text{ мм.}$$

Длину зоны контакта металла с валками с учетом упругого сплющивания валков определяем графически по методу А. А. Королева [67].

Строим прямую

$$y' = \frac{l_{\text{спл}}}{7,74}.$$

Затем строим график функции

$$y_2 = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{a + bA'^{\text{спл}}} \right),$$

где

$$b = \frac{2 - \varepsilon}{4750 f_y \varepsilon} \left(\frac{k_0 + k_1}{2} - \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{2} \right) =$$

$$= \frac{2 - 0,375}{4750 \cdot 0,065 \cdot 0,375} \left(\frac{60 + 71}{2} - \frac{15 + 12}{2} \right) = 0,728;$$

$$a = 1 - b = 1 - 0,728 = 0,272;$$

$$A = \left(\frac{1}{1 - \varepsilon} \right)^{\frac{l}{\Delta h}} = \left(\frac{1}{1 - 0,375} \right)^{\frac{0,065}{0,3}} = (1,6)^{0,217} = 1,11.$$

Задаемся значениями $l_{\text{спл}} = 8, 10, 12$ и 15 мм , тогда $y' = 1,035; 1,295; 1,56$ и $1,94$, $A'^{\text{спл}} = 2,37; 2,78; 3,40; 4,60$ и $y_2 = 1,21; 1,26; 1,34; 1,46$.

Пересечение прямой y_1 с кривой y_2 соответствует величине $l_{\text{спл}}$ (рис. 72). В приведенном примере $l_{\text{спл}} = 9,6 \text{ мм}$.

Таким образом, за счет упругого сжатия валков при прокатке длина контакта увеличилась в $\frac{9,6}{7,74} = 1,24$ раза, т. е. на 24%.

Среднее удельное давление с учетом упругого сжатия валков при прокатке с натяжением находим по формуле

$$p_{\text{ср}} = \frac{9500}{R} (l'_{\text{спл}} - l) = \frac{9500}{0,2} (0,0096 - 0,00774) =$$

$$= 884 \text{ Мн/м}^2 \text{ (88,4 кг/мм}^2\text{)}.$$

Без учета упругого сжатия валков:

а) при прокатке без натяжения:

для

$$\varepsilon = 0,375 \text{ и } \delta = 2f_{\text{уст}} \frac{l}{\Delta h} = 2 \cdot 0,065 \frac{7,74}{0,3} = 3,36 \text{ по}$$

формуле (81-IV) или по графику рис. 73, имеем $\frac{p_{\text{ср}}}{k_{\text{ср}}} = 1,65$.

Тогда

$$p_{\text{ср}} = 1,65 \cdot k_{\text{ср}} = 1,65 \cdot 655 = 1080 \text{ МН/м}^2 \text{ (108 кг/мм}^2\text{),}$$

где

$$k_{\text{ср}} = \frac{600 + 710}{2} = 655 \text{ МН/м}^2 \text{ (65,5 кг/мм}^2\text{);}$$

б) при прокатке с натяжением:

$$1 - n_{\sigma} = 1 - \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2k_{\text{ср}}} = 1 - \frac{15 + 12}{2 \cdot 65,5} = 1 - 0,206 = 0,794;$$

$$p_{\text{ср}}^{\text{н}} = p_{\text{ср}} (1 - n_{\sigma}) = 1080 \cdot 0,794 =$$

$$= 860 \text{ МН/м}^2 \text{ (86 кг/мм}^2\text{).}$$

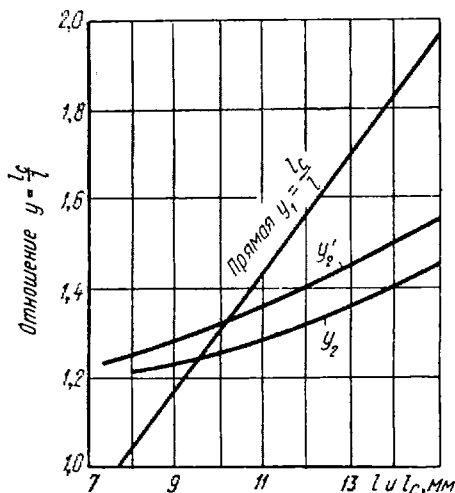


Рис. 72. Графическое определение длины контакта с учетом упругого сплющивания валков ($l = 7,72 \text{ мм}$)

Таким образом, без учета упругого сжатия валков и без натяжения среднее давление $p_{\text{ср}}$ повышается в данном случае на $\frac{1080 - 860}{860} = 0,256$, или на 25,6%.

Определим $p_{\text{ср}}$ с учетом сжатия валков при прокатке без натяжения. Для этого найдем величину b' по формуле

$$b' = \frac{2 - \varepsilon}{4750 f_{\text{уст}} \varepsilon} \cdot \frac{k_0 + k_1}{2} = \frac{2,0 - 0,375}{4750 \cdot 0,065 \cdot 0,375} \cdot \frac{60 + 71}{2} \approx 0,91;$$

$$a' = 1 - b' = 1 - 0,91 = 0,09.$$

Ранее были определены значения $f^{\text{спл}} = 2,37; 2,78; 3,40$ и $4,60$.

Тогда по формуле

$$y'_2 = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{a' + b' A'^{\text{спл}}} \right)$$

вычисляем y'_2 с учетом известных значений $A'^{\text{спл}}$.

Получили соответственно: $y'_2 = 1,25; 1,31; 1,41$ и $1,54$.

Точке пересечения прямой y_1' с кривой y_2' соответствует $l'_{\text{спл}} = 10,2 \text{ мм}$ (рис. 72).

Определяем среднее удельное давление по формуле:

$$p_{\text{ср}} = \frac{9500}{R} (l'_{\text{спл}} - l)$$

или

$$p_{\text{ср}} = \frac{9500}{0,2} (0,0102 - 0,00774) = 1180 \text{ Мн/м}^2 \text{ (118 кг/мм}^2\text{)}.$$

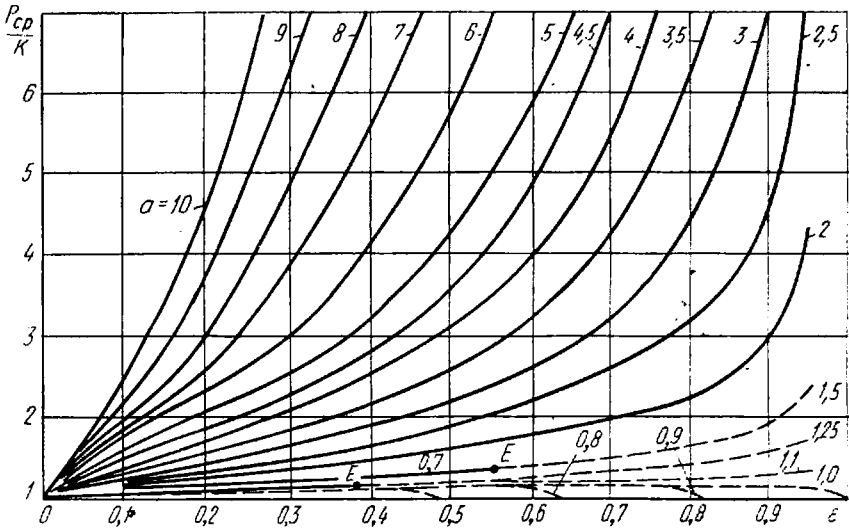


Рис. 73. Кривые для графического определения среднего удельного давления при прокатке без натяжения (точка E — граница естественного захвата металла валками):

$$\frac{p_{\text{ср}}}{k_1} = \frac{2}{\epsilon \delta} \left[\left(\frac{1}{1-\epsilon} \right)^{\frac{\delta-1}{2}} - \left(1 - \frac{\epsilon}{2} \right) \right]; \quad \delta = a \frac{1}{\sqrt{\epsilon}}; \quad a = \frac{2f}{\sqrt{\frac{h_0}{R}}}$$

Таким образом, если бы прокатка происходила без натяжения, $p_{\text{ср}}$ увеличилось бы на $\frac{1180 - 884}{884} = 0,335$, т. е. на 33,5% по сравнению с прокаткой с натяжением.

Задача № 99. Определить удельное давление при холодной прокатке листа из стали с содержанием в ней 0,1% С, если прокатка осуществляется с передним натяжением $\xi_1 = -0,4$, при следующих условиях: $h_0 = 1,0 \text{ мм}$; $\frac{\Delta h}{h_0} = 0,4$; $D_k = 130 \text{ мм}$ и $f = 0,2$.

Решение. Воспользуемся методикой А. И. Целикова [68]. Величина заднего натяжения $\xi_0 = 1 - \frac{\sigma_0}{k_0}$, а переднего $\xi_1 = 1 - \frac{\sigma_1}{k_1}$,

где σ_0 и σ_1 — растягивающие напряжения в поперечном сечении прокатываемой полосы, возникающие в результате действия усилий натяжения на входе в очаг деформации и выходе из него;

k_0 и k_1 — пределы текучести, соответствующие условиям деформации полосы до и после прокатки, умноженные на коэффициент 1,15. Вначале определяют предварительные данные:

$$l_d = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{65 \cdot 0,4} = 5,1 \text{ мм};$$

$$m = \frac{2fl_d}{h_0 + h_1} = \frac{2 \cdot 0,2 \cdot 5,1}{1 + 0,6} = 1,27;$$

$$e^m = e^{1,27} = 3,56;$$

$$\frac{h_0}{h_0 + h_1} = \frac{1,0}{1 + 0,6} = 0,62.$$

По данным А. И. Целикова [68] пределы текучести прокатываемой стали при $\frac{\Delta h}{h_0} = 0$ и $\frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100 = 40\%$ соответственно равны $\sigma'_T = 300 \text{ Мн/м}^2$ (30 кг/мм²) и $\sigma''_T = 580 \text{ Мн/м}^2$ (58 кг/мм²).

Тогда пределы текучести полосы k_0 и k_1 при данных условиях деформации до и после прокатки соответственно равны:

$$k_0 = 1,15\sigma'_T = 1,15 \cdot 300 = 345 \text{ Мн/м}^2 \text{ (34,5 кг/мм}^2\text{)};$$

$$k_1 = 1,15\sigma''_T = 1,15 \cdot 580 = 667 \text{ Мн/м}^2 \text{ (66,7 кг/мм}^2\text{)}.$$

Растягивающие напряжения от натяжения, учитывая, что $\xi = 1$ при $\sigma_0 = 0$, для значений $\xi_1 = 0,4$ и $k_1 = 667 \text{ Мн/м}^2$ (66,7 кг/мм²) определяют по формуле:

$$\sigma_1 = k_1 (1 - \xi_1) = 667 (1 - 0,4) = 400 \text{ Мн/м}^2 = (40 \text{ кг/мм}^2\text{)}.$$

После этого рассчитываем среднее удельное давление по формуле (82-IV):

$$\begin{aligned} p_{cp} &= \frac{0,4 \cdot 667}{1,27} \left[\left(\frac{1,345}{0,4 \cdot 667} \right)^{0,62} \cdot 3,56 - \frac{1,345}{0,4 \cdot 667} \cdot 0,62 - \frac{0,6}{1,6} \right] = \\ &= 630 \text{ Мн/м}^2 \text{ (63 кг/мм}^2\text{)}. \end{aligned}$$

Задача № 100 [69]. Определить среднее давление металла на валок при следующих условиях: $D_k = 406 \text{ мм}$; $h_0 = 1,6 \text{ мм}$; $h_1 = 0,74 \text{ мм}$; $\frac{\Delta h}{h} \cdot 100 = 54\%$; $f = 0,04$. Переднее натяжение $\sigma_1 = 77,3 \text{ Мн/м}^2$ (7,73 кг/мм²), заднее натяжение $\sigma_0 = 64,7 \text{ Мн/м}^2$ (6,47 кг/мм²).

Спротивление деформации на входе $k_0 = 1,15 \sigma_{T0} = 270 \text{ Мн/м}^2$ (27 кг/мм²), на выходе $k_1 = 1,15 \sigma_{T1} = 640 \text{ Мн/м}^2$ (64 кг/мм²).

Решение. Задачу решаем по методу Н. И. Крейндына с использованием формул А. И. Целикова (см. табл. 33). Определяем среднее значение предела текучести в заданных условиях:

$$k_{cp} = \frac{k_0 + k_1}{2} = \frac{270 + 640}{2} = 455 \text{ Мн/м}^2 \text{ (45,5 кг/мм}^2\text{)};$$

$$\xi_0 = 1 - \frac{\sigma_0}{k_{cp}} = 1 - \frac{64,7}{455} = 0,858; \quad \xi_1 = 1 - \frac{\sigma_1}{k_{cp}} = 1 - \frac{77,3}{455} = 0,830.$$

Определяем отношение h_H/h по формуле А. И. Целикова (см. табл. 33) или по номограмме рис. 74:

$$\frac{h_H}{h_1} = \left[\frac{1 + \sqrt{1 + (\xi_0 \delta - 1)(\xi_1 \delta + 1) \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^\delta}}{\xi_1 \delta + 1} \right]^{\frac{1}{\delta}} =$$

$$= \left[\frac{1 + \sqrt{1 + (0,858 \cdot 1,23 - 1)(0,830 \cdot 1,23 + 1) \cdot 2,58}}{0,830 \cdot 1,23 + 1} \right]^{\frac{1}{1,23}} = 1,041,$$

где

$$l_x = \sqrt{R \Delta h} = \sqrt{203 \cdot 0,86} = 13,22 \text{ мм};$$

$$\delta = \frac{2fl_x}{\Delta h} = \frac{2 \cdot 0,04 \cdot 13,2}{0,86} = 1,23;$$

$$\left(\frac{h_0}{h_1}\right)^\delta = \left(\frac{1,6}{0,74}\right)^{1,23} = 2,58; \quad \xi_0 = 0,858;$$

$$\xi_1 = 0,830,$$

откуда

$$h_H = 0,74 \cdot 1,041 = 0,770 \text{ мм.}$$

Среднее удельное давление с учетом натяжения и наклепа (83-IV):

$$p_{cp} = 455 \frac{0,770}{2 \cdot 0,04 \cdot 13,22} \left\{ \frac{1}{1,23 - 1} (0,858 \cdot 1,23 - 1) \left[\left(\frac{1,6}{0,770}\right)^{1,23} - \frac{1,6}{0,770} \right] + \left(\frac{1,6}{0,770} - 1\right) + \frac{1}{1,23 + 1} (0,830 \cdot 1,23 + 1) \left[\left(\frac{0,770}{0,74}\right)^{1,23} - \frac{0,74}{0,770} \right] - \left(1 - \frac{0,74}{0,770}\right) \right\} = 401 \text{ Мн/м}^2 \text{ (40,1 кг/мм}^2\text{)}.$$

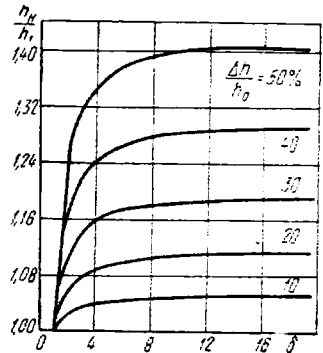


Рис. 74. Номограмма для определения высоты полосы в нейтральном сечении при наличии только зон скольжения

7. ЭНЕРГИЯ, ЗАТРАЧИВАЕМАЯ НА ПРОКАТКУ

Энергия, затрачиваемая при прокатке металла, зависит от многих факторов, учет которых затруднителен при выводе аналитических формул. Поэтому А. И. Целиков при расчетах общего расхода энергии при прокатке рекомендует пользоваться результатами экспериментальных исследований, представленных в виде графиков в работе [30].

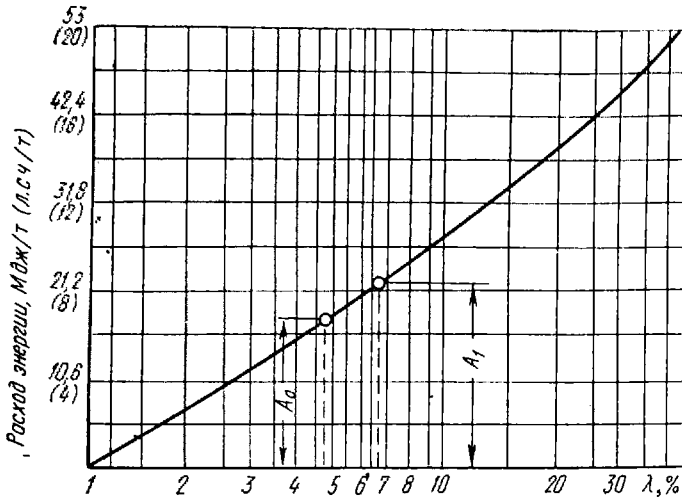


Рис. 75. График расхода энергии на 1 т металла при прокатке блюма в зависимости от общего удлинения

Приведем пример по определению общего расхода работы с помощью графика (рис. 75).

Задача № 101. По номограмме на рис. 75 определить работу, мощность и моменты прокатки на блюминге 1000 в шестом проходе. Дано: $D_k = 900$ мм; $n = 60$ об/мин. Масса слитка $G = 5,5$ т, длина слитка $L_0 = 1900$ мм; размеры сечения слитка 615×615 мм; площадь сечения слитка $F_0 = 378\,200$ мм², сечение блюма после пятого прохода 455×505 мм, $F_5 = 229\,800$ мм². Сечение блюма после шестого прохода 400×510 мм, $F_6 = 204\,000$ мм².

Решение. 1. Общие коэффициенты вытяжки за проход:

$$\mu_{\text{общ}} = \mu_1 \mu_2 \mu_3 \mu_4 \mu_5 = \frac{378\,200}{229\,800} = 1,64;$$

$$\mu_{\text{общ}}'' = \mu_1 \mu_2 \mu_3 \mu_4 \mu_5 \mu_6 = \frac{378\,200}{204\,000} = 1,85.$$

2. По номограмме рис. 75 удельный расход энергии при вытяжке $\mu = 16,4$ составляет $a_5 = 6,36$ МДж/т (2,4 л. с. · ч/т), а при вытяжке $\mu = 1,85$ — $a_6 = 8,22$ МДж/т (3,1 л. с. · ч/т).

3. Общий расход работы за шестой проход:

$$A_6 = 3,6 (a_6 - a_5) G = 3,6 (8,22 - 6,36) \cdot 5,5 = \\ = 36,83 \text{ Мдж (14,2 л. с. \cdot ч)}.$$

4. Длина раската после шестого прохода

$$L_6 = \mu_{\text{общ}} L_0 = 1,85 \cdot 1,9 = 3,5 \text{ м.}$$

5. Скорость валков

$$v_6 = \frac{\pi D n}{60} = \frac{3,14 \cdot 0,9 \cdot 60}{60} = 2,83 \text{ м/сек.}$$

6. Время пребывания металла в шестом проходе

$$t = \frac{L_6}{v_6} = \frac{3,5}{2,83} = 1,23 \text{ сек.}$$

7. Потребляемая мощность в шестом проходе

$$N_6 = \frac{A_6}{t_6} = 2994 \text{ квт.}$$

8. Момент прокатки

$$M = \frac{N \eta}{1,025 n} = \frac{2994 \cdot 0,93}{1,025 \cdot 60} = 27,2 \text{ Мн} \cdot \text{м (2720 Т} \cdot \text{м)},$$

где η — к. п. д. двигателя.

Графики, подобные графикам, приведенным на рис. 75, имеются в специальных альбомах, а также в работах [30, 71, 72].

Определение энергии по моменту вращения валков

Зная момент двигателя $M_{\text{дв}}$ и угловую скорость, можно определить мощность двигателя по формуле

$$N = 0,736 M_{\text{дв}} \omega, \quad (84\text{-IV})$$

где

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{пр}} + M_{\text{тр}} + M_{\text{х. х}} + M_{\text{див}}; \quad (85\text{-IV})$$

$\omega = \frac{\pi n}{30}$ — угловая скорость, *рад/сек.*

В уравнении (85-IV) момент прокатки $M_{\text{пр}}$ зависит от величины равнодействующей P сил, действующих при прокатке, и размера плеча a — расстояния от линии действия силы P до оси, проходящей через центры валков. По классификации А. И. Целикова [68] имеются девять основных случаев прокатки, характеризующихся направлением действия силы P и размером плеча a .

Ниже будет рассмотрен только наиболее распространенный случай так называемой простой прокатки. Особенности всех остальных случаев прокатки достаточно подробно описаны в работах А. И. Целикова [56, 68] и А. А. Королева [67].

В условиях простого процесса прокатки, когда на полосу действуют только силы межвалкового давления, движение полосы

на входе и выходе из валков равномерное. Оба валка приводные и имеют одинаковые диаметры и окружные скорости. Металл по механическим свойствам однороден. Равнодействующая всех сил, действующих при прокатке, направлена параллельно линии, соединяющей центры валков. В этом случае момент прокатки, который требуется для деформации металла и преодоления сил трения между металлом и валками, определяют по простой формуле:

$$M_{\text{пр}} = 2Pa. \quad (86\text{-IV})$$

В случае горячей прокатки угол, характеризующий точку приложения равнодействующей силы, равен

$$\beta = 0,5\alpha.$$

При холодной прокатке

$$\beta = (0,35 \div 0,45) \alpha.$$

Тогда

$$a = \frac{\beta}{\alpha} l_{\text{хорд}} = 0,5 \sqrt{R\Delta h},$$

где $l_{\text{хорд}} = \sqrt{R\Delta h}$ — длина хорды дуги захвата.

После подстановки величины a в формулу (86-IV) получим

$$M_{\text{пр}} = 2Pa = 2P0,5 \sqrt{R\Delta h} = P \sqrt{R\Delta h}. \quad (87\text{-IV})$$

Для определения полного момента прокатки необходимо определить момент сил трения в подшипниках валков и подшипниках промежуточных звеньев клетки:

$$M_{\text{тр}} = Pfd\eta, \quad (88\text{-IV})$$

где

f — коэффициент трения в подшипниках валков;

d — диаметр шейки валков;

$\eta = 2$ — коэффициент, учитывающий потери на трение в промежуточных звеньях клетки.

Сумму моментов прокатки и трения называют статическим моментом:

$$M_{\text{ст}} = M_{\text{пр}} + M_{\text{тр}} = P (\sqrt{R\Delta h} + fd\eta). \quad (89\text{-IV})$$

Во всех остальных случаях прокатки направление равнодействующей силы отлично от вертикального, поэтому размер плеча a следует рассчитывать по формулам, приведенным в работах [5, 30, 67, 68].

Задача № 102. Проверить допустимость выбранного обжатия по мощности двигателя для следующего случая прокатки. Привод блюминга осуществлен от электродвигателя мощностью 5152 квт (7000 л. с.), $n = 0-40-80$ об/мин. Слиток из углеродистой кипящей стали массой 7 т имеет наибольшее сечение 700×700 мм; диаметр валков 1200 мм; длина бочки валков 2600 мм; обжатие в первом проходе $\Delta h = 100$ мм; температура металла 1250°C ; среднее удельное давление $p_{\text{ср}} = 50,5 \text{ Мн/м}^2$ ($5,05 \text{ кг/мм}^2$); диа-

метр шейки валка 600 мм; коэффициент трения в текстолитовых подшипниках $f = 0,006$.

Решение. Равнодействующая сила

$$P = p_{\text{ср}} b_{\text{ср}} \sqrt{R \Delta h} = 50,5 \cdot 0,7 \sqrt{0,6 \cdot 0,1} = 8,56 \text{ Мн (856 Т)}.$$

Статический момент (89-IV)

$$M_{\text{ст}} = 8,56 (\sqrt{0,6 \cdot 0,1} + 0,6 \cdot 0,006 \cdot 2) = 2,1 \text{ Мн} \cdot \text{м (210 Т} \cdot \text{м)}.$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_{\text{дв}}^{\text{ном}} = 0,7 \frac{N [\text{л. с.}]}{n} \text{ Мн} \cdot \text{см} = 0,7 \frac{7000}{40} = 122,5 \text{ Мн} \cdot \text{см} \approx \\ \approx 1,23 \text{ Мн} \cdot \text{м (123 Т} \cdot \text{м)}.$$

Максимальный момент:

$$M_{\text{max}} \leq (2,5 \div 3,0) M_{\text{дв}} (2,5 \div 3,0) \cdot 1,23 = (3,1 \div 3,69) \text{ Мн} \cdot \text{м} \\ (310 \div 369 \text{ Т} \cdot \text{м)}.$$

В нашем случае загрузка двигателя:

$$k_1 = \frac{2,1}{3,1} \cdot 100 = 67,7\%;$$

$$k_2 = \frac{2,1}{3,69} \cdot 100 = 56,9\%.$$

Таким образом, имеется возможность производить прокатку с обжатием более 100 мм, если условия захвата и прочность валков будут обеспечивать нормальный процесс прокатки.

Задача № 103 [67]. Определить крутящий момент, необходимый для холодной прокатки жести (тонкой полосы) в третьей клетки пятиклетового стана.

Толщина полосы до и после прокатки соответственно $h_0 = 0,8$ мм, и $h_1 = 0,5$ мм. Ширина полосы $b = 1$ м. Натяжение полосы $\sigma_0 = 150$ Мн/м² (15 кг/мм²) между второй и третьей клетями, и $\sigma_1 = 120$ Мн/м² (12 кг/мм²) — между третьей и четвертой клетями. Диаметр валков $D = 400$ мм.

Полное давление металла на валки $P = 9,6$ Мн (960 Т).

Решение. Задняя (со стороны второй клетки) и передняя (со стороны четвертой клетки) силы натяжения:

$$T_0 = \sigma_0 F_0 = 150 \cdot 0,0008 \cdot 1 = 0,12 \text{ Мн (12 000 кг)};$$

$$T_1 = \sigma_1 F_1 = 120 \cdot 0,0005 \cdot 1 = 0,06 \text{ Мн} \\ (6000 \text{ кг}).$$

Боковое усилие, которое будет стремиться опрокинуть рабочую клеть в сторону заднего натяжения:

$$2X = T_0 - T_1 = 0,12 - 0,06 = 0,06 \text{ Мн (6000 кг)};$$

$$X = 0,03 \text{ Мн (3 Т)},$$

где X — проекция равнодействующей давления валков на металл на ось прокатки.

Принимаем

$$\beta = 0,35\alpha = 0,35 \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} = 0,35 \sqrt{\frac{0,3}{200}} = 0,0136.$$

Ввиду малости угла β проекцию равнодействующей силы на направление, перпендикулярное оси прокатки, принимаем равной самой равнодействующей, т. е. $Y = P$, а $\sin \beta = \beta$ и $\cos \beta = 1$. Тогда уравнение

$$M_{\text{пр}} = (Y \sin \beta + X \cos \beta) R$$

примет вид

$$M_{\text{пр}} = (P\beta + X) R = (9,6 \cdot 0,0136 + 3) \cdot 0,2 = 0,032 \text{ Мн} \cdot \text{м} \\ (3,2 \text{ Т} \cdot \text{м}).$$

Глава V

КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Пластические свойства металла позволяют изготавливать из него изделия с поперечными сечениями различной геометрической формы. Такие изделия называют профилями (рис. 76). Профили изготавливают методами обработки металлов давлением в горячем и холодном состоянии, а именно: прокаткой, ковкой, прессованием, волочением и т. д. Одним из наиболее распространенных методов производства фасонных профилей является прокатка металла на валках.

Проектирование калибровки валков является сложной задачей из-за отсутствия достаточно простых и точных аналитических методов их расчета. Поэтому калибровщикам заводов в отдельных случаях в своих расчетах приходится пользоваться полуэмпирическими и эмпирическими формулами, оправдавшими себя на практике.

Проектирование калибровки валков для прокатки профильных изделий, как правило, начинают с изучения требований, предъявляемых ГОСТом или Техническими условиями к годным изделиям, а также условий прокатки (тип стана, мощность, скорость прокатки), условий нагрева и уборки металла и факторов, определяющих качество профиля (химический состав стали, механические свойства стали или сплава при температурах прокатки).

Затем в целях уменьшения парка валков и времени, необходимого для перевалок, разрабатывают оптимальную схему прокатки с учетом требований, предъявляемых к качеству профиля и производительности стана. После этого приступают к определению

оптимальных исходных размеров заготовок или слитка для получения требуемого профиля при заданных условиях работы прокатного стана по методике, изложенной в гл. I. Эта работа требует от калибровщика большого опыта и знаний в области теории обработки металла давлением и калибровки валков.

Последующая работа калибровщика сводится к выбору среднего и общего коэффициентов вытяжки в соответствии с физико-механическими свойствами металла при температурах прокатки и графиком изменения температуры металла по проходам. Затем по общепринятым методам определяют форму и размеры калибров, вычерчивают шаблон для каждого калибра, отыскивают центр тяжести калибров, намечают среднюю линию прокатки и после этого составляют рабочие чертежи валков.

Нарезка ручьев калибров на валках допускается после проверки валков на прочность и двигателя на рабочую нагрузку. В случае выявления недостаточного запаса прочности валков или мощности двигателя калибровщики пересматривают схему прокатки.

Для лучшего усвоения методики расчета калибровки валков, ниже приведены решения типовых задач.

2. НАХОЖДЕНИЕ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ КАЛИБРА

Координаты центра тяжести простых элементов сложного профиля (полукруг, трапеция, круговой сектор, треугольник) рассчитывают по формулам, приведенным в подписи к рис. 77 [7, 59, 73, 75]. Методы определения центров тяжести фигур, показанных на рис. 78, описаны ниже.

Задача № 104. Дан промежуточный угловой профиль (рис. 78, а). Определить расположение нейтральной линии данного профиля.

Решение. Ордината центра тяжести сечения

$$y_c = \frac{F_1 y_1 + F_2 y_2}{F_1 + F_2}. \quad (A)$$

Заданный профиль делим на два элемента: треугольник abc и прямоугольник $mndk$. Из рис. 78 имеем:

$$F_1 = \frac{1}{2} b (H - h); \quad y_1 = \frac{1}{3} (H - h); \quad F_2 = Bh; \quad y_2 = -\frac{1}{2} h. \quad (B)$$

После подстановки значений F_1 , y_1 , F_2 и y_2 из уравнений (Б) в уравнение (А) и некоторых преобразований, получим ординату центра тяжести сечения:

$$y_{c_3} = \frac{\frac{1}{6} b (H - h)^3 - \frac{1}{2} Bh^3}{\frac{1}{2} b (H - h) + Bh} = \frac{\frac{1}{6} \cdot 40 (55 - 25)^3 - \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 25^3}{\frac{1}{2} \cdot 40 (55 - 25) + 100 \cdot 25} = -8,15 \text{ м.м.}$$

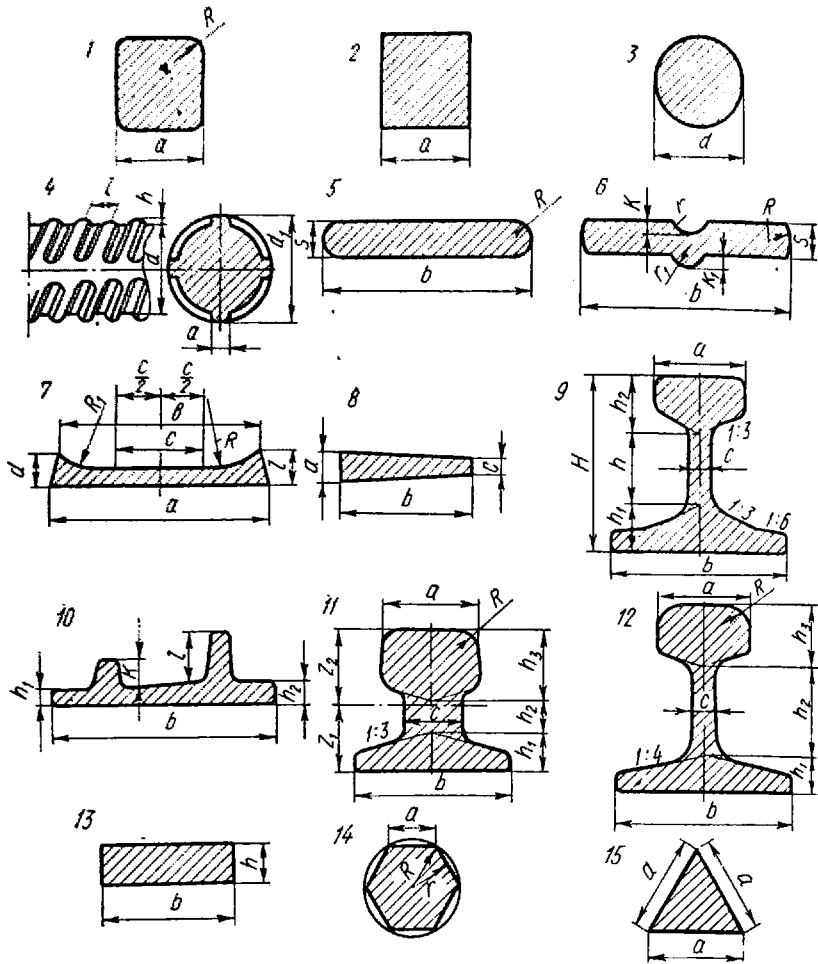
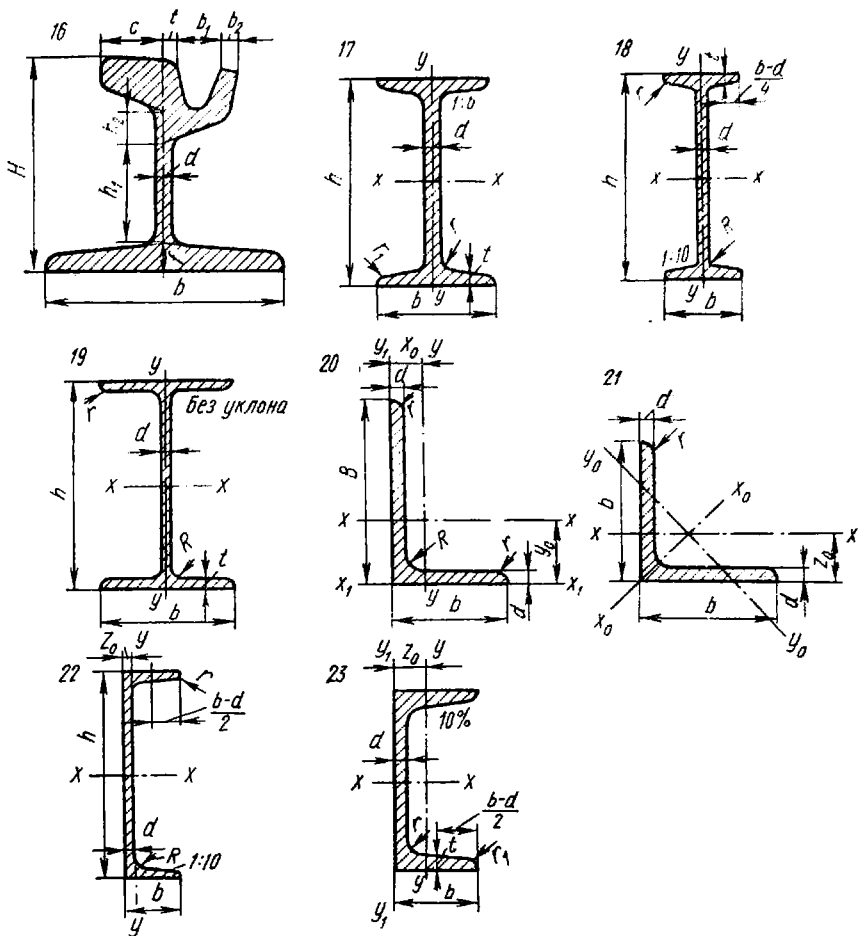


Рис. 76. Примеры

1 — блоки и заготовки; 2 — квадратная сталь (ГОСТ 2591—57); 3 — круглая сталь и 5781—58); 5 — сталь полосовая с закругленными краями (ГОСТ 7119—55); 6 — сталь 66009—57); 8 — трехщелевидная лента (ГОСТ 1540—42); 9 — рельс железнодорожный 11 — рельс для стрелочного остряка (ГОСТ 6421—52); 12 — рельс железнодорожный (ГОСТ 2879—57); 15 — трехгранная сталь; 16 — рельс трамвайный желобчатый (ГОСТ ченная (ГОСТ 6184—52); 19 — балка двутавровая широкополочная (ГОСТ 6183—52); угловая равнобокая (ГОСТ 8509—57); 22 — швеллер облег



прокатных изделий:

катанка (ГОСТ 2590-57); 4 — арматурная сталь — периодический профиль (ГОСТ рессорная желобчатая (ГОСТ 7419-55); 7 — лента стальная горячекатаная (ГОСТ типа Р43 (ГОСТ 7173-54); 10 — подкладка рельсовая раздельного типа (ГОСТ 6473-53); типа Р50 (ГОСТ 7174-54); 13 — полосовая сталь (ГОСТ 103-57); 14 — шестигранная сталь 6544-53); 17 — балка двутавровая (ГОСТ 6239-56); 18 — балка двутавровая облег- 20 — сталь прокатная угловая неравнобокая (ГОСТ 8510-57); 21 — сталь прокатная ченный (ГОСТ 6185-52); 23 — швеллер (ГОСТ 8240-56)

Примечание. При малых радиусах закруглений углов профиля дополнительными площадями в этих местах можно пренебречь.

Задача № 105. На рис. 78, б представлен трапецидальный калибр размерами: $h = 50$ мм; $t = 5$ мм; $B = 25$ мм и $b = 18$ мм.

Определить расположение нейтральной линии и ординату центра тяжести y_C данного калибра.

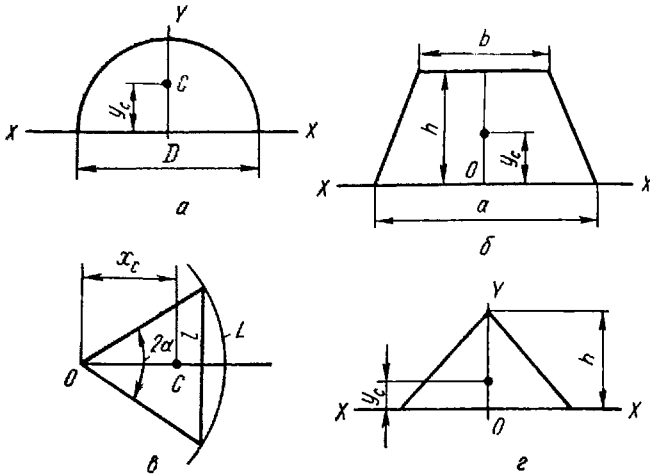


Рис. 77. Координаты центров тяжести некоторых простых геометрических фигур: а — полуокруг ($x_C = 0$; $y_C = \frac{2}{3} \cdot \frac{D}{\pi}$); б — трапеция ($y_C = \frac{h}{3} \cdot \frac{a + 2b}{a + b}$); в — круговой сектор ($x_C = \frac{2}{3} R \frac{\sin \alpha}{\alpha}$); г — треугольник ($x_C = 0$; $y_C = \frac{1}{3} h$)

Решение. Согласно рис. 77, б, центр тяжести трапеции

$$y_C = \frac{h}{3} \cdot \frac{a + 2b}{a + b}.$$

С учетом обозначений, принятых на рис. 78, б:

$$y_C = \frac{h + t}{3} \cdot \frac{B + 2b}{B + b} = \frac{50 + 5}{3} \cdot \frac{25 + 2 \cdot 18}{25 + 18} = 26 \text{ мм.}$$

Задача № 106. Определить ординату центра тяжести таврового калибра (рис. 78, в) при следующих его основных размерах, мм: $R = 50$; $b_1 = 25$; $b_2 = 35$; $H = 100$; $B = 100$; $h_3 = 24$.

Решение. Заданный профиль делят на три простейших элемента: верхний — сегмент, средний — трапецию и нижний — прямоугольную полосу.

Ордината центра тяжести таврового калибра

$$y_C = \frac{M_1 + M_2 + M_3}{F_1 + F_2 + F_3},$$

где M_1 , M_2 и M_3 — статические моменты сегмента, трапеции и прямоугольника;

F_1 , F_2 , F_3 — площади соответствующих элементов.

Задачу решают в следующей последовательности.

1. Статический момент сегмента $M_1 = F_1 y_1$.

Площадь сегмента принимают равной площади полуовала:

$$F_1 = \frac{2}{3} b_1 (2h_1) \cdot \frac{1}{2} = \frac{2}{3} b_1 h_1,$$

где $b_1 = 25$ мм — по условию задачи;

$$h_1 = R - \frac{\sqrt{4R^2 - b_1^2}}{2} = 50 - \frac{\sqrt{4 \cdot 50^2 - 25^2}}{2} = 50 - 48,5 = 1,5 \text{ мм.}$$

Тогда

$$F_1 = \frac{2}{3} \cdot 25 \cdot 1,5 = 25 \text{ мм.}$$

2. Ордината центра тяжести сегмента

$$y_1 = \frac{3}{4} \left\{ \frac{\left[(h_1 + h_2) - R \left(1 - \frac{2}{3} \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right) \right] \left(\frac{1}{3} h_1 + R \right) - \left[h_2 - \frac{1}{3} (R - h_1) \right] (R - h_1)}{h_1} \right\},$$

где $h_2 = H - (h_1 + h_3) = 100 - (24 + 1,5) = 74,5$ мм;

$$\sin \alpha = \frac{b_1}{2R} = \frac{25}{50} = \frac{2}{5} = 0,25, \text{ или } \alpha = 14^\circ 30' (0,253 \text{ рад}),$$

откуда

$$y_1 = \frac{3}{4} \left(\frac{59 \cdot 50,5 - 58,34 \cdot 48,5}{1,5} \right) = 75 \text{ мм.}$$

3. Тогда

$$M_1 = 25 \cdot 75 = 1875 \text{ мм}^3.$$

4. Статический момент трапеции:

$$M_2 = F_2 y_2,$$

где

$$F_2 = \frac{b_1 + b_2}{2} h_2 = \frac{25 + 35}{2} 74,5 = 2235 \text{ мм}^2,$$

$$y_2 = \frac{h_2}{3} \cdot \frac{b_2 + 2b_1}{b_1 + b_2} = \frac{74,5}{3} \cdot \frac{(35 + 2 \cdot 25)}{(25 + 35)} = 35,2 \text{ мм.}$$

5. Тогда

$$M_2 = 2235 \cdot 35,2 = 78\,672 \text{ мм}^3.$$

6. Статический момент прямоугольника:

$$M_s = F_s y_s,$$

где $F_s = Bh_s = 100 \cdot 24 = 2400 \text{ мм}^2$;

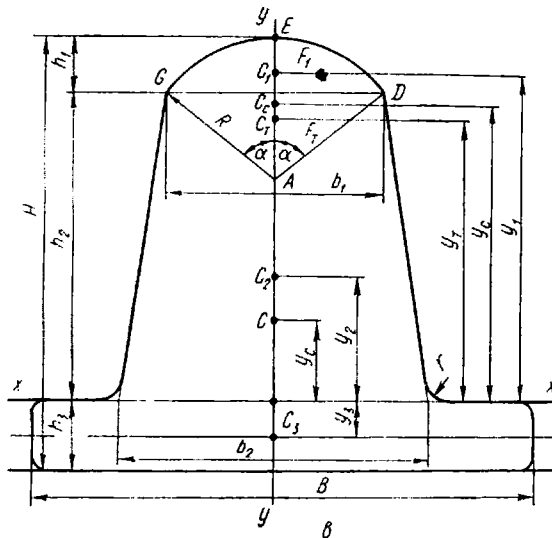
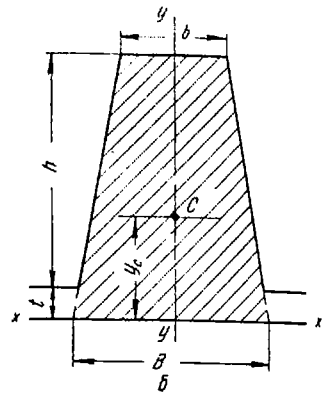
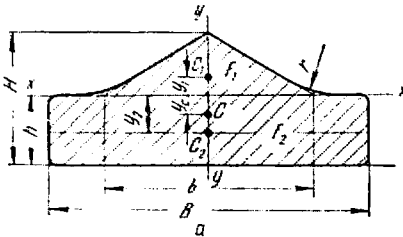
$$y_s = -\frac{1}{2}h = -\frac{1}{2} \cdot 24 = -12 \text{ мм.}$$

7. Тогда

$$M_s = -2400 \cdot 12 = -28\,800 \text{ мм}^3.$$

8. Тогда ордината центра тяжести таврового калибра

$$y_c = \frac{1875 + 78\,672 - 28\,800}{25 + 2235 + 2400} = \frac{51\,747}{4660} = 11,1 \text{ мм.}$$



Задача № 107. Определить положение нейтральной линии балочного калибра (рис. 78, з) по данным размерам, мм:

$$h_1 = 53; b = 110; d = 18; a_2 = 11,4; b_2 = 24; h_2 = 56; \\ a_1 = 10; b_1 = 24,8.$$

Решение. Рассмотрим площадь заданного профиля как сумму площадей трех его элементов: F_1 и F_2 — площади верхних и нижних фланцев и F_3 — площадь стенки калибра.

Из рис. 78, з следует, что:

$$F_1 = \frac{10 + 24,8}{2} \cdot 53 = 922 \text{ мм}^2; \\ y_1 = 18 + \frac{53}{3} \cdot \left(\frac{20 + 24,8}{34,8} \right) = 40,8 \text{ мм};$$

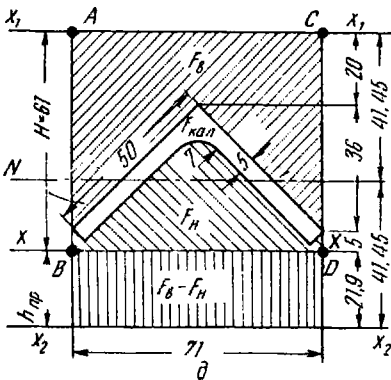
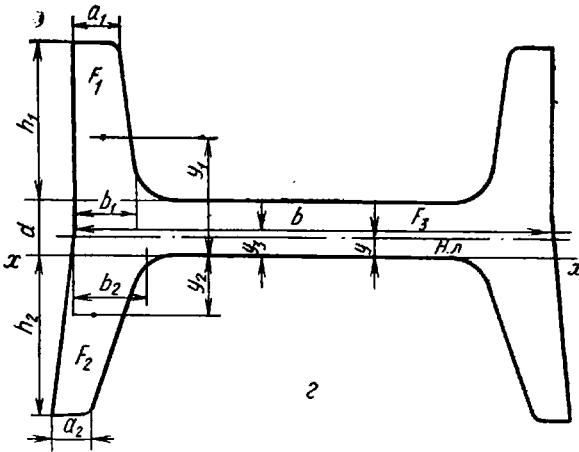


Рис. 78. Методы нахождения центра тяжести (Н. л. — нейтральная линия):
 а — промежуточный угловой профиль;
 б — ребровый калибр трапецидальной формы; в — тавровый калибр; г — калибр балочного типа; д — определение нейтральной линии углового калибра по методу И. И. Кучко [7]

$$F_2 = \frac{11,4 + 24}{2} \cdot 56 = 992 \text{ мм}; \quad y_2 = \frac{53}{2} \cdot \frac{22,8 + 24}{11,4 + 24} = 24,7 \text{ мм};$$

$$F_3 = 18 \cdot 110 = 1980 \text{ мм}; \quad y_3 = 9 \text{ мм};$$

$$y_c = \frac{992 \cdot 40,8 - 992 \cdot 24,7 + 1980 \cdot 9}{922 + 992 + 1980} \approx 8 \text{ мм}.$$

Задача № 108. Определить по методу И. И. Кучко положение нейтральной линии чистового калибра при прокатке углового профиля размерами $50 \times 50 \times 5$ мм (рис. 78, д).

Эта задача предлагается для самостоятельного решения.

При решении руководствоваться работой [7]. *Ответ.* $y_c = 41,4$ мм.

3. КАТАЮЩИЕ (РАБОЧИЕ) ДИАМЕТРЫ ВАЛКОВ

При калибровке валков необходимо знать основные параметры стана и валков, а также правила построения базисных линий рабочего чертежа калибровки. К основным параметрам относятся:

- D_0 — расстояние между осями шестеренных валков;
- D_n — воображаемый диаметр, при котором рабочие валки соприкасались бы без зазора (Δ);
- D_{cp} — расстояние между осями валков в момент прохода полосы через калибр, называемое средним диаметром;
- D_k — катающий диаметр валка, по которому происходит соприкосновение металла с валком;
- D_6 — диаметр валка по бурту.

К базисным линиям рабочего чертежа калибровки валков относятся:

- а) средняя линия — горизонтальная линия, которая делит расстояние между осями валков пополам;
- б) нейтральная линия — линия, проходящая через центр тяжести поперечного сечения прокатываемого профиля;
- в) линия прокатки, на которой располагаются калибры и с которой совмещается нейтральная линия.

Основные элементы калибровки валков приведены на рабочем чертеже валков (рис. 79).

1. Высота калибра имеет значения: $h_1 = 198$ мм и $h_2 = 188$ мм. Разница размеров $h_1 - h_2 = 198 - 188 = 10$ мм получилась в результате вогнутой формы дна калибра, которую иногда применяют в целях уменьшения уширения металла. В настоящее время дно ящичного калибра делают без вогнутости, так как считают, что вогнутость увеличивает неравномерность деформации металла по высоте, что приводит к ухудшению качества металла, особенно при прокатке малопластичных сплавов. В таких условиях при прокатке малоластичных сплавов на боковых поверхностях профиля могут образовываться рванины, особенно у его вершин, которые быстрее охлаждаются.

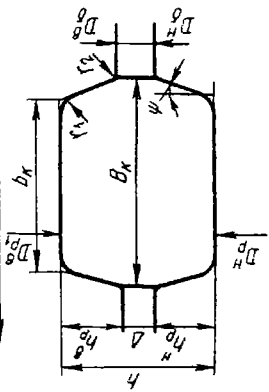
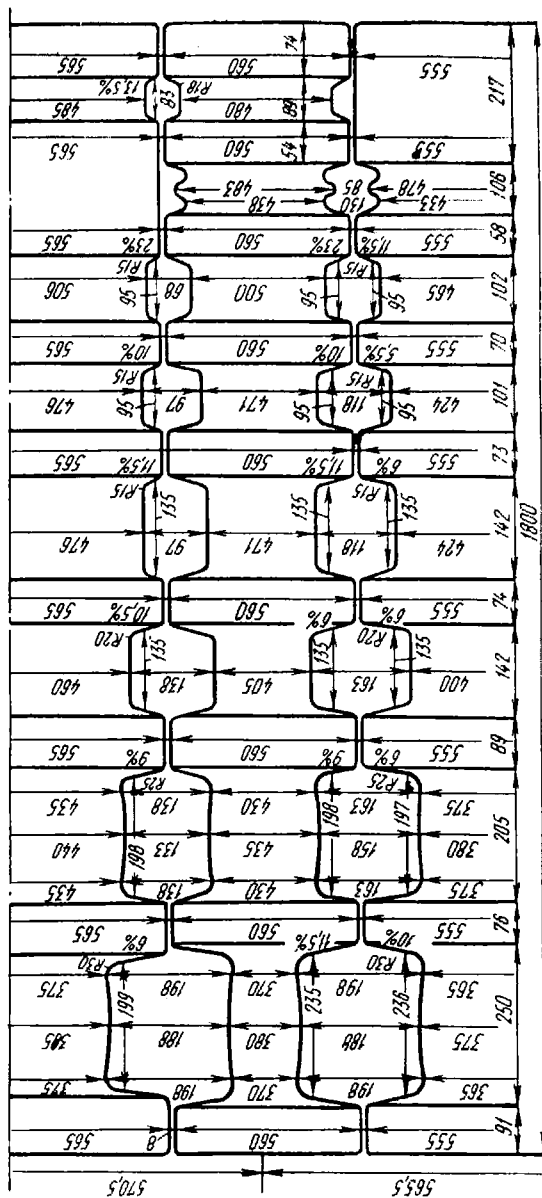


Рис. 79. Калибровка выстрел обжимной клетки 550 Орджоникидзевского завода и обозначение элементов калибра

2. Глубины вреза в первом ящичном калибре $h_p^n = 35$ мм и $h_p^n = 95$ мм.

Глубину вреза можно определить по формулам:

а) $h_p^n = 1/2 (D_6^n - D_p^n)$, если известны диаметры буртов ручья и рабочего калибра;

б) $h_p^n = 1/4 [(2D_{cp} - m) - 2(D_p^n + \Delta)]$, если известны следующие размеры: D_{cp} — средний диаметр между осями валков, образующих калибр; $m = D_p^n - D_p^n$ — верхнее давление, равное разности рабочих диаметров валков, образующих калибр; Δ — просвет или зазор между буртами.

Если глубины вреза в верхний и нижний валки равны между собой, то $h_p^n = h_p^n$.

Более подробные сведения о глубине вреза в калибр приведены в работах [59, 73].

3. Ширина калибра по разъему валка $B_k = 250$ мм и по дну калибра $b_k = 235$ мм.

Радиусы закруглений в углах калибра обозначают r_1 и r_2 , методы определения которых, а также ширины калибра рассмотрены ниже при решении типовых задач.

4. Угол наклона стенок калибра ψ_1 , называемый выпуском, определяют по формуле:

$$\psi_1 = \arctg \frac{B_k - b_k}{2h_p}, \quad (1-V)$$

$$k = \frac{B_k b_k}{2h_p} \cdot 100\%. \quad (2-V)$$

В первом ящичном калибре $k = 11,5\%$ (см. рис. 79).

При определении катающих (рабочих) диаметров валков приходится решать задачи двух типов, а именно: а) катающие диаметры валков, которые встречаются на сортовых и листовых станах, постоянны по ширине калибра; б) катающие диаметры валков по ширине калибра переменны. Последние часто встречаются на сортовых станах, особенно при прокатке фасонных профилей.

Выбор рабочего диаметра валка является ответственной задачей для калибровщика. В случае выбора диаметра рабочего валка, не отвечающего условиям прочности, неизбежны поломки и связанные с ними значительные потери и большие убытки, слагающиеся из стоимости валка, стоимости ремонта стана, полученного при аварии, брака и простоя стана.

Рабочий диаметр валка D_p определяют по формуле В. Е. Грум-Гржимайло:

$$D_p = \frac{\Delta h_{max}}{1 - \frac{1}{\sqrt{1+f^2}}}, \quad (3-V)$$

где f — коэффициент контактного трения;

Δh_{max} — максимальное линейное обжатие, допустимое из условия захвата (см. табл. 21).

Затем проверяют размеры валка на прочность по методу, приведенному в работах [67, 68, 76].

Необходимо также учитывать, что катающий диаметр валка должен быть в полном соответствии с основными размерами рабочего чертежа калибровки валков, в особенности с диаметрами: средним, номинальным, шейки и бочки валка.

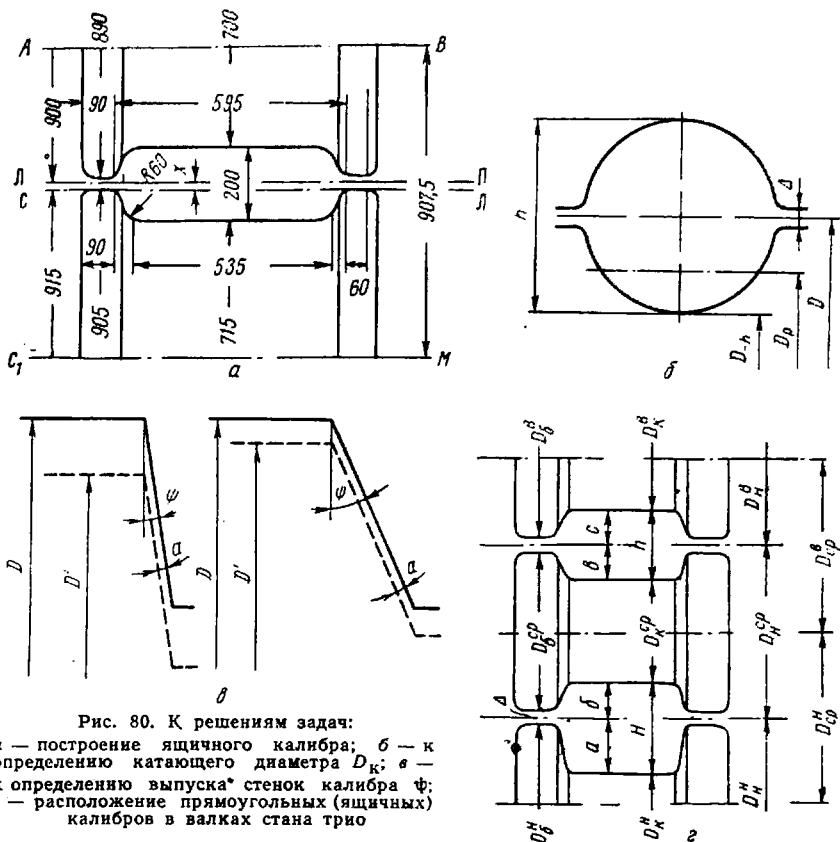


Рис. 80. К решениям задач:

а — построение ящичного калибра; б — к определению катающего диаметра D_k ; в — к определению выпуска* стенок калибра ϕ ; г — расположение прямоугольных (ящичных) калибров в валках стана трио

Ниже приведены решения задач по определению катающего диаметра валка D_k . Схемы к задачам приведены на рис. 80.

Задача № 109 [73]. Определить основные размеры валков D_{cp} , D_k , D_b (рис. 80, а, б), если дано: $D_n^B = 900$ мм и $D_n^H = 915$ мм, высота калибра $h = 200$ мм и нижнее давление $t = -15$ мм. Стан дуо-реверсивный. Составить чертеж ящичного калибра.

Решение. 1. Вначале проводим оси между валками АВ и C_1M на расстоянии, равном среднему начальному диаметру:

$$D_{cp} = \frac{D_n^B + D_n^H}{2} = \frac{900 + 915}{2} = 907,5 \text{ мм,}$$

где $D_n^в$ и $D_n^н$ — начальные диаметры верхнего и нижнего валков.

2. Расстояние между осями, равное $D_{ср} = 907,5$ мм, делим пополам и проводим посередине линию (С. л. — среднюю линию валков), параллельную осям валков.

3. На расстоянии $x = m/4 = 3,75$ мм выше линии С. л. проводим параллельную ей линию Л. п. — линию прокатки, с которой совмещается нейтральная линия, проходящая через центр тяжести калибра.

4. На линии прокатки Л. п. строим ящичный калибр.

5. Так как высота калибра $h = 200$ мм, то по линии, перпендикулярной линии прокатки, проходящей через центр тяжести ящичного калибра, необходимо отложить вверх и вниз по 100 мм.

6. Определяем катающие диаметры валков:

$$D_k^в = D_n^в - 2h_n = 900 - 2 \cdot 100 = 700 \text{ мм};$$

$$D_k^н = D_n^н - 2h_n = 915 - 2 \cdot 100 = 715 \text{ мм}.$$

7. Определяем диаметры буртов:

$$D_б^в = D_k^в + (h - \Delta) = 700 + 200 - 10 = 890 \text{ мм};$$

$$D_б^н = D_k^н + (h - \Delta) = 715 + 200 - 10 = 905 \text{ мм}.$$

8. Проверяем правильность расчетов:

$$\frac{D_k^в}{2} + \frac{D_k^н}{2} + h = D_{ср};$$

$$\frac{700}{2} + \frac{715}{2} + 200 = 907,5 \text{ мм} = D_{ср};$$

$$D_n^в = D_{ср} - 2x = 907,5 - 2 \cdot 3,75 = 900 \text{ мм};$$

$$D_n^н = D_{ср} + 2x = 907,5 + 2 \cdot 3,75 = 915 \text{ мм}.$$

Задача № 110. Определить $D_k^в$ и $D_k^н$, если известны: $D_{ср} = 700$ мм; $h = 120$ мм и верхнее давление $t = +10$ мм. Составить чертеж ящичного калибра. Задачу предлагается решить самостоятельно (решение аналогично решению задачи № 109).

Ответ. $D_k^в = 585$ мм; $D_k^н = 575$ мм.

Задача № 111. Определить катающий диаметр круглого профиля (см. рис. 80, в), если известно: $d = 40$ мм; $D_{ср} = 350$ мм; $\Delta = 5$ мм.

Решение. Размер катающего диаметра определяем с некоторыми погрешностями: влиянием температуры на линейные размеры профиля пренебрегаем, не учитываем радиус дуги сопряжения круга с линией разъема калибра.

Тогда получим

$$D_k = D_{ср} - \frac{F}{b} = 350 - \frac{1256}{40} = 318,6 \text{ мм},$$

где

$$F = \frac{\pi d^2}{4},$$

$b = 40$ мм — ширина калибра.

Задача № 112. Известны размеры ящичного калибра: высота калибра $h = 195$ мм; ширина калибра по разъему валков $B_k = 235$ мм, ширина дна калибра $b_k = 205$ мм. Зазор между буртами $\Delta = 8$ мм. Определить выпуск стенок калибра ψ (рис. 80, в).

Решение. 1. Глубина вреза ручья ящичного калибра в бочку валка

$$h_p = 0,5 (h_k - \Delta) = 0,5 (195 - 8) = 93,5 \text{ мм.}$$

2. Выпуск:

$$\operatorname{tg} \psi_1 = \frac{B_k - b_k}{2h_p} = \frac{235 - 205}{2 \cdot 93,5} = \frac{30}{187} = 0,16,$$

откуда $\psi_1 = 9^\circ$.

При прокатке в ящичных калибрах в отдельных случаях выпуск принимают до 18—22%.

Задача № 113. Дан ящичный калибр. До переточки диаметр валка по бурту $D_6 = 662$ мм. Глубина выработки стенки калибра равна $a = 0,5$ мм; выпуск стенки калибра $\psi_1 = 3^\circ$.

Определить диаметр валка по бурту D'_6 после переточки.

Решение. Известно, что:

$$D_6 - D'_6 = \frac{2a}{\operatorname{tg} \psi_1},$$

или

$$D_6 - D'_6 = \frac{2 \cdot 0,5}{\operatorname{tg} 3^\circ} = \frac{2 \cdot 0,5}{0,0524} = 19,27 \text{ мм.}$$

Тогда:

$$662 - D'_6 = 19,27 \text{ мм}$$

или

$$D'_6 = 662 - 19,27 = 642,73 \text{ мм} \approx 643 \text{ мм.}$$

По данным З. Вусатовского [77] отношение диаметра изношенного валка к диаметру нового $D_{\text{изн}}/D_{\text{нов}}$ у различных прокатных клетей составляет:

Обжимные станы	0,86
Черновые	0,84—0,9
Заготовочные	0,86—0,9
Тонколистовые	0,88—0,9
Толстолистовые реверсивные	0,9—0,91
Станы Лаута:	
с валками из отбеленного чугуна	0,95
с полутвердыми валками	0,90
для прокатки тонких листов	0,95—0,97

Задача № 114. По данным калибровки валков обжимного стана трио $D_{\text{ср}}^{\text{н}} = D_{\text{ср}}^{\text{в}} = 625$ мм. Высота нижнего калибра $H = 207,5$ мм и верхнего $h = 170$ мм. Верхнее давление в обоих сопряженных калибрах равно: $m = 37,5$ мм. Зазор между буртами $\Delta = 15$ мм.

Определить рабочие диаметры $D_{\text{к}}^{\text{н}}$, $D_{\text{к}}^{\text{ср}}$ и $D_{\text{к}}^{\text{в}}$, диаметры буртов $D_{\text{б}}^{\text{н}}$, $D_{\text{б}}^{\text{ср}}$ и $D_{\text{б}}^{\text{в}}$ и глубину вреза в нижний a , средний b и верхний c валки (см. рис. 80, з).

Решение. Катающие диаметры валков определяем по формулам:

$$D_{\text{к}}^{\text{н}} = (D_{\text{ср}} - H) - \frac{H-h}{2} = (625 - 207,5) - \frac{207,5 - 170}{2} = 398,75 \text{ мм};$$

$$D_{\text{н}}^{\text{ср}} = D_{\text{к}}^{\text{н}} + (H - h) = 398,75 + (207,5 - 170) = 436,25 \text{ мм};$$

$$D_{\text{к}}^{\text{в}} = D_{\text{к}}^{\text{ср}} + (H - h) = 436,25 + (207,5 - 170) = 473,75 \text{ мм}.$$

Глубина вреза:
в средний валок

$$b = \frac{1}{4}(H + h) = \frac{1}{4}(207,5 + 170) = 94,375 \text{ мм};$$

в нижний валок

$$a = H - b = 207,5 - 94,375 = 113,125 \text{ мм};$$

в верхний валок

$$c = h - b = 170 - 94,375 = 75,625 \text{ мм}.$$

Проверяем правильность расчета:

$$D_{\text{ср}}^{\text{н}} = \frac{D_{\text{к}}^{\text{н}}}{2} + H + \frac{D_{\text{к}}^{\text{ср}}}{2} = \frac{398,75}{2} + 207,5 + \frac{436,25}{2} = 625 \text{ мм};$$

$$D_{\text{ср}}^{\text{в}} = \frac{D_{\text{к}}^{\text{ср}}}{2} + h + \frac{D_{\text{к}}^{\text{в}}}{2} = \frac{436,25}{2} + 170 + \frac{473,75}{2} = 625 \text{ мм}.$$

Таким образом

$$D_{\text{ср}}^{\text{н}} = D_{\text{ср}}^{\text{в}} = 625 \text{ мм}.$$

Давление в нижнем калибре

$$m_{\text{н}} = D_{\text{к}}^{\text{ср}} - D_{\text{к}}^{\text{н}} = 436,25 - 398,75 = 37,5 \text{ мм}.$$

Верхнее давление в верхнем сопряженном калибре

$$m_{\text{в}} = D_{\text{к}}^{\text{в}} - D_{\text{к}}^{\text{ср}} = 473,75 - 436,25 = 37,5 \text{ мм}.$$

Отсюда

$$m_{\text{н}} = m_{\text{в}}.$$

Результаты проверки соответствуют условиям задачи.

Размеры буртов определяют по формулам:

$$D_6^H = D_K^H + 2a - \Delta = 398,75 + 2 \cdot 113 \cdot 125 - 15 = 610 \text{ мм};$$

$$\begin{aligned} D_6^{CP} &= 2 \left[D_{cp}^H - \left(\Delta + \frac{D_6^H}{2} \right) \right] = \\ &= 2 \left[625 - \left(15 + \frac{610}{2} \right) \right] = 610 \text{ мм}; \end{aligned}$$

$$D_6^B = 2 \left[D_{cp}^B - \left(\Delta + \frac{D_6^{CP}}{2} \right) \right] = 2 \left[625 - \left(15 + \frac{610}{2} \right) \right] = 610 \text{ мм}.$$

Проверка правильности расчета:

$$D_{cp}^H = \frac{D_6^H}{2} + \Delta + \frac{D_6^{CP}}{2} = \frac{610}{2} + 15 + \frac{610}{2} = 625 \text{ мм};$$

$$D_{cp}^B = \frac{D_6^{CP}}{2} + \Delta + \frac{D_6^B}{2} = \frac{610}{2} + 15 + \frac{610}{2} = 625 \text{ мм}.$$

Отсюда $D_{cp}^H = D_{cp}^B$, что соответствует условиям задачи.

4. ЗАДАЧИ ПО КАЛИБРОВКЕ ВАЛКОВ БЛЮМИНГА

Ниже будут разобраны задачи и примеры с применением основных правил и формул проектирования калибровки валков блюминга.

Общее представление о вытяжном ящичном калибре, используемом в калибровках валков блюминга, а также о калибрах других форм такого же назначения, можно получить из рис. 81. Более подробные сведения о системах вытяжных калибров изложены в работах [7, 59, 73, 75].

Примеры решения задач по калибровке валков блюминга

Задача № 115. Определить минимальный катающий диаметр D_K и максимальное допустимое линейное обжатие Δh_{\max} для блюминга 1150 мм, если известно, что на нем катают стальной (0,3% С) слиток сечением 700 × 700 мм массой 7 т со скоростью вращения валков 20 об/мин.

Решение. Для экономии времени на подъем верхнего валка глубину вреза первого калибра принимаем $h_p = 150$ мм. Отношение катающего диаметра после переточки к первоначальному его размеру принимаем равным 0,9. Тогда минимальный катающий диаметр первого калибра

$$D_{K\min} = 0,9D_H - 150 = 0,9 \cdot 1150 - 150 = 885 \text{ мм}.$$

Принимаем $D_K = 900$ мм.

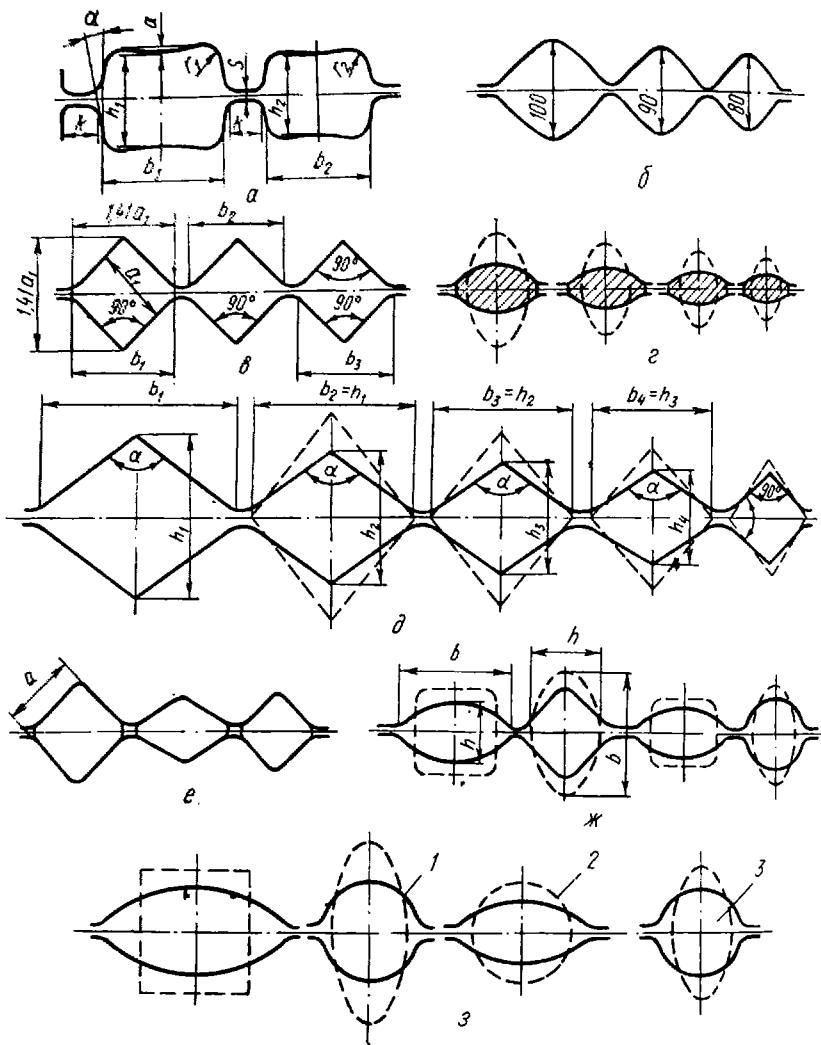


Рис. 81. Системы вытяжных калибров:

а — ящичные; б — стрелчатые; в — квадрат; г — овал—овал; д — ромб—ромб; е — квадрат—ромб; ж — квадрат—овал; з — круг—овал; 1 — предварительный калибр; 2 — предчистовой; 3 — чистовой

Окружная скорость валков

$$v = \frac{\pi D_k n}{60} = \frac{3,14 \cdot 0,9 \cdot 20}{60} = 0,94 \text{ м/сек.}$$

Слиток во втором калибре прокатывают при 1250° С.

Тогда коэффициент контактного трения (см. табл. 23) будет

$$f = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 (1,05 - 0,0005t) = 1 \cdot 1 \cdot 1 (1,05 - 0,0005 \cdot 1250) = 0,44.$$

Допустимое обжатие в условиях захвата из формулы (3-V):

$$\begin{aligned} \Delta h_{\max} &= D_k \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + f^2}} \right) = \\ &= 900 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,44^2}} \right) \approx \\ &\approx 75 \text{ мм,} \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \Delta h_{\max} &= 0,9f^2 R_k = \\ &= 0,9 \cdot 0,44^2 \cdot 450 = 78,6 \text{ мм.} \end{aligned}$$

При окружной скорости валков до 1 м/сек по данным, приведенным в табл. 22, допустима прокатка в калиброванных валках при угле захвата $\alpha = 26^\circ$ (0,454 рад), которому соответствует линейное обжатие

$$\begin{aligned} \Delta h &= D_k (1 - \cos \alpha) = 900 (1 - \cos 26^\circ) = 900 (1 - 0,899) \approx \\ &\approx 90 \text{ мм.} \end{aligned}$$

При $\Delta h_{\max} = 75$ мм угол захвата

$$\alpha = 57,3 \sqrt{\frac{\Delta h}{R_k}} = 57,3 \sqrt{\frac{75}{450}} = 23,6^\circ (0,412 \text{ рад}).$$

Из табл. 22 следует, что, применяя валки с насечкой, обжатие можно увеличить на 20—30%, т. е. до 90—100 мм. Допустимые обжатия Δh_{\max} для последующих расчетов ориентировочно принимают на основании данных действующих калибровок: 75 мм — для первых проходов и 90 мм — для последующих проходов.

Принимаем допустимое максимальное обжатие $\Delta h = 80$ мм.

В отдельных случаях при выборе Δh руководствуются графиком рис. 82.

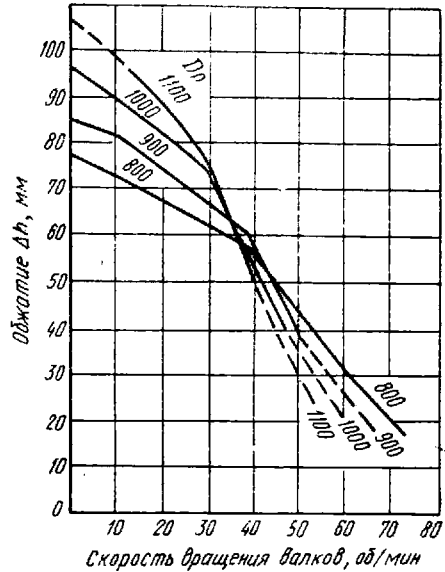


Рис. 82. Зависимость обжатия от скорости вращения валков при захвате и от диаметра валков

Задача № 116. Толщина раската до прохода $H = 355$ мм, катающий диаметр валка $D_k = 935$ мм; толщина раската после прохода $h = 300$ мм. Определить правильность выбранного обжатия за проход с точки зрения проработанности структуры в сечении изделия.

Решение. Обжатие

$$\Delta h = 355 - 300 = 55 \text{ мм.}$$

По формуле (34-1) определим величину Δh , обеспечивающую получение проработанной однородной структуры раската:

$$\Delta h = \frac{H^2}{2D_k} = \frac{(355)^2}{2 \cdot 935} = 94 \text{ мм.}$$

Следовательно, выбранное обжатие $\Delta h = 55$ мм не обеспечивает получение проработанной структуры.

Задача № 117. Определить общее число проходов и кантовок при прокатке слитка из среднеуглеродистой стали сечением 700×700 мм, из которого получается блюм размерами 300×300 мм. Прокатку осуществляют на блюминге 1150. Окружная скорость валков $v = 1$ м/сек, а минимальный катающий диаметр валков $D_k = 900$ мм.

Решение. Из табл. 22 при прокатке на гладкой бочке находим, что $\alpha = 23^\circ 30'$ ($0,410$ рад).

Тогда

$$\Delta h_{\max} = D_k (1 - \cos \alpha) = 900 (1 - \cos 23^\circ 30') = 75 \text{ мм.}$$

Среднее обжатие за проход

$$\Delta h_{\text{ср}} = 0,95 \Delta h_{\max} = 0,95 \cdot 75 = 70 \text{ мм.}$$

Число проходов n , необходимое для прокатки слитка до заданного сечения блюма, должно быть нечетным:

$$n = \frac{1,15 [(B - b) + (H - h)]}{\Delta h_{\text{ср}}} = \frac{1,15 (700 - 300) + (700 - 300)}{70} = 13.$$

Из табл. 35 находим, что по одной стороне слитка число проходов составляет 7, а число кантовок 2, по другой стороне слитка число проходов составляет 6, а число кантовок 2.

Задача № 118. В одном из калибров валков блюминга 1150 за 4 прохода прокатывают раскат сечением 340×564 мм до размера 290×370 мм по схеме обжатий, приведенной в табл. 36.

Определить размеры данного калибра, если известны: $f = 0,44$; $h_k = 220$ мм; $D_k = 920$ мм — высота второго калибра при $\Delta = 15$ мм.

Распределение проходов и кантовок при прокатке
слитка на блюминге [73]

Цикл	n = 13		n = 15			n = 17			n = 19		
	Вариант										
	1	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	2/1	2/—	2/—	2/—	2/—	2/—	2/—	2/—	2/—	2/—	
2	K/4	K/4	K/4	K/2	K/4	K/2	K/2	K/4	K/4	K/2	
3	4/K	4/K	4/K	4/K	4/K	4/K	4/K	4/K	4/K	4/K	
4	K/2	K/4	K/2	K/4	K/4	K/4	K/4	K/4	K/4	K/4	
5	1/K	1/K	2/K	2/K	2/K	4/K	2/K	4/K	2/K	4/K	
6	—	—	K/1	K/1	K/1	K/1	K/2	K/1	K/2	K/2	
7	—	—	—	—	—	—	1/K	—	1/K	1/K	
Число проходов	7/6	7/8	8/7	8/7	8/9	10/7	9/8	10/9	9/10	11/8	
Число кантовок	4	4	5	5	5	5	6	5	6	6	

Примечания: 1. Цифры в колонках обозначают число проходов за каждый цикл, а буква К — кантовку.

2. В числителе первая сторона заготовки, в знаменателе — вторая.

Таблица 36

Режим обжатий во втором калибре при прокатке
на блюминге 1150 с кантовкой

Номер прохода	Размер сечения, мм	Δh, мм	Номер прохода	Размер сечения, мм	Δh, мм
0	340×565	—	11	350×365	70
9	490×345	75	12	290×370	60
10	420×355	70			

Решение. Уширения полосы по проходам:

$$\Delta b_9 = 1,15 \frac{\Delta h}{2H} \left(\sqrt{R\Delta h} - \frac{\Delta h}{2f} \right) = 1,15 \frac{75}{2 \cdot 565} \times$$

$$\times \left(\sqrt{460 \cdot 75} - \frac{75}{2 \cdot 0,44} \right) = 7,5 \text{ мм};$$

$$\Delta b_{10} = 1,15 \frac{70}{2 \cdot 490} \left(\sqrt{460 \cdot 70} - \frac{70}{2 \cdot 0,44} \right) = 8 \text{ мм};$$

$$\Delta b_{11} = 1,15 \frac{70}{2 \cdot 420} \left(\sqrt{460 \cdot 70} - \frac{70}{2 \cdot 0,44} \right) = 9,5 \text{ мм};$$

$$\Delta b_{12} = 1,15 \frac{60}{2 \cdot 350} \left(\sqrt{460 \cdot 70} - \frac{60}{2 \cdot 0,44} \right) = 10 \text{ мм}.$$

Суммарное уширение полосы во втором ящичном калибре

$$\sum \Delta b = 7,5 + 8 + 9,5 + 10 = 35 \text{ мм.}$$

Ширина по дну второго калибра без учета суммарного уширения

$$b_k = b_{\min} - (0 \div 5) = 340 - 5 = 335 \text{ мм.}$$

Максимальная ширина профиля с учетом суммарного уширения:

$$b_{\max} = b_{\min} + \sum \Delta b = 340 + 35 = 375 \text{ мм.}$$

Ширина калибра у его разъема

$$B_k = b_{\max} + (5 \div 10) = 375 + 5 = 380 \text{ мм.}$$

Уклон боковых стенок, считая зазор $\Delta = 15 \text{ мм}$:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{B_k - b_k}{2h_p} = \frac{380 - 335}{220 - 15} \approx 0,22,$$

или $\psi = 12^\circ 20' (0,215 \text{ рад})$.

Радиус закругления фасок буртов и в глубине вреза калибра

$$r = (0,07 \div 0,01) B_k = (0,07 \div 0,1) \cdot 380 \approx 30 \text{ мм.}$$

Во втором калибре дно делают несколько выпуклым с таким расчетом, чтобы высота в средней части калибра была на 10 мм меньше высоты по краям. Это делают с целью частичной компенсации уширения в последующем калибре.

Ширина буртов

$$b_6 = 0,85h_p = 0,85 \left(\frac{220 - 15}{2} \right) \approx 90 \text{ мм.}$$

По данным З. Вусатовского [77], ширина буртов должна быть не менее половины глубины вреза ручья. Ящичные калибры приведены на рис. 83 [10].

Задача № 119 [73]. Составить схему обжатий для прокатки на блюминге 1150 блюма $300 \times 300 \text{ мм}$ из слитка сечением $760 \times 680 \text{ мм}$ из стали 18ХНВА. Мощность двигателя $N = 5152 \text{ квт}$ (7000 л. с.) при $n = 0,50 \div 120 \text{ об/мин}$. Слиток прокатывают в валках с калибровкой, показанной на рис. 84.

Решение. Данная задача предлагается для самостоятельного решения по следующей методике:

1. Определяют минимальный катающий диаметр при глубине первого калибра $h_k^1 = 150 \text{ мм}$, считая диаметр переточенных валков равным 0,9 от первоначального, пользуясь формулой:

$$D_{\min} = 0,9 (D_n - h_p). \quad (4-V)$$

2. По графику рис. 82, считая при захвате $n = 10 \text{ об/мин}$, определяют обжатие.

3. Определяют номинальный момент двигателя:

$$M_{\text{н}} = 9,75 \cdot 10^{-8} \frac{N [\text{квт}]}{n} \text{ Мн} \cdot \text{м}; \quad M_{\text{н}} = 0,716 \frac{N [\text{л. с.}]}{n} \text{ Т} \cdot \text{м}.$$

4. Находят максимальный момент двигателя:

$$M_{\text{max}} = (2,75 \div 3,0) \text{ Мн} \cdot \text{м}. \quad (5-V)$$

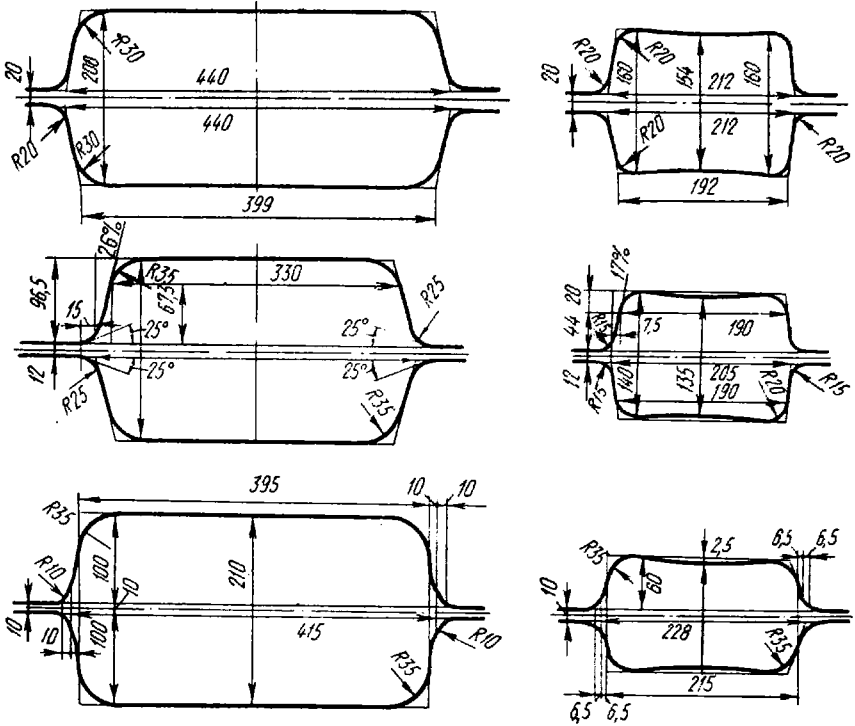


Рис. 83. Построение ящичных калибров

5. С учетом значений M_{max} и pb_c по номограмме рис. 85 определяют среднюю длину очага деформации $l_{\text{ср}}$.

6. По данным $l_{\text{ср}}$ и $\frac{D_{\text{кmin}}}{2}$ из условий захвата рассчитывают допустимое обжатие

$$\Delta h = \frac{2l_{\text{ср}}^2}{D_{\text{кmin}}}. \quad (6-V)$$

Затем находят максимальное допустимое обжатие

$$\Delta' h_{\text{max}} = \Delta D_{\text{кmin}}, \quad (7-V)$$

где значение коэффициента A принимают по данным Н. В. Литовченко в зависимости от температуры металла [9]:

$t, ^\circ\text{C}$	A	$t, ^\circ\text{C}$	A
800	0,162	1050	0,114
850	0,152	1100	0,100
900	0,142	1150	0,098
950	0,130	1200	0,090
1000	0,123	1250	0,080

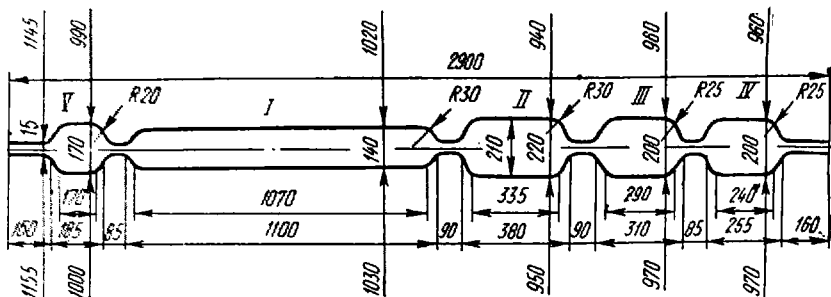


Рис. 84. Схема калибровки валков блюминга 1150

После этого задаются допустимым обжатием $\Delta''h_{\max}$ из условий пластичности стали 18ХНВА, которое, по данным Ю. М. Чижикова [61], для данной стали можно принять равным: $\Delta''h_{\max} = 100 \text{ мм}$.

7. Находят среднее обжатие по проходам:

$$\Delta h_{\text{cp}} = 0,8 \frac{\Delta h'_{\max} + \Delta''h_{\max}}{2} \quad (8-V)$$

8. По данным Δh_{cp} и R_k определяют угол захвата (см. табл. 20)

$$\alpha = 57,3 \sqrt{\frac{\Delta h_{\text{cp}}}{R_k}}$$

9. По полученному углу захвата устанавливают по табл. 22 скоростной режим валков при захвате слитка валками.

10. Определяют число проходов по приведенной формуле в задаче 117, а по табл. 35 устанавливают число кантовок и проходов для каждого цикла прокатки слитка.

11. Остальные расчетные данные калибровки валков блюминга приведены в табл. 37, которые рекомендуем определить самостоя-

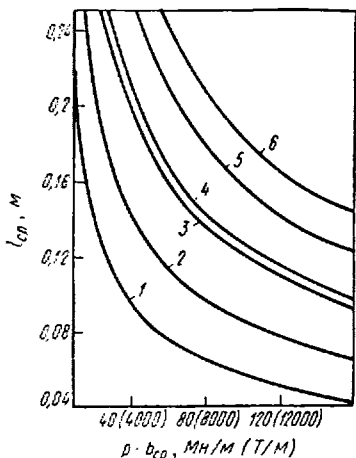


Рис. 85. Номограмма для определения средней длины очага деформации $l_{\text{cp}} = \Psi(\mu_{\text{пр}}; v_{\text{cp}} \cdot r_{\text{cp}})$ при различных моментах прокатки, $\text{Мн} \cdot \text{м}$ ($\text{T} \cdot \text{м}$):
 1 — 0,5 (50); 2 — 1,0 (100); 3 — 1,9 (190);
 4 — 2 (200); 5 — 3 (300); 6 — 4 (400)

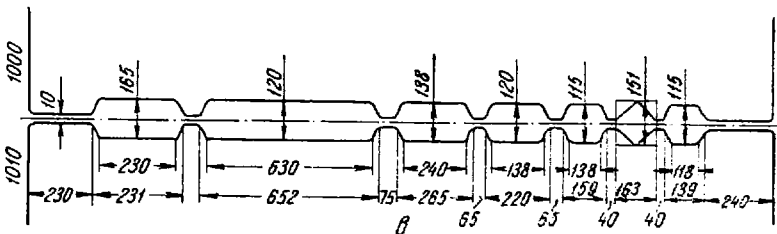
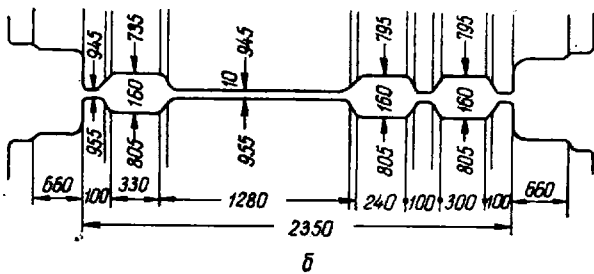
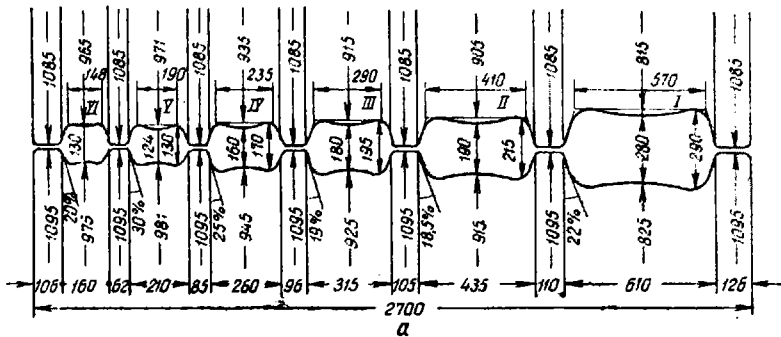


Рис. 86. Основные типы калибровок валков блюминга:
 а и б — старая калибровка валков блюминга; в — калибровка валков блюминга
 для прокатки высоколегированных сталей

Таблица 37

Результаты расчета параметров прокатки (см. рис. 84, а) [73]

Номер калибра	Номер прохода	$D_k, \text{мм}$	$\Delta h, \text{мм}$	μ	$\alpha, \text{град.}$	$t, ^\circ\text{C}$	$l_d, \text{мм}$	$\rho_{\text{ср}}$		P		M	
								Мн/мм^2	кг/мм^2	M_n	T	$M_{н\cdot\text{ж}}$	$T_{\cdot\text{ж}}$
I	1	1025	65	1,08	20,4	1140	182	80	8,0	9,9	990	1,87	187
	2	1025	65	1,1	20,4	1135	182	82	8,2	10,15	1015	1,93	193
	3	1025	70	1,105	21,2	1130	189	84	8,4	10,0	1000	1,96	196
	4	1025	70	1,11	21,2	1125	189	86	8,6	10,04	1004	1,97	197
	5	1025	80	1,11	22,6	1110	202	90	9,0	9,89	989	2,08	208
	6	1025	80	1,16	22,6	1105	202	92	9,2	9,89	989	2,08	208
	7	1025	70	1,16	21,2	1100	189	94	9,4	9,70	970	1,78	178
	8	1025	70	1,17	21,2	1095	189	96	9,6	10,16	1016	1,87	187
	9	945	75	1,15	22,8	1078	196	103	10,3	6,86	686	1,34	134
II	10	945	70	1,18	22,0	1070	181	106	10,6	6,70	670	1,25	125
	11	945	70	1,18	22,0	1060	181	110	11,0	7,20	720	1,34	134
	12	945	60	1,18	20,4	1050	168	113	11,3	6,96	690	1,16	116
III	13	964	70	1,19	21,8	1035	184	118	11,8	6,40	640	1,03	103

тельно с помощью данных работы А. Г. Чертова [44] и табл. 20—28 и 32.

Задача № 120. Составить перечень достоинств и недостатков основных типов калибровок валков блюминга (рис. 86) для прокатки слитков из углеродистой и высокоуглеродистых сталей. Использовать данные работ [73, 10].

5. ЗАДАЧИ ПО КАЛИБРОВКЕ ВАЛКОВ НЕПРЕРЫВНЫХ ЗАГОТОВОЧНЫХ СТАНОВ

Современные заготовочные станы устанавливают непосредственно за блюмингом. На них прокатывают блюмы без промежуточного подогрева металла. Эти станы, как правило, являются непрерывными. Подробно заготовочные станы рассмотрены в работах А. И. Целикова [76], В. С. Смирнова [31] и А. А. Королева [67]. Расчет калибровки валков непрерывных заготовочных станов приведен в работах Н. В. Литовченко [7], Б. П. Бахтинова, М. М. Штернова [59] и З. Вусатовского [77].

Таким образом, рассмотрены только особенности методики расчета калибровки валков непрерывного заготовочного стана и приведен примерный расчет калибровки.

Исходным материалом для прокатки заготовок на современных заготовочных станах служат блюмы сечением 250×250 , 300×300 мм и более.

Методика расчета калибровки валков непрерывного заготовочного стана почти не отличается от методики расчета калибровки валков обычных линейных станов, когда полоса находится только в одной клетки. Однако при этом нужно учитывать следующие четыре особенности:

1. Секундные объемы в каждой клетки одинаковы (см. табл. 27).
2. При расчете калибровки натяжение полосы между клетями определяют по формуле:

$$T_n = \left(\frac{C_n}{C_{n-1}} - 1 \right) 100\%, \quad (9-V)$$

где T_n — натяжение полосы между n -й и $(n - 1)$ -й клетями;

C_n и C_{n-1} — константы калибровки (см. табл. 27).

В производственных условиях натяжение полосы между клетями допускается равным 0,5%.

По данным А. П. Чекмарева, при расчете калибровки для этих станов коэффициент натяжения k принимают в пределах 1,01—1,03.

3. Коэффициент, учитывающий закругления углов калибров $k' = 0,98$.

Коэффициент ограничения уширения во всех клетях, за исключением первой, где $k'' = 1,0$, принимают $k'' = 0,7$.

4. Температуру металла на непрерывно-заготовочном стане считают постоянной. При калибровке валков непрерывно-заготовочных станов необходимо учитывать кинематическую связь валков с двигателем, так как есть станы с жесткой кинематической связью валков отдельных клетей, обслуживаемых одним общим электродвигателем через редуктор, и станы с индивидуальным приводом и регулируемым числом оборотов.

При жесткой кинематической связи в расчетах калибровок необходимо учитывать равенство секундных объемов в каждой клетки. Для прокатки заготовок квадратного сечения на непрерывно-заготовочном стане применяют вытяжные калибры в основном ящичной и прямоугольной формы (см. рис. 81).

В отдельных случаях, как например на стане 450, используют систему калибров овал—квадрат. Переход от прямоугольных калибров к системе калибров ромб—квадрат вызван главным образом необходимостью получать заготовки более точной квадратной формы.

Задача № 121 [61]. Для прокатки заготовки сечением 100×100 мм из блюма сечением 200×200 мм рассчитать калибровку валков непрерывного стана 630, состоящего из шести клетей с индивидуальным приводом при выходной окружной скорости $v_b = 0,72$ м/сек и скорости вращения валков $n = 27$ об/мин.

Решение. На непрерывно-заготовочных станах применяют в первых четырех клетях ящичные калибры, а в пятой и шестой клетях — ромбический и квадратный. Вначале определяют общий и средний коэффициенты вытяжки:

$$\mu_{\text{общ}} = \frac{F_0}{F_n} = \frac{200 \cdot 200}{100 \cdot 100} = 4;$$

$$\mu_{\text{ср}} = \sqrt[6]{4} = 1,26.$$

По рекомендации А. П. Чекмарева, можно принимать по всем клетям вытяжки, равные средней вытяжке $\mu_{\text{ср}}$, или, уменьшив их в первых клетях, увеличить их в последующих, с таким расчетом, чтобы произведение частных вытяжек было равно общей вытяжке.

Для упрощения решения задачи принимаем коэффициенты вытяжки одинаковыми во всех клетях. Абсолютное обжатие в каждом калибре по формуле А. П. Чекмарева равно:

$$h_0 - h_1 = \frac{F_{n-1} - F_n}{b_n(1 - k)}. \quad (10-V)$$

Коэффициент k для толщин 100—200 мм А. П. Чекмарев принимает равным 0,12—0,15.

Для первого ящичного калибра

$$h_0 - h_1 = \frac{F_0 - F_1}{b_0(1 - k)} = \frac{40000 - 31746}{200(1 - 0,12)} = 46 \text{ мм},$$

где

$$F_1 = \frac{F_0}{\mu_{\text{ср}}} = \frac{40000}{1,26} = 31746 \text{ мм}^2;$$

$$\Delta b = 0,12 \cdot 46 = 6 \text{ мм}; \quad b_1 = b_0 + \Delta b = 206 \text{ мм};$$

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 200 - 46 = 154 \text{ мм}.$$

Аналогично рассчитывают размеры всех остальных калибров (табл. 38).

Из четвертой клетки квадрат задают в ромбический калибр пятой клетки. Для расчета принимаем, что диагональ квадрата равна большей диагонали ромба (последняя расположена горизонтально). Большую диагональ ромба определяют по диагонали предыдущего квадрата

$$h_p = \frac{2F_p}{h_k}.$$

Сторону квадрата a и его диагонали $h_k = b_k$ определяют из следующих выражений:

$$a = \sqrt{F_k}; \quad h_k = b_k = 1,41a.$$

Из табл. 38 видно, что четвертый калибр имеет размеры 123 и 128 мм, близкие к размерам квадрата (126 мм). Диагональ квадрата равна:

$$126 \cdot 1,41 = 178 \text{ мм.}$$

Таблица 38

Параметры калибровки валков непрерывно-заготовочного стана 630 (блуж 200×200 мм) [61]

Форма калибра	Номер прохода	h , мм	b , мм	Δh , мм	F , мм ²	$F = F_{n-1} - F_n$	Высота калибра с учетом закругления, мм	D_p	α	n	c , м/сек
Ящичный	1	154	206	46	31 700	8300	—	456	26°	9,6	0,23
	2	117	212	37	25 200	6500	—	493	22°	11,2	0,29
	3	162	123	50	20 000	5200	—	448	27° 30'	14,4	0,36
	4	123	128	39	15 900	4100	—	487	23°	18,0	0,46
Ромб	5	141	178	52	12 600	3300	126	515	26°	21,0	0,57
Квадрат	6	141	141	52	10 000	2600	126	515	26°	27	0,72

Большая диагональ ромба в пятом калибре:

$$h_5 = \frac{2 \cdot 12\,600}{178} = 141 \text{ мм.}$$

Сторона квадрата в шестой клетке стана 630

$$a_6 = \frac{141}{1,41} = 100 \text{ мм,}$$

т. е. то, что и требовалось по условиям задачи.

Катающий диаметр для ящичных калибров

$$D_k = D_{cp} - h,$$

для ромбических и квадратных

$$D_k = D_{cp} - \frac{2}{3} h,$$

где D_{cp} — средний диаметр валков.

Для определения скорости прокатки по всем клетям без учета опережения определяют константу калибровки:

$$C = \frac{F_6 \pi D n}{60} = \frac{10\,000 \cdot 3,14 \cdot 515 \cdot 27}{60} = 72 \cdot 10^6 \text{ мм}^3/\text{сек.}$$

Окружная скорость в предыдущей, пятой клет:

$$v_5 = \frac{F_6 v_6}{F_5} = \frac{C}{F_5} = \frac{v_6}{\mu_6} = \frac{72 \cdot 10^6}{12\,600} = \frac{0,72}{1,26} = 0,57 \text{ м/сек.},$$

где $F = 12\,600 \text{ мм}^2$ — площадь ромбического калибра (см. табл. 38).

Задача № 122 (для самостоятельного решения). Рассчитать калибровку валков первой группы непрерывного стана 640, со-

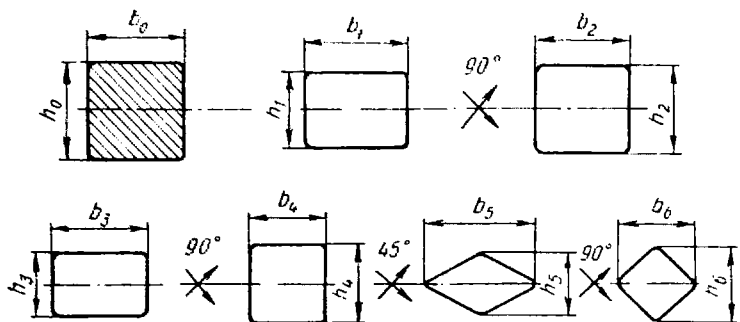


Рис. 87. Схема прокатки квадрата (к задаче 122)

стоящего из шести клеток для прокатки заготовки сечением $120 \times 120 \text{ мм}$ из бляма сечением $240 \times 240 \text{ мм}$ из стали марки Ст. 3. Предусмотреть прокатку заготовки сечением $150 \times 150 \text{ мм}$. Числа оборотов валков по клетям соответственно равны, *об/мин*: $n_1 = 17,4$; $n_2 = 24,0$; $n_3 = 26,2$; $n_4 = 31,6$; $n_5 = 38,4$; $n_6 = 48,0$.

Блямы прокатывают до требуемого сечения заготовки по схеме, приведенной на рис. 87.

Методические указания

1. Расчет производить против хода прокатки по методу А. П. Чекмарева.
2. Константа калибровки для шестой клетки

$$C_6 = k' F_6 D_{к_6} n_6, \quad (11-V)$$

где $k' = 0,98$ — коэффициент, учитывающий закругления углов калибров;

F_6 — площадь поперечного сечения раската, выходящего из шестой клетки;

$D_{к_6}$ — катающий диаметр в шестой клет, равный

$$D_{к_6} = D_H - \frac{h_6}{2}. \quad (12-V)$$

3. Для основных клеток константа калибровки

$$C_{n-1} = \frac{C_n}{k}, \quad (13-V)$$

где $k = 1,015$ — коэффициент натяжения.

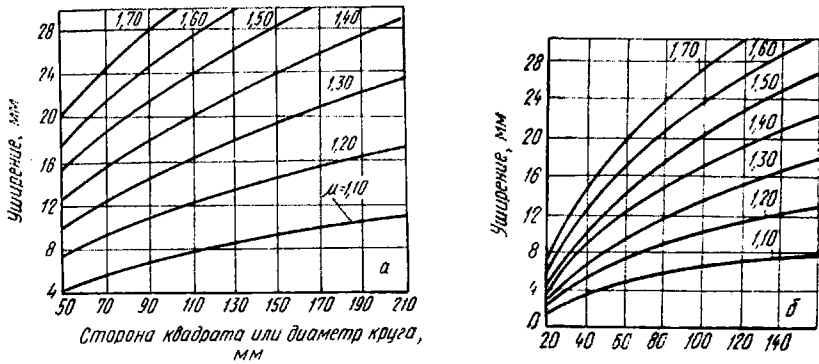


Рис. 88. Зависимость уширения от диаметра валков и стороны квадрата (по данным А. П. Чекмарева):
 а — $D = 800$ мм; б — $D = 500$ мм

Константы калибровки позволяют определить катающие диаметры валков во всех клетях

$$D_k = \frac{C_n}{F_{n/n}} \cdot \quad (14-V)$$

4. Уширение определить по формуле А. П. Чекмарева [37] с использованием номограмм (рис. 88).

5. При расчете калибровки использовать данные табл. 39.

Таблица 39

Параметры калибровки валков непрерывно-заготовочного стана 640 (блюда 240×240 мм)

Калибр	Номер прохода	h мм	b мм	Δh мм	Δb мм	D_k мм	D_H мм	α	μ
Ящичный	1	189	246	51	6	442	631	$27^\circ 48'$	1,24
	2	197	194	49	5	395	592	$28^\circ 48'$	1,22
	3	140	203	57	9	495	635	28°	1,345
	4	150	150	53	10	524	674	26°	1,22
Ромб	5	156	226	56	14	547	625	$28^\circ 08'$	1,25
Квадрат	6	170	170	56	14	555	640	$28^\circ 15'$	1,25

6. При корректировке размеров калибров в первой и второй клетях пользоваться формулами А. П. Чекмарева:

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{b_2 - k_2(b_0 + k_1 h_0 - h_2)}{1 - k_1 k_2}; \\ b_1 &= b_0 + k(h_0 - h_1), \end{aligned} \right\} \quad (15-V)$$

где h_1 — высота раската, выходящего из первой клетки (после корректировки);

b_1 и b_2 — ширина раската, выходящего из первой и второй клеток (после корректировки);

b_0 и h_0 — ширина и высота исходной заготовки;

k_1, k_2 — коэффициенты уширения в первой и второй клетях.

6. КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ ДЛЯ ПРОКАТКИ КВАДРАТНОЙ СТАЛИ

К простейшим профилям относятся профили, оси симметрии которых проходят через центр тяжести: квадрат, круг, полоса и др. По своим размерам простейшие профили можно разделить на следующие группы: 1) крупносортные (при стороне квадрата a или диаметре круга d более 70 мм); 2) среднесортные ($25 < a \leq 70$ мм); 3) мелкосортные ($8 < a \leq 25$ мм); 4) проволочные ($5 \leq a \leq 8$ мм).

Всю полосовую сталь делят на эти же группы, если считать ее размеры по площади равновеликого квадрата.

Все простейшие профили прокатывают в соответствии с требованиями ГОСТ 2591—57; 1133—41; 5650—51 и 4693—57 — для квадрата; ГОСТ 2590—57; 1133—41 и 5650—51 — для круга; ГОСТ 103—57 и 4405—48 — для полосы.

В пределах указанных выше размеров простейшие профили прокатывают на крупносортных, среднесортных, мелкосортных и проволочных станах с линейным или непрерывным расположением рабочих клетей.

Известны пять схем прокатки квадратной стали. Среди них: прямоугольник—квадрат; ромб—квадрат; ромб—ромб; овал—квадрат; шестиугольник—квадрат. Каждая из перечисленных схем прокатки будет использована ниже при решении типовых задач.

Следует отметить, что для прокатки малопластичных сталей и сплавов с узким интервалом пластичности, допускающим небольшие вытяжки при прокатке (по причинам, рассмотренным в гл. III), наиболее рациональной схемой считается система ромб—ромб. Системы ромб—ромб, прямоугольник—квадрат обычно применяют при прокатке заготовки достаточно больших размеров ($a > 70$ мм). Схемы прокатки квадратной стали как промежуточные используют при прокатке других профилей (полосовой стали, круга и др.).

Для большинства профилеразмеров квадратной, круглой и полосоной стали первые четыре-пять калибров (по ходу прокатки) имеют ящичную форму.

Чистовой профиль квадратной стали получают в калибрах системы ромб—квадрат. Эти калибры располагают в последних двух клетях, если сечение может иметь закругленные углы, и в последних четырех клетях, если полоса должна быть с острыми кромками.

Методика определения размеров калибров для каждой схемы прокатки рассмотрена ниже при решении задач [7, 59, 79].

Калибровка по схеме прямоугольник — квадрат (рис. 89, а)

Задача № 123 [59]. Квадрат 125×125 мм прокатывают за четыре прохода из исходной заготовки сечением 170×170 мм на стане 500 прерывного типа. Сталь углеродистая. Температура нагрева $1200\text{—}1260^\circ\text{C}$. Коэффициент контактного трения $f = 0,42$.

Решение. Задачу решаем по методу Б. П. Бахтинова и М. М. Штернова [59].

1. Определяем коэффициент общей вытяжки:

$$\mu_{\text{общ}} = \frac{F_0}{F_4} = \frac{170^2}{125^2} = 1,85.$$

Заданные четыре калибра делим на две пары: полоса — промежуточный квадрат и полоса — чистовой квадрат. Для каждой из них находим общий коэффициент вытяжки: $\mu_{\text{квI}}$ и $\mu_{\text{квII}}$.

Вытяжки в первой и второй парах калибров (от квадрата к квадрату), если позволят условия захвата, в первой клетке можно принять одинаковыми. В этом случае $\mu_{\text{квI}} = 1,36$ и $\mu_{\text{квII}} = 1,36$, что следует из равенства

$$\mu_{\text{кв. ср}} = \mu_{\text{кв I}} \mu_{\text{кв II}} = \sqrt{1,85} = 1,36.$$

Для первой пары калибров коэффициент вытяжки рекомендуется принимать несколько меньшим ранее рассчитанного $\mu_{\text{квI}} = 1,36$. Это делают для обеспечения гарантированного захвата металла валками в прямоугольном калибре первой пары. Принимаем: $\mu_{\text{квI}} = 1,33$.

Тогда, для второй пары калибров $\mu_{\text{квII}} = 1,39$.

Произведение этих вытяжек

$$\mu_{\text{об}} = \mu_{\text{кв I}} \mu_{\text{кв II}} = 1,33 \cdot 1,39 = 1,85.$$

2. Для первой пары калибров справедливы равенства: $\mu_1 = \frac{F_0}{F_1}$; $\mu_2 = \frac{F_1}{F_2}$,

или

$$\mu_1 \mu_2 = \mu_{\text{кв I}} = \frac{F_0}{F_2}.$$

Тогда

$$F_2 = \frac{F_0}{\mu_{KB1}} = \frac{170^2}{1,33} = 21\,700 \text{ мм}^2,$$

откуда

$$a_2 = \sqrt{F_2} = \sqrt{21\,700} = 147 \text{ мм.}$$

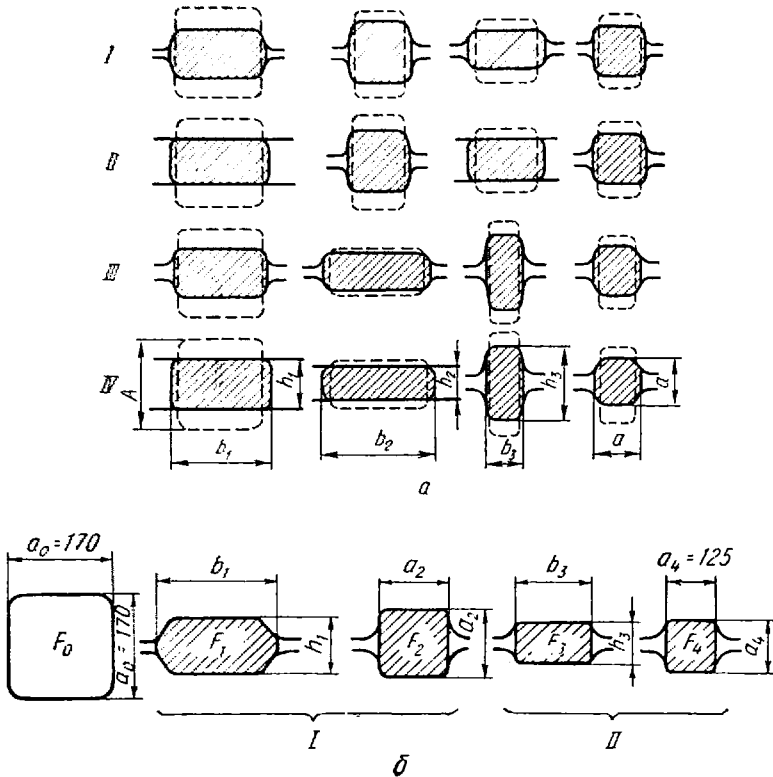


Рис. 89. Схемы способов прокатки квадрата:
 а — различные способы прокатки по системе треугольник—квадрат; б — обозначения размеров ящичных калибров при прокатке по первому и второму способам (к задаче 123)

3. Площади промежуточных прямоугольников определяем из простых соотношений сторон квадратов и вытяжек в прямоугольном и квадратном калибрах. Для первой пары калибров:

$$F_1 = \frac{Aa}{\sqrt{\frac{\mu_1}{\mu_2}}} = \frac{Aa}{\sqrt{k_{\Delta b}}}, \quad (16-V)$$

где $k_{\Delta b} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$.

В этом случае при размерах заготовки $170 \times 170 \text{ мм}$ и $\mu_{cp} < 1,2$, согласно рис. 90, для прямоугольных калибров можно

считать $k_{\Delta b} = 1$. Тогда $\mu_1 = \mu_2$ и $F_1 = Aa = a_0 \cdot a_2 = 170 \times 147 = 25\,000 \text{ мм}^2$.

Промежуточные значения $k_{\Delta b}$ определяем интерполяцией.

4. Определяем размеры калибров.

Задаемся толщиной прямоугольника первой пары калибров $h_1^* = 140 \text{ мм}$, тогда (см. рис. 89, б) $b_1 = \frac{25000}{140} = 178 \text{ мм}$.

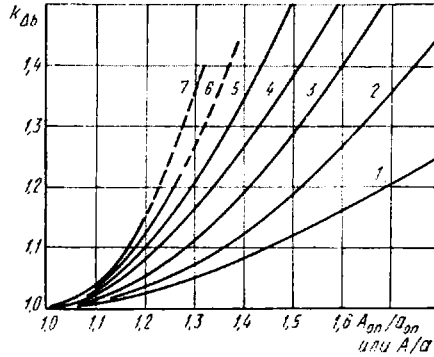


Рис. 90. Зависимость $k_{\Delta b}$ от средней вытяжки A/a в системе прямоугольных калибров при свободном уширении (к задаче 123):

Кривая	Калибр	A	D мм	f	Кривая	Калибр	A	D мм	f
1	I	120	400	0,5	5	V	20	250	0,32
2	II	60	300	0,4	6	VI	15	250	0,3
3	III	80	350	0,5	7	VII	10	250	0,28
4	IV	30	300	0,35					

В этом случае уширение в первом прямоугольнике

$$\Delta b_2 = 178 - 170 = 8 \text{ мм.}$$

Проверяем правильность расчета уширения во втором квадратном калибре по формуле Б. П. Бахтинова:

$$\Delta b_2 = 1,15 \frac{\Delta h_2}{2H} \left(\sqrt{R_k \Delta h_2} - \frac{\Delta h_2}{2f} \right),$$

где $\Delta h_2 = b_1 - a_2 = 178 - 147 = 31 \text{ мм}$;

$$R_k = \frac{D_k}{2} = \frac{D_H - a_2}{2} = \frac{630 - 147}{2} = 242 \text{ мм.}$$

Тогда

$$\Delta b_2 = 1,15 \frac{31}{2 \cdot 178} \left(\sqrt{242 \cdot 31} - \frac{31}{2 \cdot 0,42} \right) = 5 \text{ мм.}$$

Окончательно

$$h_1 = a_2 - \Delta b_2 = 147 - 5 = 142 \text{ мм};$$

$$b_1 = \frac{F_1}{h_1} = \frac{25\,000}{142} = 176 \text{ мм.}$$

Аналогично определяем размеры третьего калибра:

$$F_3 = a_2 \cdot a_4 = 147 \cdot 125 = 18\,375 \text{ мм.}$$

Задается $h_3 = 120 \text{ мм.}$ Тогда

$$b_3 = \frac{F_3}{h_3} = \frac{18\,375}{120} = 153 \text{ мм.}$$

Проверяем уширение в четвертом калибре:

$$\Delta b_4 = 1,15 \frac{28}{2 \cdot 153} \left(\sqrt{\left(\frac{630 - 125}{2} \right)^2} 28 - \frac{28}{2 \cdot 0,42} \right) = 5,3 \text{ мм.}$$

Перерасчет в этом случае можно не делать, поэтому оставляем предварительно принятые размеры h_3 и b_3 .

5. Возможность использования калибров полученных размеров проверяем по максимальному обжатию, определяемому из условий захвата:

$$\Delta h_{\max} = D_k \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+f^2}} \right) = 484 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+0,42^2}} \right) = 38 \text{ мм.}$$

Величина Δh_{\max} превышает обжатия в каждом калибре (табл. 40).

Таблица 40

Параметры калибровки валков, предназначенных для прокатки квадрата $125 \times 125 \text{ мм}$ из заготовки сечением $170 \times 170 \text{ мм}$ по схеме, приведенной на рис. 89, а

Номер прохода	Калибр	h мм	b мм	Δb мм	Δh мм	μ	F , мм ²
1	Прямоугольник	142	176	6,0	28	1,555	25 000
2	Квадрат	147	147	5,0	29	1,155	21 600
3	Прямоугольник	120	153	6,0	27	1,175	18 375
4	Чистовой квадрат	125	125	5,0	28	1,175	15 650

6. По табл. 41 производим расчеты, связанные с построением калибров для каждого из проходов.

Первая клеть

Глубина вреза ручья

$$h_p = (0,2 \div 0,3) h_1 = (0,2 \div 0,3) \cdot 142 = 35 \text{ мм.}$$

При этом зазор между валками

$$\Delta = h - 2h_p = 142 - 2 \cdot 35 = 72 \text{ мм.}$$

Ширина меньшего основания трапеции

$$b_k = (0,98 \div 1,0) a_0 = (0,98 \div 1,0) \cdot 170 = 170 \text{ мм.}$$

Зависимость глубины вреза h_p от условий деформации в калибре и его назначения [59]

Наименование калибра	Глубина вреза
Обжатие различных по толщине полос и заготовок с отношением сторон $h/b < 1,2$	$h_p = 0$ (гладкая бочка)
То же, при необходимости некоторого удержания полосы или сохранения закругления в углах	$h_p = (0,2 \div 0,3) h$
Прокатка полос с отношением $h/b > 1,2$ при необходимости широкой регулировки зазора в связи с изменениями высоты выходящей полосы	$h_p = (0,35 \div 0,45) h_{\min}$, где h_{\min} — минимальная высота полос, выпускаемых из данного калибра
Прокатка полос с отношением $h/b > 2$ без регулировки величины зазора	$h_p = \frac{h - \Delta}{2}$, где $\Delta = (0,02 \div 0,05) D_H$

Ширина калибра в месте разъема валков

$$B_k = b_k + 1,5\Delta b_1 = 170 + 1,5 \cdot 6 = 180 \text{ мм.}$$

Уклон боковых стенок

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{B_k - b_k}{2h_p} = \frac{180 - 170}{2 \cdot 35} = 0,143, \text{ или } 14,3\%.$$

Радиусы закруглений в глубине калибра

$$r_1 = (0,12 \div 0,20) b = 0,15 \cdot 170 \approx 25 \text{ мм.}$$

Радиусы закруглений в месте разъема валков

$$r_2 = (0,08 \div 0,12) b = 0,08 \cdot 170 \approx 15 \text{ мм.}$$

В т о р а я к л е т ь

$$h_p = (0,35 \div 0,45) h_{\min} = (0,35 \div 0,45) \cdot 176 \approx 60 \text{ мм};$$

$$\Delta = h - 2h_p = 147 - 2 \cdot 60 = 27 \text{ мм};$$

$$b_k = (0,95 \div 1,0) b' = (0,95 \div 1,0) \cdot 142 = 136 \text{ мм};$$

$$B_k = b' + 1,5\Delta b = 142 + 1,5 \cdot 5 = 150 \text{ мм и т. д.}$$

Окончательные результаты расчета по четырем клетям приведены в табл. 42.

Результаты расчета калибровки для прокатки квадрата по схеме прямоугольник — квадрат

Номер клетки	h_p , мм	b_k , мм	B_k , мм	$\text{tg } \psi$	r_1 , мм	r_2 , мм	Номер клетки	h_p , мм	b_k , мм	B_k , мм	$\text{tg } \psi$	r_1 , мм	r_2 , мм
1	35	170	180	0,14	25	15	3	25	145	155	0,18	25	15
2	60	136	150	0,12	20	15	4	50	116	130	0,14	20	12

Методика расчета калибровки валков по системе прямоугольник—квадрат

На основании приведенного примера расчета калибровки валков для прокатки квадрата по схеме прямоугольник—квадрат (см. рис. 89, а) ниже предложена следующая методика расчета:

1. По данным площадям исходного и конечного квадратов определяем общий коэффициент вытяжки.

2. Общий коэффициент вытяжки распределяем между парами калибров (прямоугольник — квадрат) $\mu_{\text{общ}} = \mu_{\text{кв1}} \cdot \mu_{\text{кв11}}$ (см. рис. 89, б).

3. Определяем площадь и сторону первого квадрата (второго калибра по ходу прокатки):

$$F_2 = \frac{F_0}{\mu_{\text{кв1}}}; \quad a_2 = \sqrt{F_2}.$$

4. По номограмме рис. 90 определяем площадь первого прямоугольного калибра: $F_1 = a_0 \cdot a_2$.

5. Задаваясь высотой первого прямоугольника h_1 , определяем его ширину $b_1 = \frac{F_1}{h_1}$.

6. Определяем обжатие в первом квадрате

$$\Delta h_2 = b_1 - a_2,$$

рабочий диаметр второго калибра $D_{k_2} = D_n - a_2$, и коэффициент трения по формуле Экелунда—Бахтинова.

7. Определяем уширение во втором калибре (первом квадрате) по формуле Б. П. Бахтинова.

8. Устанавливаем окончательные размеры первого прямоугольного калибра:

$$h_1 = a_2 - \Delta b_2 \quad \text{и} \quad b_1 = \frac{F_1}{h_1}.$$

Аналогично определяем размеры остальных калибров.

9. По формуле В. Е. Грум-Гржимайло определяем Δh_{max} и сравниваем его с обжатиями в каждом проходе в рассчитываемых

калибрах (Δh). Если $\Delta h > \Delta h_{\max}$, то расчеты по калибровке подлежат корректировке. Н. В. Литовченко [7] предложил упрощенные методы расчета калибров системы прямоугольник—квадрат: а) по предельным обжатиям; б) по средним вытяжкам; в) при равенстве коэффициентов вытяжек в каждом проходе¹.

Калибровка по схеме ромб—квадрат (рис. 91)

Задача № 124. Определить размеры ромбического калибра при прокатке квадрата $a = 120$ мм из квадрата $A = 150$ мм в валах размерами $D_n = 850$ мм при скорости прокатки 3 м/сек и температуре металла 1100°C .

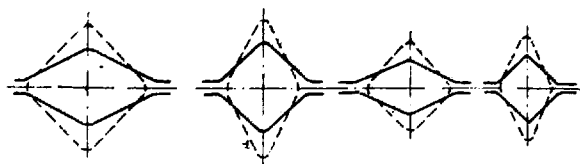


Рис. 91. Система ромб—квадрат (к задаче 124)

Решение. 1. Общий коэффициент вытяжки

$$\mu_{\text{общ}} = \frac{150 \cdot 150}{120 \cdot 120} = 1,56.$$

2. Средний коэффициент вытяжки

$$\mu_{\text{ср}} = \sqrt{1,56} = 1,25,$$

что вполне допустимо для системы ромб—квадрат (рис. 92).

3. Площадь ромбического калибра

$$F_{\text{ромб}} = A \cdot a = 150 \cdot 120 = 18\,000 \text{ мм}^2 *.$$

Ширина ромба должна быть несколько больше диагонали квадрата:

$$b = 150 \cdot 1,41 = 212 \text{ мм}.$$

Принимаем $b = 230$ мм.

4. Катающий радиус

$$R_k = \frac{D_k}{2} = \frac{1}{2} \left(D_n - \frac{F}{b} \right) = \frac{1}{2} \left(850 - \frac{18\,000}{230} \right) = 390 \text{ мм}.$$

¹ По каждому из этих методов в работе [7] приведены расчеты, с которыми полезно ознакомиться начинающим калибровщикам.

* По формуле Б. П. Бахтиянова $F_{\text{ромб}} = \frac{A_{\text{кв}} \cdot a_{\text{кв}}}{\sqrt{\mu_1/\mu_2}}$. Для крупных сечений, прокатываемых по схеме ромб—квадрат, $\mu_1/\mu_2 = K_{\Delta b} \approx 1$ (см. рис. 89).

5. Коэффициент трения для стальных валков при скорости прокатки 3 м/сек и температуре 1100° С (см. табл. 23 и 24 и рис.52)

$$f = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 (1,05 - 0,0005t) = 1,0 \cdot 0,9 \cdot 1,0 (1,05 - 0,0005 \cdot 1100) = 0,45.$$

6. Высота ромба [59]

$$h_{\text{ромб}} = 1,37a - \frac{A-a}{2A} \left(\sqrt{R(A-a)} - \frac{A-a}{2f} \right) =$$

$$= 1,37 \cdot 120 - \frac{150-120}{2 \cdot 150} \times$$

$$\times \left(\sqrt{390(150-120)} - \right.$$

$$\left. - \frac{150-120}{2 \cdot 0,45} \right) = 157 \text{ мм.}$$

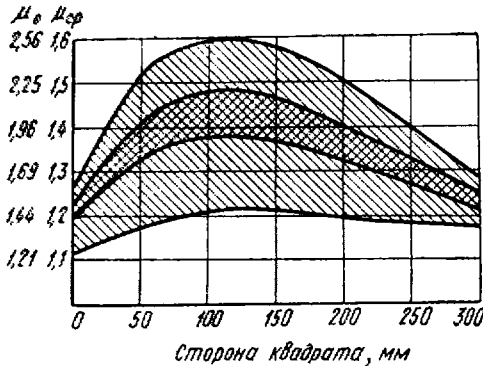


Рис. 92. Зависимость величины средней вытяжки от размеров квадратного профиля (к задаче 124)

Ширина ромбического калибра при известной площади и высоте равна:

$$b = \frac{2F}{h}.$$

Ширину ромба берут больше диагонали поступающего в него квадрата, а его высоту — меньше диагонали последующего квадрата на величину уширения в этих калибрах:

$$b = 1,41A + \Delta b_{\text{ромб}};$$

$$h = 1,41a - \Delta b_{\text{кв.}}$$

Уширение в ромбическом калибре можно определять по формуле Б. П. Бахтинова:

$$\Delta b = 1,15 \frac{\Delta h}{2H} \left(\sqrt{R\Delta h} - \frac{\Delta h}{2f} \right).$$

7. Ширина ромба

$$b_{\text{ромб}} = \frac{2F_{\text{ромб}}}{h} = \frac{2 \cdot 18\,000}{157} \approx 229 \text{ мм.}$$

8. Размеры ромбического калибра

$$\text{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{h}{b} = \frac{157}{229} = 0,686;$$

$$\beta = 68^\circ 54' (1,201 \text{ рад}).$$

Тупой угол ромба

$$\alpha = 180 - \beta = 180 - 68^\circ 54' = 111^\circ 6' (1,939 \text{ рад}).$$

Ширина вреза ромбического калибра в валки

$$b_{\text{ромб. к}} = b_{\text{ромб}} \left(1 - \frac{\Delta}{h}\right) = 229 \left(1 - \frac{10}{157}\right) = 213 \text{ мм.}$$

Зазор между валками для стана трио

$$\Delta = 0,012D_n = 0,012 \cdot 850 = 10 \text{ мм.}$$

В ромбический калибр задают квадрат 150 мм, у которого $r = 20$ мм.

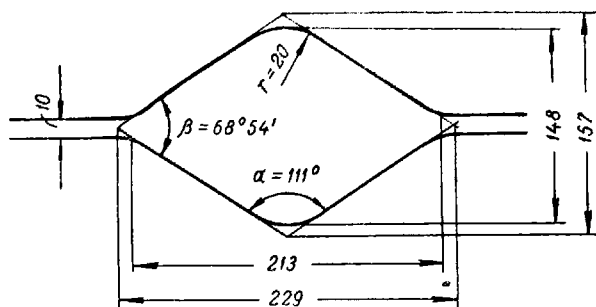


Рис. 93. Ромбический калибр для прокатки квадрата $a = 120$ мм из квадрата $A = 150$ мм (к задаче 124)

Высота ромбического калибра с учетом закруглений

$$\begin{aligned} h_{\text{ромб. к}} &= h - 2r \left(\sqrt{1 + \left(\frac{h}{b}\right)^2} - 1 \right) = \\ &= 157 - 2 \cdot 20 \left(\sqrt{1 + \frac{157^2}{229^2}} - 1 \right) = 148 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Глубина ручья

$$h_p = \frac{h_{\text{ромб. к}} - \Delta}{2} = \frac{148 - 10}{2} = 69 \text{ мм.}$$

Размеры ромбического калибра, полученные расчетным путем, используют при составлении чертежа данного калибра (рис. 93).

Для квадратов размерами от 30×30 до 140×140 мм диагонали ромбических калибров можно определять по эмпирическим формулам:

$$h = 1,8a - 0,39 A; \quad b = 1,95A - 0,54a,$$

где A и a — стороны исходного и конечного квадратов.

Методика расчета размеров калибров по системе ромб—квадрат

- I. Расчет ведут по ходу или против хода прокатки.
- II. Первоначально определяют общую вытяжку.
- III. Задаются средним коэффициентом вытяжки.

IV. Распределяют общую вытяжку по проходам, причем вытяжки в каждой паре калибров от квадрата к квадрату устанавливают на основании графика (см. рис. 92). Вытяжку в ромбических и квадратных калибрах принимают одинаковой.

V. Определяют площади калибров и размеры калибров.

При определении размеров калибров рекомендуется пользоваться следующими эмпирическими формулами:

А. Для случая, когда высота предыдущего калибра равна ширине последующего.

1. Радиус закруглений у вершины ромба принимают равным:

$$r_{\text{ромб}} = (0,20 \div 0,30) a,$$

а радиус закругления у вершины квадрата

$$r_{\text{кв}} = (0,15 \div 0,20) a.$$

2. Высота квадратного калибра с учетом радиуса закругления:

$$h_{\text{кв}} = h - 0,83 r.$$

3. Радиус закругления буртов у разъема калибров

$$R_6 = (0,2 \div 0,5) b,$$

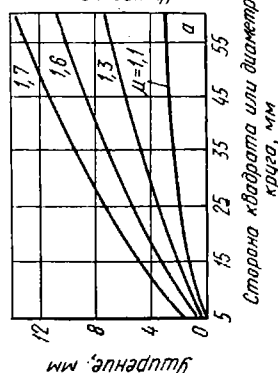
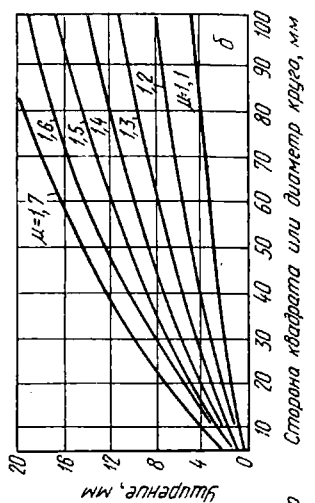
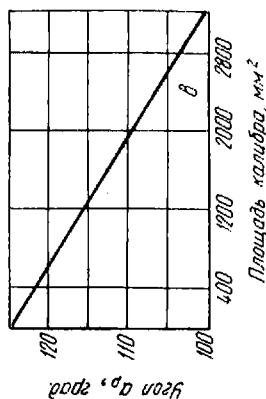
где b — ширина ромба или квадрата.

После построения калибра проверяют простор для уширения по ранее разобранному методу.

Б. Для случая, когда высота предыдущего калибра меньше ширины последующего.

1. Вытяжка и площадь калибра известны. Угол α у вершины ромбического калибра находят по диаграмме рис. 94, в или в зависимости от размера стороны квадратного профиля a :

a , мм	8	9—10	10—14	14—22
α , град.	120	68	116	114
a , мм		22—30	30—50	50—150
α , град.		112	110	110—105



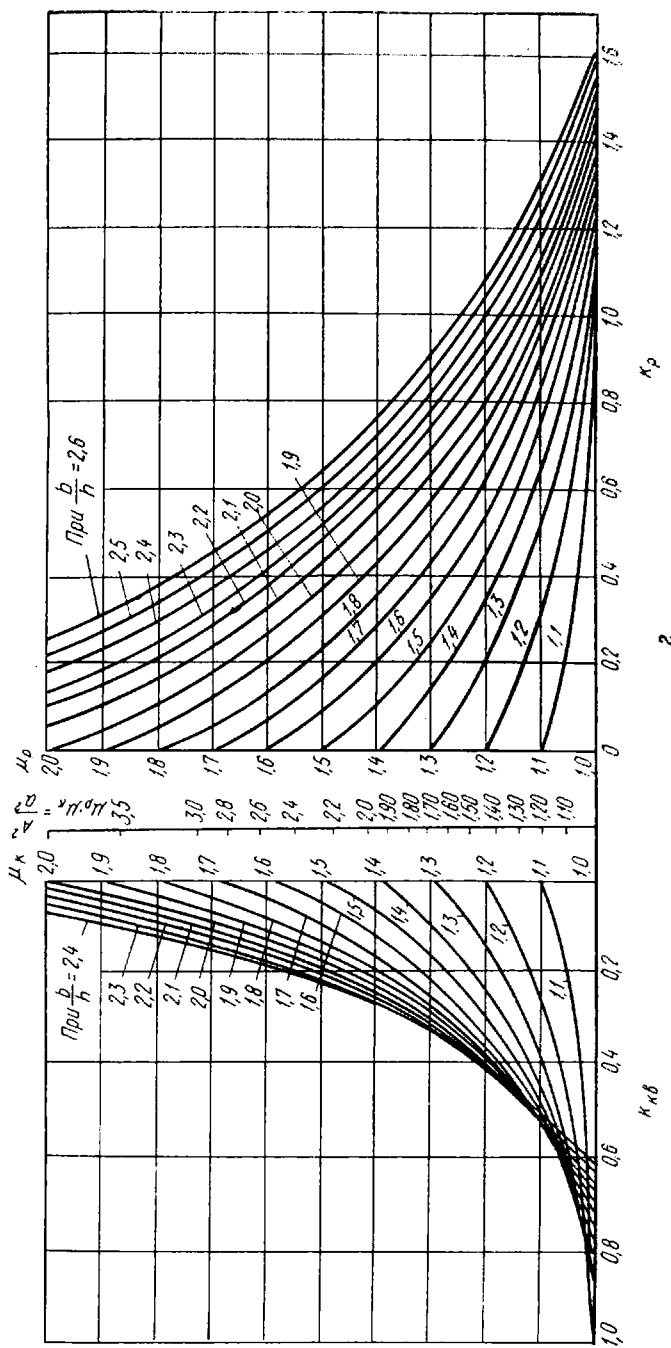


Рис. 94. Номограммы к расчету размеров калибров по системе ромб—квадрат:
 a — $D = 250$ мм; b — $D = 350$ мм; μ — определение тупого угла ромба и зависимость от площади калибра; κ — зависимость показателя
 уширения $\Delta b = \psi \left(\mu, \frac{b}{h} \right)$ в ромбическом (κ_b) и квадратном (κ) калибрах от коэффициента вытяжки и соотношения диагоналей
 ромба b/h

2. Ширина ромба

$$b_{\text{ромб}} = \sqrt{2F \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}.$$

3. Высота ромба

$$h_{\text{ромб}} = \frac{b_{\text{ромб}}}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}},$$

или

$$h_{\text{ромб}} = \frac{2F}{b}.$$

4. Высота квадрата

$$h_{\text{кв}} = 1,41a.$$

В этом случае необходимо соблюдать условие

$$\mu < \operatorname{tg} \frac{\alpha_p}{2}.$$

Угол при вершине принимают $\alpha_p = 100 \div 125^\circ$, а радиус закругления у вершины ромба или квадрата принимают равным:

$$r = (0,1 \div 0,2) a.$$

5. По номограммам А. П. Чекмарева (см. рис. 94) проверяют простор для уширения. Эти номограммы пригодны лишь для станов с известным размером номинальных диаметров валков: $D_n = 250$ и 350 мм. Более универсальным методом расчета уширения металла в ромбических и квадратных профилях является метод Н. В. Литовченко. В этом случае применяют номограммы, которые устанавливают зависимость показателя уширения ($\Delta h / \Delta b$) в ромбическом (k_p) и квадратном ($k_{\text{кв}}$) калибрах от коэффициента вытяжки μ и соотношения диагоналей ромба (b/h) (см. рис. 94, в). При этом пользоваться формулой Б. П. Бахтинова для определения уширения в ромбических и квадратных калибрах не рекомендуется, так как в этих калибрах металл деформируется по ширине полосы неравномерно.

Прокатка квадратной стали с острыми углами

Для получения квадратной стали с острыми углами угол у вершины предчистового ромба делают близким к 90° (рис. 95). Отрезки c , образующие прямой угол у вершины ромба, принимают равными $(0,25 \div 0,35) a$. Отрезки c пересекают стороны ромба на расстоянии $m = 0,7 c$ от вертикальной оси ромба.

Высота предчистового ромба с прямым углом у вершины равна:

$$h = \frac{b}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} + \left(0,7c - \frac{m}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \right). \quad (17-V)$$

Высоту ромба проверяют по уширению в чистовом калибре:

$$h = b - \Delta b,$$

где h — высота предчистового ромба;

b — ширина чистового квадрата;

Δb — уширение в чистовом калибре.

Уширение в чистовом квадрате принимают равным 20—30% от осевого обжатия.

Черновой ромб и черновой квадрат строят таким образом, чтобы высота предыдущего калибра была меньше ширины последующего. Для квадратов, стороны которых больше 30 мм, в качестве предчистовых калибров можно использовать обычные ромбы. Иногда, учитывая неравномерный износ квадратного калибра, угол при вершине принимают равным 91° ($1,588 \text{ рад}$).

В такой конструкции калибра принимают:

$$\left. \begin{aligned} h &= 1,40a; \\ b &= 1,43a. \end{aligned} \right\} \quad (18-V)$$

Калибровка по схеме ромб—ромб (рис. 96).

Порядок расчета калибров по системе ромб—ромб (для случая, когда $h_{n-1} = b_n$)

1. В соответствии с общей вытяжкой и возможным числом калибров определяют частные вытяжки в каждом проходе (рис. 96, з). Обычно все частные вытяжки берут примерно одинаковыми.

2. При расчете калибровки по этой системе ромбы принимают с равными углами при вершинах. Из условия подобия смежных ромбов следует:

$$b_1 = b_2 \sqrt{\mu}; \quad h_1 = h_2 \sqrt{\mu}; \quad a_1 = a_2 \sqrt{\mu}. \quad (19-V)$$

3. Определяют площадь каждого калибра:

$$F = 0,5bh.$$

4. В соответствии с выбранным способом построения калибров определяют ширину и высоту каждого калибра:

$$h_{n-1} = b_n; \quad h_{n-1} = \frac{2F}{b_{n-1}}$$

или угол при вершине α

$$h_{n-1} = \frac{b_{n-1}}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}.$$

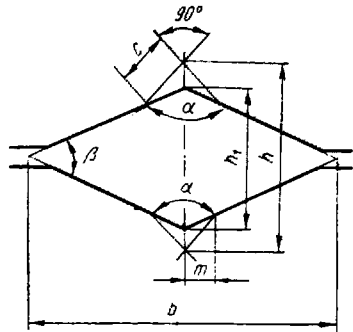


Рис. 95. Предчистовой калибр для прокатки квадратной стали с острыми углами

По найденным размерам строят калибр (рис. 96, в).

Радиус закругления у вершины ромба $r = 0,18 h$. Радиус развала $R = a$ (сторона ромба). Закругление при этом начинается на расстоянии $1/3 a$ от конца горизонтальной диагонали. Ширину

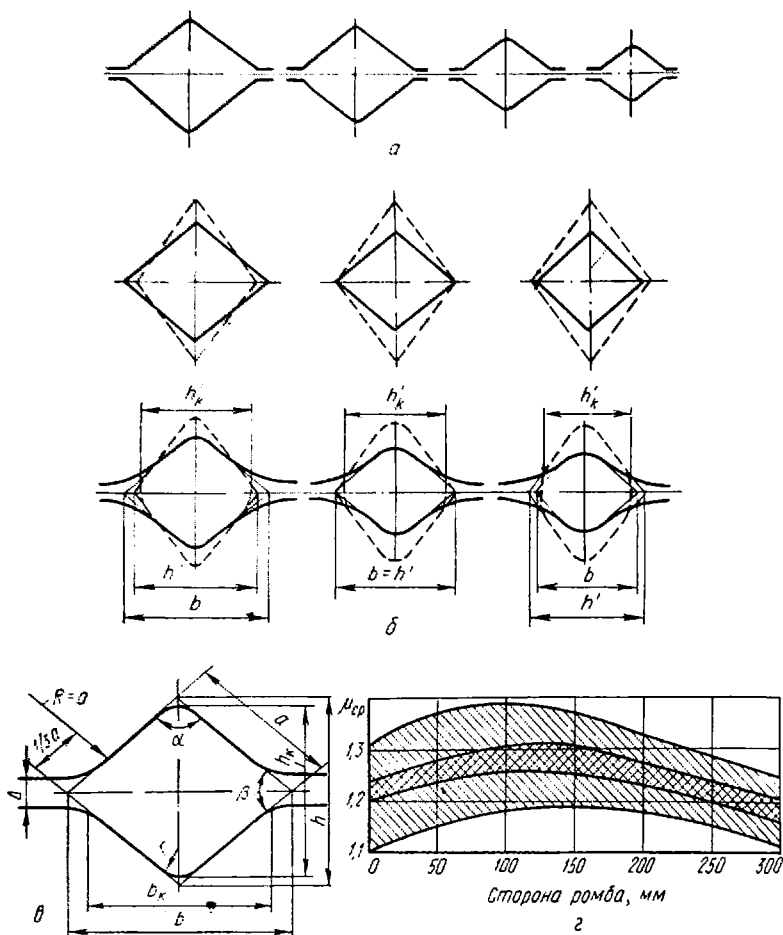


Рис. 96. Схемы к расчету калибровки квадрата:

a — по системе ромб—ромб; *б* — три способа построения ромбических калибров; *в* — построение ромбического калибра; *г* — зависимость величины средней вытяжки от размеров ромба

вреза получают построением или определяют по формуле $b_k = b \left(1 - \frac{\Delta}{h}\right)$. Высота калибра с учетом закруглений

$$h_k = h - 2r \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2} - 1} \right) \quad (20-V)$$

или

$$h_k = h - 2r \left(\sqrt{1 + \left(\frac{h}{b}\right)^2} - 1 \right).$$

Глубина вреза в один валок

$$h_p = \frac{h_k - \Delta}{2}.$$

5. По чертежу проверяют простор для уширения, который должен быть равен или больше уширения $\Delta b = k\Delta h$, где $k = 0,15 \div 0,30$.

Показатель уширения k принимают тем меньше, чем меньше угол α и диаметр валков.

6. Вычисляют зазор между валками:

$$\Delta = (0,01 \div 0,02) D_n,$$

где D_n — номинальный диаметр валков.

Высота предыдущего калибра
меньше ширины последующего
(рис. 96, б), $h_{n-1} < b_n$

Частные вытяжки определяют так же, как это указано для случая, когда $h_{n-1} = b_n$.

По вытяжкам определяют площади калибров:

$$F_2 = \frac{F_1}{\mu}.$$

Задаются углом при вершине или отношением осей ромба и вычисляют все размеры последнего с учетом условия $\mu < \operatorname{tg}^2 \alpha/2$.

Ширину калибра определяют по методу, изложенному для первого случая калибровки, когда $h_{n-1} = b_n$. Радиус закругления у вершины ромба и у разъема $r = R = 0,1a$ (a — сторона ромба). Простор для уширения проверяют так же, как и в предыдущем случае.

Высота предыдущего калибра
больше ширины последующего
 $h_{n-1} > b_n$ (см. рис. 96, б)

Расчет калибров проводится аналогично предыдущему методу. При этом должно соблюдаться следующее условие: $\mu > \operatorname{tg}^2 \alpha/2$. Радиус закругления у вершины $r = R = (0,3 \div 0,4) h$.

Развал строят так же, как и при первом методе построения калибров; проверку простора для уширения производят аналогично.

Задача № 125. Рассчитать калибровку валков для прокатки заготовки сечением 60×60 мм по схеме ромб—ромб из заготовки сечением 120×120 мм. Диаметр валков $D_n = 500$ мм. Расчет произвести против хода прокатки [61].

Решение. 1. Определяем суммарную вытяжку:

$$\mu_{\text{общ}} = \frac{F_0}{F_n} = \frac{120 \cdot 120}{60 \cdot 60} = 4.$$

2. Задаемся средним коэффициентом вытяжки $\mu = 1,26$.

3. Подсчитываем общее число проходов:

$$n = \frac{\lg \mu_{\text{общ}}}{\lg \mu_{\text{ср}}} = \frac{\lg 4}{\lg 1,26} = 6.$$

4. Принимаем (условно), что шестой калибр — квадрат, тогда

$$b_6 = h_6 = 60 \cdot 1,41 = 84,6 \text{ мм}.$$

5. Калибровку строим для случая, когда $h_{n-1} = b_n$.

6. Определяем площадь пятого калибра:

$$F_5 = \mu F_6 = 60 \cdot 60 \cdot 1,26 = 4536 \text{ мм}^2.$$

7. Определяем размеры пятого калибра. Площадь пятого калибра равна:

$$F_{n-1} = \frac{b_{n-1} h_{n-1}}{2}.$$

Ширина пятого калибра связана с коэффициентом вытяжки следующим соотношением:

$$b_{n-1} = b_n \sqrt{\mu}$$

или

$$b_{n-1} = h_{n-1} \sqrt{1,26} = 1,12 h_{n-1}.$$

Тогда

$$F_{n-1} = \frac{1,12 h_{n-1}^2}{2},$$

откуда

$$h_6 = \sqrt{\frac{2F_5}{1,12}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4536}{1,12}} = \sqrt{8100} = 90 \text{ мм}.$$

Ширина калибра

$$b_6 = h_6 \sqrt{\mu} = 90 \sqrt{1,26} = 90 \cdot 1,12 = 100,8 \text{ мм}.$$

8. Угол при вершине пятого ромба

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \sqrt{\mu} = \sqrt{1,26} = 1,12,$$

откуда

$$\alpha = 83^\circ 30' (1,4573 \text{ рад}).$$

9. Построение пятого калибра. Сторона ромба

$$a_5 = \sqrt{\left(\frac{100,8}{2}\right)^2 + \left(\frac{90}{2}\right)^2} \approx 67,6 \text{ мм.}$$

Радиус развала $K = a_5 = 67,6 \text{ мм.}$

Радиус закруглений у вершины ромба

$$\eta = 0,18h_5 = 0,18 \cdot 90 = 16,2 \text{ мм.}$$

Высота ромбического калибра с учетом закруглений

$$h_k = h - 2r \left(\sqrt{1 + \left(\frac{h}{b}\right)^2} - 1 \right) =$$

$$= 90 - 2 \cdot 16,2 \left(\sqrt{1 + 0,892^2} - 1 \right) = 79 \text{ мм.}$$

Зазор между валками $\Delta = 0,015 \cdot 500 = 7,5 \text{ мм.}$

Аналогично можно определить размеры других калибров.

Задача № 126. Рассчитать ряд ромбических калибров для прокатки бруса размером $100 \times 100 \text{ мм}$ на заготовку размерами $50 \times 50 \text{ мм}$. Расчет произвести по методу А. П. и Г. А. Виноградовых [8]. Отношение ширины ромбического калибра к его высоте $b/h = 1,12$. Число проходов 6. Расчет вести против хода прокатки.

Решение. Высота шестого калибра, учитывая, что $F_6 = 2500 \text{ мм}^2$, равна:

$$h_6 = \sqrt{\frac{2F_6}{1,12}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2500}{1,12}} = 67 \text{ мм.}$$

Ширина шестого калибра $b_6 = 67 \cdot 1,12 = 74 \text{ мм.}$

Окончательные результаты расчета приведены в табл. 43.

В шестом калибре (см. табл. 43) высоту 67 мм заменяют высотой 71 мм, так как размеры конечного квадрата $50 \times 50 \text{ мм}$. По-

Таблица 43

Параметры ромбических калибров

Номер калибра	$F, \text{ мм}^2$	$h, \text{ мм}$	$b, \text{ мм}$	$H - h, \text{ мм}$	$\Delta b, \text{ мм}$	Исправленные		α
						$h', \text{ мм}$	$b', \text{ мм}$	
VI	2 500	71	74	14	3	71	74	$16^\circ 30'$
V	3 150	74	85	20	4	71	85	$20^\circ 30'$
IV	3 968	85	94	22	4	81	94	$21^\circ 30'$
III	5 000	94	107	24	5	89	107	$22^\circ 30'$
II	6 299	107	118	28	5	102	118	$25^\circ 30'$
I	7 936	118	135	23	—	113	135	$23^\circ 30'$
—	10 000	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Коэффициент вытяжки принят $\mu = 1,26$ для всех калибров.

этому в этом калибре полосу пропускают два раза с одной кантовкой.

Ромб кантуют после каждого прохода таким образом, чтобы величина b_1 обжималась до величины h_2 . В этом случае обжатие

$$\Delta h = b_1 - h_2 = b_1 \left(1 - \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sqrt{\mu}} \right). \quad (21-V)$$

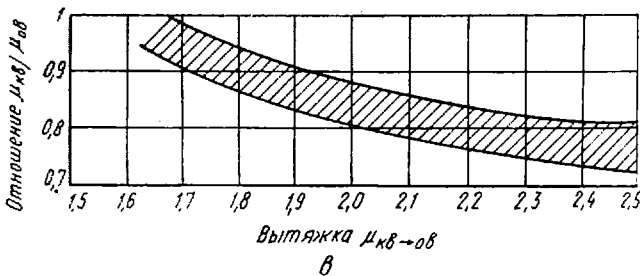
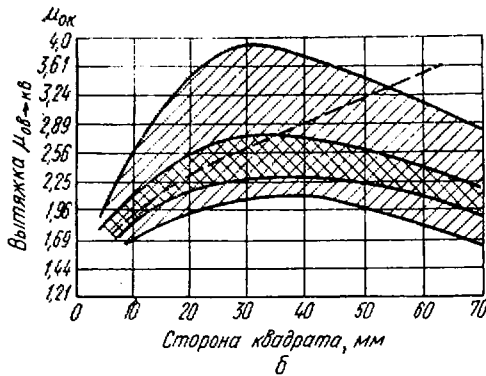
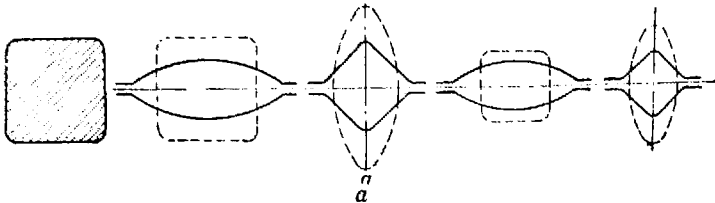


Рис. 97. Схема к расчету калибровки квадрата по системе овал—квадрат: a — система овал—квадрат; b — определение общей вытяжки в квадратном и овальном калибрах (пунктирная кривая — по данным Кирхберга); e — соотношение между коэффициентами вытяжки в квадратном и овальном калибрах (по данным П. И. Полухина)

Калибровка валков по системе овал—квадрат (рис. 97)

Задача № 127. Определить размеры предчистового овала и задаваемого в него квадрата для прокатки квадрата $a = 10$ мм из стали марки Ст.3, если диаметр чугунных валков $D_n = 300$ мм

и скорость прокатки 4,4 м/сек. Температура металла при задаче его в валки 900° С.

Решение. 1. Размеры чистового квадрата в горячем состоянии:

$$a_r = a_x (1 + \alpha t) = 10 \cdot 1,011 = 10,11 \text{ мм},$$

где $\alpha_1 = 12 \cdot 10^{-6}$ — коэффициент линейного расширения.

2. По диаграмме рис. 97, $a-v$ определяем $\mu_{\text{ов}} \cdot \mu_{\text{кв}} = \mu_{\text{ов-кв}} = 2,1$.

3. Из диаграммы на рис. 97, $a-v$ $\frac{\mu_{\text{кв}}}{\mu_{\text{ов}}} = 0,82$.

4. Коэффициент вытяжки в квадратном чистовом калибре

$$\mu_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{\mu_{\text{кв}}}{\mu_{\text{ов}}} \mu_{\text{ов-кв}}} = \sqrt{0,82 \cdot 2,1} = 1,31.$$

5. Площадь чистового квадрата

$$F_{\text{кв}} = (10,11)^2 = 102,2 \text{ мм}^2.$$

Площадь овала

$$F_{\text{ов}} = \mu_{\text{кв}} F_{\text{кв}} = 1,31 \cdot 102,2 = 133,9 \text{ мм}^2.$$

6. Высота овала

$$h_{\text{ов}} = a - 5 (\mu_{\text{кв}} - 1) = 10,11 - 5 (1,31 - 1) = 8,56 \text{ мм} \approx 8,6 \text{ мм}.$$

7. Отношение $\frac{F_{\text{ов}}}{h^2} = \frac{133,9}{8,6^2} = 1,81$.

8. Из табл. 44 по значению отношения $F_{\text{ов}}/h^2$ определяем размеры овала: $\frac{b}{h} = 2,64$; $b = 2,64h = 2,64 \cdot 8,6 = 22,6 \text{ мм}$; $\frac{r}{h} = 1,9924$; $r = 1,9924h = 1,9924 \cdot 8,6 = 17,1 \text{ мм}$.

9. Зная коэффициент вытяжки в овале $\mu_{\text{ов}} = 1,6$ и площадь овала $F_{\text{ов}} = 133,9 \text{ мм}^2$, определяем площадь задаваемого в овал квадрата:

$$F_{\text{кв}} = \mu_{\text{ов}} F_{\text{ов}} = 133,9 \cdot 1,6 = 214,2 \text{ мм}^2.$$

Сторона квадрата

$$a = \sqrt{214,2} = 14,6 \text{ мм}.$$

10. Задавая коэффициент вытяжки $\mu_{\text{ов}}$ по диаграммам рис. 97, b и v , находим размеры овала, следующего за этим квадратом, принимая $a = 15 \text{ мм}$. Калибровку валков для прокатки квадратной стали на непрерывных станах рассчитывают тем же методом, что и для линейных станов, но при этом необходимо учитывать константу калибровки ($C = FD_{\text{кн}}$).

По сравнению с другими системами система овал—квадрат имеет следующие преимущества:

1. Система овал—квадрат позволяет производить прокатку с большими вытяжками (в овале — до 2, а в квадрате — до 1,8).

Данные к вычислению овальных калибров

b/h	F/h^2	r/h	b/h	F/h^2	r/h	b/h	F/h^2	r/h
1,10	0,843	0,5525	1,90	1,334	1,1525	2,70	1,840	2,0725
1,12	0,855	0,5636	1,92	1,347	1,1716	2,72	1,861	2,0996
1,14	0,867	0,5748	1,94	1,360	1,1909	2,74	1,874	2,1269
1,16	0,878	0,5864	1,96	1,372	1,2104	2,76	1,888	2,1544
1,18	0,890	0,5981	1,98	1,385	1,2301	2,78	1,900	2,1821
1,20	0,902	0,6100	2,00	1,398	1,2500	2,80	1,913	2,2100
1,22	0,914	0,6221	2,02	1,411	1,2701	2,82	1,927	2,2381
1,24	0,926	0,6344	2,04	1,423	1,2904	2,84	1,940	2,2664
1,26	0,938	0,6496	2,06	1,436	1,3109	2,86	1,953	2,2949
1,28	0,950	0,6596	2,08	1,449	1,3316	2,88	1,966	2,3236
1,30	0,962	0,6725	2,10	1,462	1,3526	2,90	1,979	2,3525
1,32	0,974	0,6856	2,12	1,474	1,3736	2,92	1,992	2,3816
1,34	0,986	0,6989	2,14	1,487	1,3949	2,94	2,005	2,4109
1,36	0,998	0,7124	2,16	1,500	1,4164	2,96	2,018	2,4404
1,38	0,010	0,7261	2,18	1,513	1,4381	2,98	2,031	2,4701
1,40	1,023	0,7400	2,20	1,526	1,4600	3,00	2,044	2,5000
1,42	1,035	0,7541	2,22	1,538	1,4821	3,02	2,057	2,5301
1,44	1,047	0,7684	2,24	1,551	1,5044	3,04	2,070	2,5604
1,46	1,059	0,7829	2,26	1,564	1,5269	3,06	2,083	2,5909
1,48	1,071	0,7976	2,28	1,577	1,5496	3,08	2,096	2,6216
1,50	1,084	0,8125	2,30	1,590	1,5725	3,10	2,109	2,6525
1,52	1,096	0,8276	2,32	1,602	1,5956	3,12	2,122	2,6836
1,54	1,108	0,8429	2,34	1,615	1,6189	3,14	2,135	2,7149
1,56	1,121	0,8584	2,36	1,628	1,6424	3,16	2,148	2,7464
1,58	1,133	0,8741	2,38	1,641	1,6661	3,18	2,161	2,7781
1,60	1,146	0,8000	2,40	1,654	1,6900	3,20	2,175	2,8100
1,62	1,158	0,9061	2,42	1,667	1,7141	3,22	1,188	2,8421
1,64	1,171	0,9224	2,44	1,680	1,7384	3,24	2,201	2,8744
1,66	1,183	0,9389	2,46	1,693	1,7629	3,26	2,214	2,9069
1,68	1,196	0,9656	2,48	1,700	1,7152	3,28	2,227	2,9396
1,70	1,208	0,9725	2,50	1,719	1,8125	3,30	2,240	2,9725
1,72	1,221	0,9896	2,52	1,732	1,8376	3,32	2,253	3,0056
1,74	1,233	1,0069	2,54	1,745	1,8629	3,34	2,286	3,0389
1,76	1,246	1,0244	2,56	1,758	1,8884	3,38	2,292	3,1061
1,78	1,258	1,0421	2,58	1,770	1,9141	3,40	2,306	3,1400
1,80	1,271	1,0600	2,60	1,784	1,9400	3,42	2,319	3,1741
1,82	1,284	1,0781	2,62	1,797	1,9661	3,44	2,332	3,2084
1,84	1,296	1,0964	2,64	1,809	1,9924	3,46	2,345	3,2426
1,86	1,309	1,1149	2,66	1,822	2,0189	3,48	2,358	3,2776
1,88	1,322	1,1336	2,68	1,835	2,0456	3,50	2,371	3,3125

2. Применение овальных калибров обеспечивает систематическое обновление углов прокатываемой полосы.

3. Эта система оказывает благоприятное действие на структуру прокатываемого металла и повышает его качество, так как полоса обжимается не в двух направлениях, а в четырех.

4. Устойчивое положение овала в квадратном калибре и квадрата в овальном позволяет сравнительно легко и быстро устанавливать проводки.

5. Незначительный врез овальных калибров.

6. Из одного исходного профиля можно получить различные конечные сечения, увеличивая или уменьшая зазор между валками.

Однако система овал—квадрат имеет указанные ниже недостатки.

1. Быстрый износ валков, увеличенный расход энергии на перемещение металла в поперечном направлении и появление внутренних напряжений в металле.

2. Эта система не обеспечивает получения точного квадрата с прямым углом. Для получения квадрата с прямым углом используют смешанную калибровку квадрат—овал—ромб—квадрат. Прокатку стали на валках с калибровкой по системе овал—квадрат на большинстве заводов производят с обжатиями, не превышающими обжатий, указанных в табл. 45.

Таблица 45

Обжатия при калибровке валков по системе овал—квадрат

Сталь	Сторона квадрата мм	Обжатие по площади, %	
		от квадрата к овалу	от овала к квадрату
Среднеуглеродистая	5—50	33—38	До 15
Специальная, средней твердости	5—50	35—44,5	20
Малоуглеродистая	5—80	22—55	15—30

Методика расчета калибровки валков по системе овал—квадрат

1. Калибровку рассчитывают против хода прокатки.
2. Определяют размеры чистового квадрата в горячем состоянии

$$a_r = a_x (1 + \alpha t).$$

3. По диаграмме рис. 97, б определяют общую вытяжку в квадратном и следующим за ним овальном калибрах.

4. Соотношение между вытяжками в овале и квадрате определяют по графику рис. 97, в.

5. Коэффициент вытяжки в овале определяют по формуле

$$\mu_{ов} = \sqrt{\frac{\mu_{ов}}{\mu_{ов-кв}}}$$

или

$$\mu_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{\mu_{\text{кв}}}{\mu_{\text{ов}}} \mu_{\text{ов-кв}}},$$

где $\mu_{\text{ов-кв}} = \mu_{\text{ов}} \cdot \mu_{\text{кв}}$.

6. Если дана общая $\mu_{\text{общ}}$ и средняя $\mu_{\text{ср}}$ вытяжки, определяют число проходов по известному уравнению

$$n = \frac{\lg \mu_{\text{общ}}}{\lg \mu_{\text{ср}}}.$$

7. Вычисляют толщину овала по эмпирической формуле

$$h_{\text{ов}} = a - 5 (\mu_{\text{кв}} - 1), \quad (22-V)$$

где a — сторона ближайшего меньшего квадрата;

$\mu_{\text{кв}}$ — вытяжка в ближайшем меньшем квадрате.

По полуэмпирической формуле Б. П. Бахтинова и М. М. Штернова

$$h_{\text{ов}} = (1,05 \div 1,1) a - \frac{A-a}{2A} \left(\sqrt{R(A-a)} - \frac{A-a}{2f} \right). \quad (23-V)$$

8. По значению отношения $F_{\text{ов}}/h_2$ из табл. 44 находят все остальные размеры овального калибра.

Калибровка по схеме шестиугольник—квадрат (рис. 98)

Метод расчета квадратных калибров в системе шестиугольник—квадрат тот же, что и в системе овал—квадрат. Допустимые вытяжки приведены на рис. 98, б.

Задача № 128. Определить размеры вытяжных калибров для прокатки за четыре прохода по системе шестиугольник—квадрат квадрата 22×22 мм из заготовки сечением 60×60 мм. Диаметр валков 400 мм. Материал валков — чугун. Коэффициент трения $f = 0,4$. Клетки стана не связаны непрерывной прокаткой [59].

Решение. 1. Намечают общую схему прокатки (рис. 98, г).

2. Определяют общую вытяжку в четырех проходах

$$\mu_{\text{общ}} = \frac{F_0}{F_4} = \frac{60^2}{22^2} = 7,45.$$

3. Общую вытяжку разбивают на вытяжки в каждой паре валков. Считая, что $\mu_{\text{кв I}} = \mu_{\text{кв II}}$, получим

$$\mu_{\text{кв I}} = \mu_{\text{кв II}} = \sqrt{\mu_{\text{общ}}} = \sqrt{7,45} = 2,73.$$

Средняя вытяжка в каждой паре калибров

$$\mu'_{\text{ср}} = \sqrt{\mu_{\text{кв I}}} = \sqrt{2,73} = 1,65.$$

Размеры промежуточного квадрата

$$a_2 = \frac{a_0}{\mu_{\text{ср}}} = a_4 \mu'_{\text{ср}} = 22 \cdot 1,65 = 36,3 \text{ мм.}$$

4. Определяют размеры промежуточных шестиугольников в первом и третьем калибрах, для чего проводятся следующие расчеты.

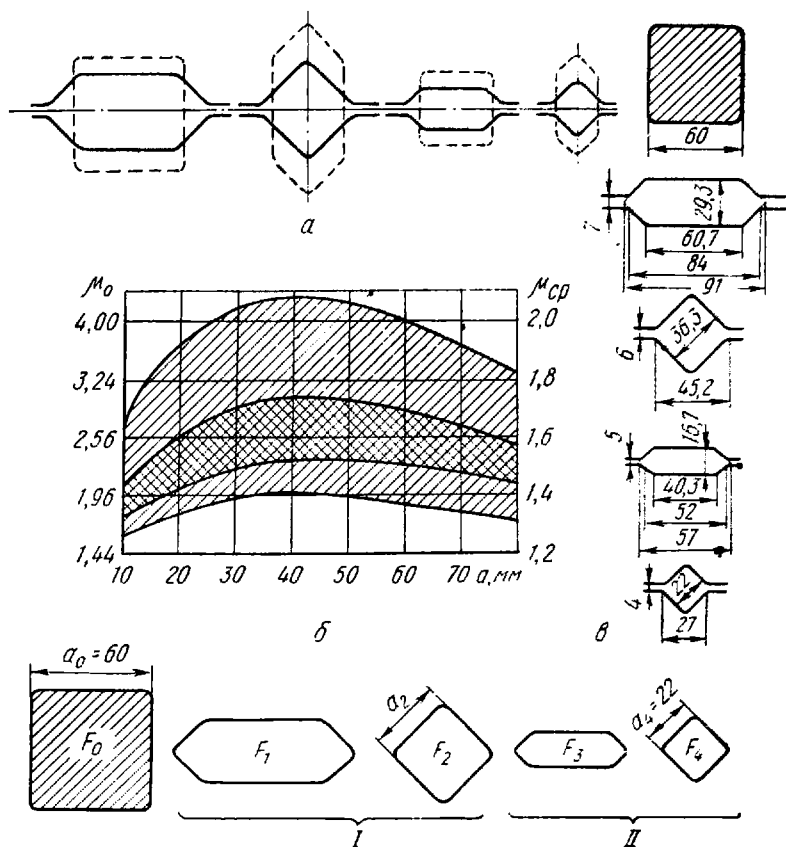


Рис. 98. Схема к расчету калибровки квадрата 22×22 мм по системе шестиугольник—квадрат:

a — система шестиугольник—квадрат; *б* — допустимые вытяжки в системе шестиугольник—квадрат; *в* — конструкция и размеры калибров; *г* — предварительная схема калибровки по системе шестиугольник—квадрат (к задаче 128)

Первый калибр.

Определяют отношение вытяжек между первым и вторым калибрами по формуле Е. П. Бахтинова и М. М. Штернова:

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{0,6k_{\Delta b}}{\left(1 - \frac{h}{2b}\right)^2}. \quad (24-V)$$

Величину $k_{\Delta b}$ находят по графику рис. 90, для чего определяют отношение сторон прямоугольников:

$$\frac{A_{\text{оп}}}{a_{\text{оп}}} = 0,8 \frac{A}{a} = 0,8 \cdot \frac{60}{36,3} = 1,32,$$

$$\frac{A_{\text{оп}}}{a_{\text{оп}}} = 0,8\mu_{\text{ср}} = 0,8 \cdot 1,65 = 1,32.$$

По условию задачи диаметр валков несколько больше принятого при составлении графика (кривая 3), а коэффициент трения меньше, поэтому принимают $k_{\Delta b} \approx 1,12$.

Отношение h/b принимают равным 0,4 (чем больше вытяжка, тем меньше h/b).

Тогда по формуле (24-V)

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = 0,6 \cdot \frac{1,12}{\left(1 - \frac{1}{2} \cdot 0,4\right)^2} = 1,05.$$

Площадь шестиугольника

$$F_1 = \frac{a_0 a_2}{\sqrt{\frac{\mu_1}{\mu_2}}} = \frac{60 \cdot 36,3}{\sqrt{1,05}} = 2130 \text{ мм}^2.$$

Высота шестиугольника

$$h = (1,0 \div 1,05) a - \frac{A-a}{2A} \left(\sqrt{R(A-a)} - \frac{A-a}{2f} \right), \quad (25-V)$$

или

$$h = 1,0 \cdot 36,3 - \frac{60 - 36,3}{2 \cdot 60} \left(\sqrt{180 \cdot 23,7} - \frac{23,7}{2 \cdot 0,4} \right) = 29,3 \text{ мм}.$$

Ширина шестиугольника

$$b = \frac{F}{h} + \frac{1}{2} h = \frac{2130}{29,3} + \frac{1}{2} \cdot 29,3 = 87,3 \text{ мм}.$$

Проверяют предварительно принятое значение отношения h/b :

$$\frac{h}{b} = \frac{29,3}{87,3} = 0,336,$$

что значительно меньше принятого ранее. Поэтому делают перерасчет:

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = 0,6 \cdot \frac{1,12}{\left(1 - \frac{1}{2} \cdot 0,336\right)^2} = 0,94;$$

$$F_1 = \frac{60 \cdot 36,3}{\sqrt{0,94}} = 2240 \text{ мм}^2;$$

$$b = \frac{2240}{29,3} + 0,5 \cdot 29,3 = 91 \text{ мм}.$$

Третий калибр.

Расчеты производят аналогично:

$$\frac{A_{оп}}{a_{оп}} = 0,8, \mu_{ср} = 0,8 \cdot 1,65 = 1,32.$$

По графику рис. 90 (кривая 4) принимают $k_{\Delta b} = 1,2$. Задаются отношением $h/b = 0,25$. Тогда

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = 0,6 \cdot \frac{k_{\Delta b}}{\left(1 - \frac{h}{2b}\right)^2} = 0,6 \cdot \frac{1,2}{\left(1 - \frac{0,25}{2}\right)^2} = 0,94.$$

Площадь шестиугольника

$$F_3 = \frac{A_{оп} a_{оп}}{\sqrt{\mu_1/\mu_2}} = \frac{36,3 \cdot 22,0}{\sqrt{0,94}} = 820 \text{ мм}^2.$$

Высота шестиугольника

$$h = (1,0 \div 1,05) a - \frac{A-a}{2A} \left(\sqrt{R(A-a)^2} - \frac{A-a}{2f} \right) = \\ = 1,05 \cdot 22 - \frac{14,3}{2 \cdot 36,3} \left(\sqrt{185 \cdot 14,3} - \frac{14,3}{2 \cdot 0,4} \right) = 16,7 \text{ мм}.$$

Ширина шестиугольника

$$b = \frac{F}{h} + \frac{1}{2} h = \frac{820}{16,7} + \frac{1}{2} \cdot 16,7 \approx 57 \text{ мм}.$$

Проверка отношения $\frac{h}{b} = \frac{16,7}{57} = 0,29$ показывает, что перерасчета можно не делать.

Общий вид полученной калибровки показан на рис. 98, в.

При прокатке твердых сталей ширину полученных шестиугольников рекомендуется несколько увеличивать по сравнению с ее расчетным значением.

7. КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ ДЛЯ ПРОКАТКИ КРУГЛОЙ И ШЕСТИГРАННОЙ СТАЛИ

На рис. 99 приведены схемы прокатки круглой и шестигранной стали, получившие наибольшее распространение в практике.

По первой схеме рис. 99, а прокатывают круглую сталь диаметром 5—20 мм, по второй — диаметром до 200 мм и по третьей — диаметром >100 мм (на крупносортовых станах).

Допускаемые отклонения от номинальных размеров круглой стали предусмотрены ГОСТ 2590—57, 1133—41, 5650—51, а для шестигранной стали размером 7—80 мм — ГОСТ 2879—57.

Проектирование калибровок валков для прокатки круглой и шестигранной стали имеет свои особенности и трудности. Точных

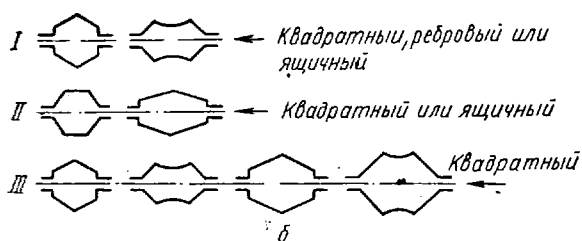
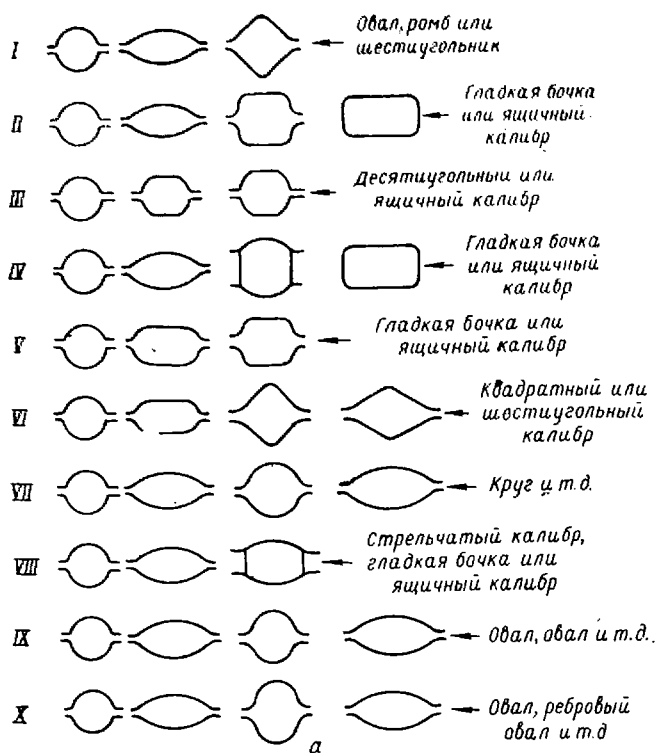


Рис. 99. Схемы прокатки круглой (а) и шестигранной (б) стали

инженерных методов определения размеров калибров не имеется. Поэтому почти во всех методах расчета калибровок используют эмпирические и полуэмпирические формулы для определения размеров и площадей промежуточных калибров.

К ним, например, относятся формулы Х. Хоффа и Т. Даля [79] и формулы А. П. Виноградова (табл. 46) [8].

Для определения площадей овалов разных конструкций рекомендуется пользоваться формулами, перечисленными под рис. 100.

Для лучшего усвоения методов расчета калибровок круглой и шестигранной стали ниже приведены решения нескольких типовых задач.

Задача № 129 [59]. Определить размеры чистового и предчистовых калибров для прокатки круглой стали диаметром 10 мм на полунепрерывном стане 250. Прокатка производится по схеме: квадрат—овал—круг (рис. 99, а).

Расчет производить по нижеприведенной методике.

Первый, чистовой калибр.

1. Диаметр, горячий размер $d_r = 1,013d_x$.

2. Площадь круга $F_r = 0,785d_r^2$.

3. Зазор $\Delta = 0,008D_H$.

Третий, квадратный калибр.

1. По графику рис. 101, а определяют общую вытяжку $\mu_{кв} = 1,36$.

2. Площадь квадрата $F_3 = F_1\mu_{кв}$; сторона квадрата $a_3 = \sqrt{F_3}$, ширина и высота квадрата $b_3 = h_3 = 1,41 a$; радиус закругления в углах квадрата $r_3 = 0,2 a$; высота калибра с учетом закруглений $h_k = h_3 - 0,83r$; ширина вреза калибра при $\Delta = 2$ мм будет $b_k = b_3 - \Delta = b_3 - 2$.

Второй, овальный калибр.

1. Определяют отношение вытяжек $\mu_{ов}/\mu_{кр}$ или

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = 1,27 - 0,64 \frac{m}{h},$$

где $\frac{m}{h} = 0,35$ находят по графику рис. 101, б.

2. Площадь овала

$$F_2 = \frac{0,886Ad_r}{\sqrt{\frac{\mu_1}{\mu_2}}},$$

где A — сторона квадрата.

3. По графику рис. 101, в находят отношение высоты овала к диаметру чистового круга $\frac{h_{ов}}{d} = 0,78$.

4. Высота овала $h_{ов} = 0,78d$; ширина овала $b_2 = \frac{3F_2}{h_{ов}\left(2 + \frac{m}{h}\right)}$.

Размеры предотделочного овала и подготовительного квадрата для прокатки круглого профиля (8)

d_x , мм	Соотношение размеров овала		Сторона квадрата a мм
	h/d_x	b/h	
5—7	0,69—0,78	2,35—2,50	5—7
7—9	0,75—0,85	1,75—2,10	7—9
9—11	0,80—0,85	1,67—1,80	$d + (0,25 \div 0,5)$
12—15	0,80—0,87	1,60—1,70	$d + 1$
16—20	0,87—0,90	1,50—1,6	$d + 2$
21—25	0,90—0,92	1,47—1,50	$d + 3$
26—35	0,90—0,94	1,47—1,50	$d + 3$
36—40	0,90	1,40—1,50	$d + (4 \div 7)$
42—50	0,91	1,4	$d + (8 \div 12)$
52—60	0,92	1,4	$d + (12 \div 15)$
65—80	0,92	1,4	$d + (12 \div 15)$
80	0,92	1,4	$d + (12 \div 15)$

5. Радиус овала

$$R = \frac{b_{\text{ов}}^2 + (h_{\text{ов}} - m)^2}{4(h_{\text{ов}} - m)},$$

где

$$m = \frac{m}{h_{\text{ов}}} h_{\text{ов}}.$$

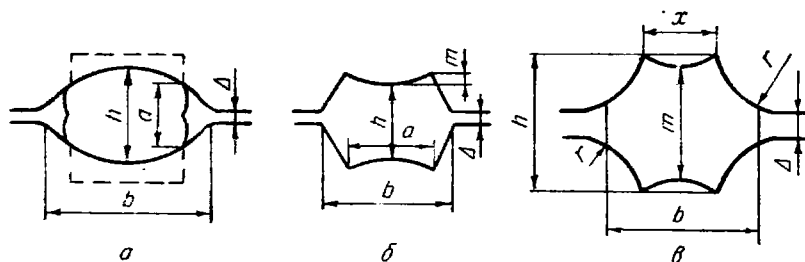


Рис. 100. Обозначения размеров калибров для прокатки шестигранной стали: a — овальный калибр; b — предотделочный калибр; $в$ — предчистовой шестигранный калибр

6. Ширина овала

$$b_{\text{ов}} = 2 \sqrt{(h_{\text{ов}} - \Delta) R - \left(\frac{h_{\text{ов}} - \Delta}{2}\right)^2}.$$

Ответ. См. рис. 101, г.

Задача № 130. Определить размеры чистовых и предчистовых калибров для прокатки круглой стали диаметром 33, 34 и 36 мм

на стане 300 мм шахматного типа, если известно, что номинальный диаметр валков промежуточных и чистовой клетей $D_n = 320$ мм.

Принимается схема калибровки, обеспечивающая прокатку всех трех кругов из общих черновых и предчистовых калибров (см. рис. 102, а).

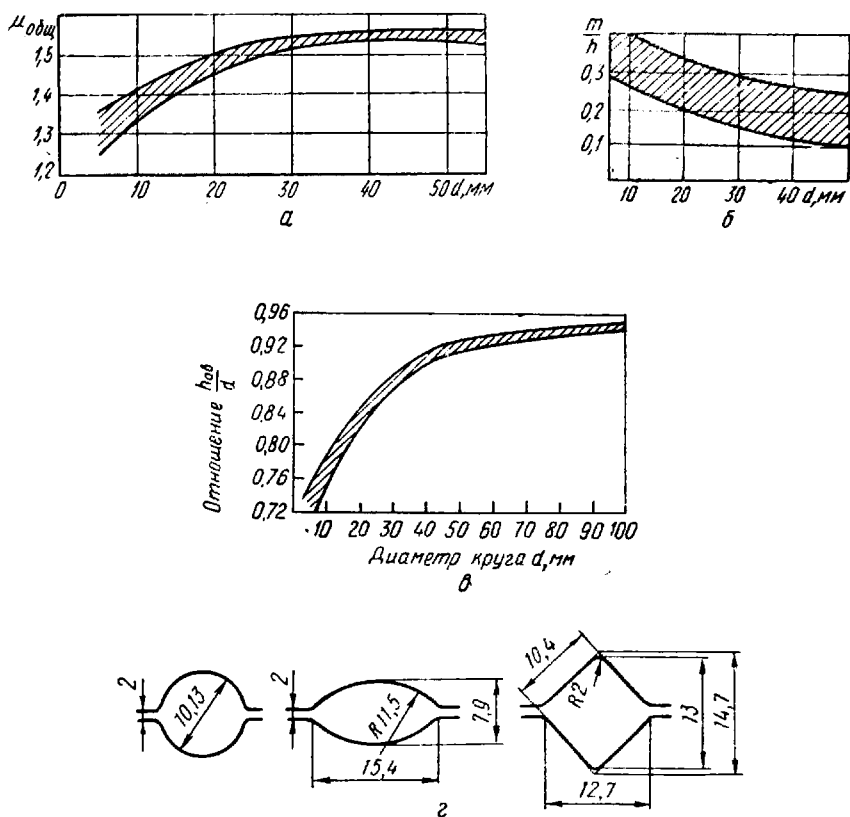


Рис. 101. Номограммы для определения размеров и эскизы чистового и предчистового калибров для прокатки круга:

а — зависимость общей вытяжки от размеров круга; б — определение степени притупления овала; в — зависимость отношения $h_{ов}/d$ от диаметра круга d ; г — основные размеры чистового и предчистового калибров (для $d = 10$ мм)

Решение. Расчет чистовых калибров. Круглая сталь в холодном состоянии диаметром $d_x = 33; 34$ и 36 мм изменяет свои размеры в горячем состоянии $d_r = 1,013d_x$ мм, т. е. соответственно $d_r = 33,4; 34,4$ и $36,4$ мм, а площадь поперечного сечения 880, 925 и 1040 мм².

Величину зазора для всех калибров приняли одинаковой:

$$\Delta = 0,008D_n = 0,008 \cdot 320 \approx 3,0 \text{ мм.}$$

Третий, ребровый калибр.

1. Площадь сечения полосы в ребровом калибре

$$F_3 = F_1 \mu_{\text{кв}} = 880 \cdot 1,52 = 1340 \text{ мм}^2,$$

где $\mu_{\text{кв}} = 1,52$ — общий коэффициент вытяжки от квадрата (ребрового калибра) к кругу для $d_1 = 33,4 \text{ мм}$ (рис. 102, а).

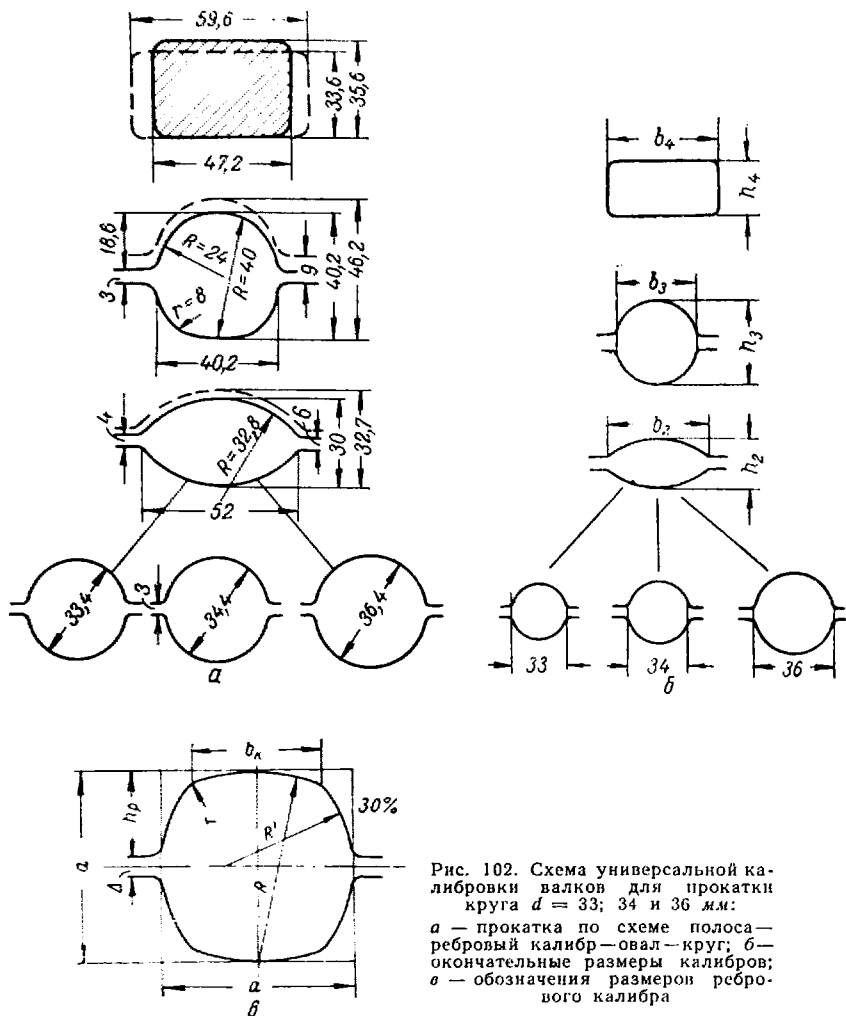


Рис. 102. Схема универсальной калибровки валков для прокатки круга $d = 33; 34$ и 36 мм :
 а — прокатка по схеме полосы — ребровый калибр — овал — круг; б — окончательные размеры калибров; в — обозначения размеров ребрового калибра

2. По рис. 102, в с помощью эмпирических формул находят размеры ребрового калибра. При этом сторона описанного квадрата

$$a = 1,1 \sqrt{F_3} = 1,1 \sqrt{1340} = 40,2 \text{ мм}.$$

Тогда

$$R' = a \approx 40 \text{ мм}; \quad R = 0,6a = 0,6 \cdot 40,2 \approx 24 \text{ мм};$$

$$r = 0,2a = 0,2 \cdot 40,2 = 8 \text{ мм} \text{ и } \frac{a-\Delta}{2} = h_p = \frac{40,2-3}{2} = 18,6 \text{ мм}.$$

3. Из ребрового калибра можно выдавать полосы с равными шириной и толщиной $b_3 = h_3 = 40,2 \text{ мм}$ (см. рис. 102, б) или толщиной, несколько превышающей ширину (это достигается подъемом верхнего валка), но на такую величину, чтобы площадь сечения полосы, выходящей из калибра, оставалась примерно постоянной. Этот же калибр используют для двух остальных проходов.

4. Производят расчет для самого крупного профиля — круга диаметром 36,4 мм.

Тогда

$$F_3 = F_1 \mu_{кв} = 1040 \cdot 1,52 = 1580 \text{ мм}^2.$$

Увеличение площади по сравнению с площадью ребрового калибра для круга $d_1 = 33,4 \text{ мм}$ составляет:

$$\Delta F = 1580 - 1340 = 240 \text{ мм}^2,$$

что достигается подъемом верхнего валка на величину

$$\frac{\Delta F}{b_3} = \frac{240}{40,2} = 6 \text{ мм}.$$

Тогда общий зазор $\Delta' = 3 + 6 = 9 \text{ мм}$, что допустимо для клетки имеющейся конструкции.

Таким образом, при прокатке круглой стали диаметром 36,4 мм из третьего ребрового калибра должна выходить полоса размерами:

$$h_3 = 40,2 + 6 = 46,2 \text{ мм} \text{ и } b_3 = 40,2 \text{ мм}.$$

Предчистовой овальный калибр.

1. По графику (рис. 101, б) при $d_1 = 33,4 \text{ мм}$ находят $m/h = 0,25$.

2. Определяют размеры овала для круга $d_1 = 33,4 \text{ мм}$ (рис. 101, в).

Имеем $h_{ов}/d = 0,89$, откуда $h_2 = 0,89 \cdot 33,4 = 30 \text{ мм}$.

Площадь овала

$$F_2 = \sqrt{\frac{F_1 F_3}{\frac{\mu_1}{\mu_2}}} = \sqrt{\frac{880 \cdot 1340}{1,11}} = 1065 \text{ мм}^2,$$

где

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = 1,27 - 0,64 \cdot \frac{m}{h} = 1,27 - 0,64 \cdot 0,25 = 1,11.$$

Ширина овала

$$b_2 = \frac{3F_{\text{ов}}}{h \left(2 + \frac{m}{h} \right)} = \frac{3 \cdot 1065}{30 (2 + 0,25)} = 47,3 \text{ мм.}$$

3. Для круга $d_3 = 36,4$ при неизменных отношениях вытяжек μ_1/μ_2 ,

$$F_2 = \sqrt{\frac{F_1 F_3}{\frac{\mu_1}{\mu_2}}} = \sqrt{\frac{1040 \cdot 1580}{1,11}} = 1210 \text{ мм}^2,$$

высота овала при $h/d = 0,9$ равна $h = 0,9 \cdot 36,4 = 32,7 \text{ мм}$, ширина овала

$$b_2 = \frac{3F_{\text{ов}}}{h \left(2 + \frac{m}{h} \right)} = \frac{3 \cdot 1210}{32,7 (2 + 0,25)} = 49,4 \text{ мм.}$$

Для расчета овального калибра, одинаково пригодного для прокатки круглой стали всех размеров, радиус его построения определяют, исходя из минимальной высоты (30 мм), притупления овала ($m = 0,25h = 7,5 \text{ мм}$) и его максимально необходимой ширины (49,4 мм):

$$R = \frac{b^2 + (h - m)^2}{4(h - m)} = \frac{(49,4)^2 + (30 - 7,5)^2}{4(30 - 7,5)} = 32,8 \text{ мм.}$$

Принятое отношение m/h обычно на практике точно не выдерживается. Расхождение можно компенсировать настройкой, поэтому перерасчет делать не обязательно.

Принимая зазор при минимальной высоте овала равным $\Delta = 4 \text{ мм}$, определяем ширину вреза овального калибра в валки:

$$\begin{aligned} b_k &= 2 \sqrt{(h - \Delta)R - \left(\frac{h - \Delta}{2} \right)^2} = \\ &= 2 \sqrt{(30 - 4) 32,8 - \left(\frac{30 - 4}{2} \right)^2} = 52,0 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Четвертый калибр (гладкая бочка).

1. Площадь прямоугольной полосы, выходящей из четвертого калибра, для круга $d_1 = 33,4 \text{ мм}$

$$F_4 = F_3 \mu_3 = 1340 \cdot 1,25 = 1680 \text{ мм.}$$

2. Уширение в ребровом калибре принимают $\Delta b_3 = 4 \text{ мм}$.

3. Толщина полосы, выходящей из четвертого калибра,

$$h_4 = 0,95b_3 - \Delta b_3 = 0,95 \cdot 40,2 - 4 = 34 \text{ мм,}$$

а ширина

$$b_4 = \frac{F_4}{h_4} = \frac{1680}{34} = 49,5 \text{ мм.}$$

4. Обжатие в третьем калибре

$$\Delta h_3 = b_4 - h_3 = 49,5 - 40,2 = 9,3 \text{ мм.}$$

Проверка правильности принятого уширения, равно $\Delta b_3 = 4 \text{ мм.}$

1. Находят предварительную величину катающего радиуса в третьем калибре:

$$R_k = \frac{D_n - h_3}{2} = \frac{320 - 40,2}{2} = 140 \text{ мм.}$$

2. По формуле Б. П. Бахтинова (см. табл. 28) определяем уширение в третьей клетке с учетом следующих данных: $t =$

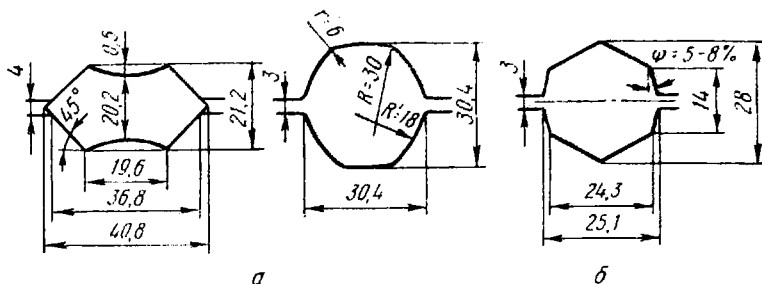


Рис. 103. Калибры для прокатки шестигранной стали:
а — размеры предчистовых калибров; б — размеры чистового калибра

$= 1000^\circ \text{C}$, $v_B = 5 \text{ м/сек}$, валки чугунные, $\Delta h_3 = 9,3 \text{ мм}$, $R_k = 140 \text{ мм}$, $f = 0,33$. Тогда

$$\Delta b_3 = 1,15 \frac{9,3}{2 \cdot 49,5} \left(\sqrt{140 \cdot 9,3} - \frac{9,3}{2 \cdot 0,33} \right) = 2,4 \text{ мм}$$

вместо принятого 4 мм. Поэтому, принятую толщину полосы необходимо увеличить на $4,0 - 2,4 = 1,6 \text{ мм}$, тогда ее размеры составят:

$$h_4 = 34 + 1,6 = 35,6 \text{ мм};$$

$$b_4 = \frac{F_4}{h_4} = \frac{1680}{35,6} = 47,2 \text{ мм.}$$

Аналогично находят максимальные размеры полосы, выходящей из четвертого калибра при прокатке круглой стали диаметром 36,4 мм.

Результаты расчетов: $b_4 = 59,6$ и $h_4 = 33,6 \text{ мм}$.

Общий вид рассчитанной калибровки показан на рис. 102, в. *Задача № 131* [59]. Определить размеры чистового и предчистового калибров для прокатки шестигранной стали $d = 24 \text{ мм}$ на стане 300 прерывного шахматного типа.

Ч и с т о в о й к а л и б р .

Размеры и форма чистового калибра показаны на рис. 103, б.

Диаметр вписанной окружности в горячем состоянии

$$d_r = 1,013d_x = 1,013 \cdot 24 = 24,3 \text{ мм.}$$

Размеры грани профиля

$$c = 0,577d = 0,577 \cdot 24,3 = 14 \text{ мм.}$$

Диаметр описанной окружности (размер между противоположными ребрами)

$$D_{\text{он}} = 1,155d = 1,155 \cdot 24,3 = 29 \text{ мм.}$$

Площадь профиля в горячем состоянии

$$F_1 = 0,866d^2 = 0,866 \cdot 24,3^2 = 510 \text{ мм}^2$$

$$(F_1 = 0,5\sqrt{3} \cdot d^2 = 0,866d^2).$$

При $\Delta = 3,0 \text{ мм}$ и $\text{tg } \phi = 0,07$ максимальная ширина калибра в местах разъема валков составит:

$$b = 24,3 + 2 \frac{14 - 3}{2} \cdot 0,07 = 25,1 \text{ мм.}$$

Предчистовые калибры.

Согласно графику рис. 101, а, общая вытяжка от квадрата к шестигольнику $\mu_{\text{кв}} = 1,5$. Тогда площадь предчистового ребрового калибра

$$F_3 = F_1 \mu_{\text{кв}} = 510 \cdot 1,5 = 765 \text{ мм}^2.$$

Определяем размеры для построения ребрового калибра в соответствии с рис. 102, в:

$$a = 1,1\sqrt{F_3} = 1,1\sqrt{765} = 30,4 \text{ мм}; \quad R = a = 30 \text{ мм};$$

$$R = 0,6a = 0,6 \cdot 30,4 = 18 \text{ мм}; \quad \eta = 0,2a = 0,2 \cdot 30,4 = 6 \text{ мм};$$

$$\Delta = 3 \text{ мм.}$$

Отношение вытяжки в предчистовом калибре к вытяжке в чистовом калибре находится в пределах 0,9—0,96. Для данного случая $\mu_1/\mu_2 = 0,95$. Тогда площадь предчистового калибра

$$F_2 = \sqrt{\frac{F_1 F_3}{\frac{\mu_1}{\mu_2}}} = \sqrt{\frac{510 \cdot 765}{0,95}} = 640 \text{ мм}^2.$$

Высоту предчистового калибра находят по графику рис. 101, в:

$$h_2/d_r = 0,87; \quad h_2 = 0,87d_r = 0,87 \cdot 24,3 = 21,2 \text{ мм.}$$

Ширина предчистового калибра

$$b_2 = \frac{F_2}{h_2} + \frac{1}{2} h_2 = \frac{640}{21,2} + 0,5 \cdot 21,2 = 40,8 \text{ мм.}$$

Ширина вреза калибра при $\Delta = 4 \text{ мм}$; $c = b_2 - \Delta = 40,8 - 4 = 36,8 \text{ мм}$.

Ширина средней части калибра (меньшее основание трапеции)

$$c = b_2 - h_2 = 40,8 - 21,2 = 19,6 \text{ мм.}$$

Размеры и форма калибров показаны на рис. 102.

8. КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ ДЛЯ ПОЛОСОВОЙ СТАЛИ

Схемы прокатки полосовой стали приведены на рис. 104. Полосу прокатывают двумя способами: в закрытых калибрах и в гладких (или ступенчатых) валках (рис. 105, а).

Первый способ применяют при производстве полос шириной 80—200 мм и, особенно, изделий из малопластичных сталей, прокатываемых только в условиях ограниченного уширения. Второй способ применяют при производстве полос шириной до 150 мм. В этом случае минимальная толщина самых широких полос 12 мм.

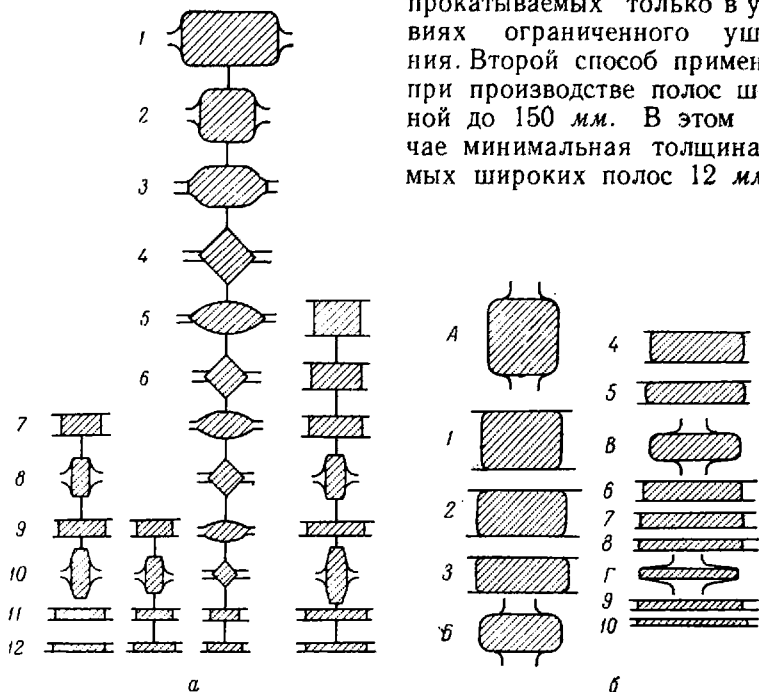


Рис. 104. Схемы прокатки полосовой стали:

а — стан линейного типа; б — непрерывный стан; 1—10 — клетки с горизонтальными валками; А—Г — клетки с вертикальными валками

Для получения точных размеров по ширине, а также для получения прямых и острых кромок применяют специальные ребровые предчистовые калибры (рис. 104, б).

Для определения основных размеров ребровых калибров существуют следующие нормы:

1. Степень деформации $\eta = \frac{H}{h}$ должна быть в пределах 1,05—1,20. Чем тоньше и шире полоса, тем меньше должна быть величина обжатия.

2. Ширина дна калибра $b_k = (0,98 \div 1,05) b$, где b — ширина задаваемой в калибр полосы.

3. Уклон боковых стенок находится в пределах 5—10% или $\operatorname{tg} \psi = 0,05 \div 0,10$.

4. Выпуклость дна калибра s принимают равной от 0,5—1,0 мм.

5. Глубину вреза h_p выбирают из условия получения нормального зазора (около $0,015D_p$) при прокатке узких полос. При про-

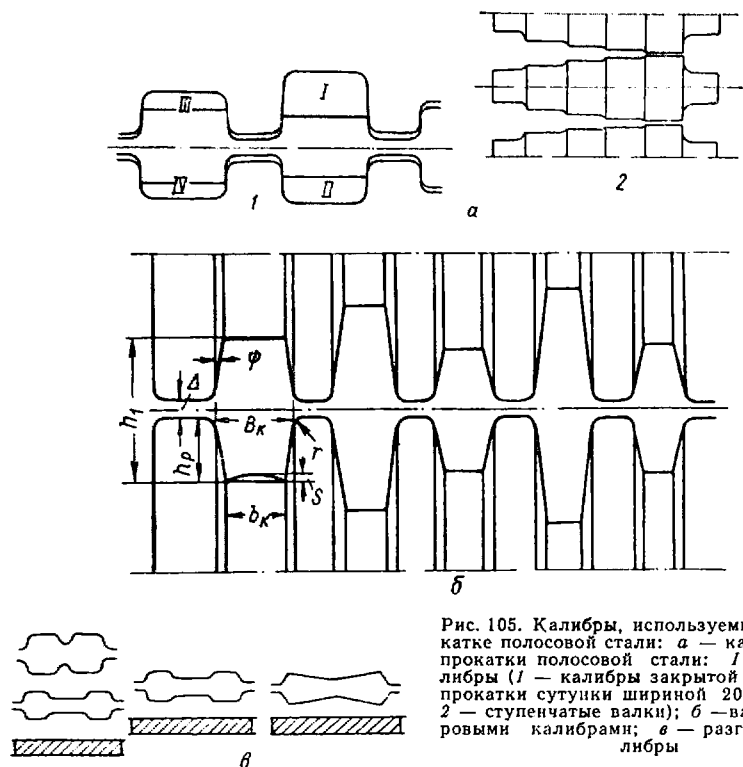


Рис. 105. Калибры, используемые при прокатке полосовой стали: а — калибры для прокатки полосовой стали: I—IV — калибры (I — калибры закрытой формы для прокатки сутунки шириной 200—250 мм; 2 — ступенчатые валки); б — валки с ребровыми калибрами; в — разгонные калибры

катке широких полос зазор Δ увеличивают путем подъема верхнего валка. Углы калибра выполняют острыми, а фаски буртов округляют радиусом $r = 5 \div 15$ мм.

6. Когда ширина прокатываемой полосы значительно превосходит ширину исходной заготовки, калибровщики прибегают к специальным приемам искусственного увеличения ширины прокатываемой полосы с помощью вынужденного уширения металла, достигаемого применением калибров особой конструкции, так называемых разгонных калибров (рис. 105, в).

Иногда можно увеличить ширину прокатываемой полосы, используя вынужденное уширение в комбинации с диагональным расположением исходной заготовки при задаче в первый фасонный

полосовой калибр. Такой способ применяют главным образом при прокатке заготовок сравнительно небольших размеров.

На непрерывных станах ребровые проходы производят в клетях с вертикальными валками.

Кроме полос основного сортамента, имеются некоторые разновидности полосовой стали: рессоры, гладкие, двояковогнутые и желобчатые, полосы штрипсовые и гаечные, лента, лемешная сталь, автообод и т. д. Метод расчета калибровки таких полос приведен в работе [7].

Задача № 132. Разработать схему прокатки стальной (0,3% С) полосы сечением 7×90 мм. Диаметр валков $D_n = 500$ мм.

Решение. 1. Размер исходного квадрата для полосы 90×7 мм определяем по формуле

$$H = \frac{b_1 + kh}{1 + k} = \frac{91,3 + 0,25 \cdot 7}{1 + 0,25} = 74,4 \text{ мм},$$

где $b_1 = 1,015 \cdot 90 = 91,3$ мм;

$k = 0,25$ — коэффициент уширения.

Принимаем сторону квадрата $H = B = 75$ мм.

2. Коэффициент суммарного уменьшения высоты

$$\sum \eta = \frac{75}{7} = 10,7.$$

3. По найденному значению $\sum \eta = 10,7$ отыскиваем подходящую вертикальную графу в табл. 47. Ближайшие значения $\sum \eta = 9,8$ и $\sum \eta = 11,52$ имеют соответственные порядковые номера вариантов: 29 и 33. Первое значение соответствует восьми калибрам, второе — семи калибрам. Останавливаемся на втором варианте, т. е. $n = 7$. Тогда высотные коэффициенты вытяжки по проходам по ходу прокатки будут: $\eta_1 = 1,90$; $\eta_2 = 1,75$; $\eta_3 = 1,60$; $\eta_4 = 1,45$; $\eta_5 = 1,30$; $\eta_6 = 1,15$; $\eta_7 = 1,00$.

4. Так как $\sum_1 \eta < \sum_2 \eta$, то, чтобы конечный и исходный профили совпадали, необходимо откорректировать коэффициенты $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$. Для этого определяем поправочный коэффициент:

$$k = \sqrt[n-1]{\frac{\sum_1 \eta}{\sum_2 \eta}} = \sqrt[6]{\frac{10,7}{11,52}} = 0,99.$$

5. Затем частные коэффициенты деформации умножают на поправочный коэффициент k :

$$\eta_1 = 1,90 \cdot 0,99 = 1,88; \quad \eta_2 = 1,75 \cdot 0,99 = 1,73;$$

$$\eta_3 = 1,6 \cdot 0,99 = 1,58; \quad \eta_4 = 1,45 \cdot 0,99 = 1,43;$$

$$\eta_5 = 1,30 \cdot 0,99 = 1,29; \quad \eta_6 = 1,15 \cdot 0,99 = 1,14.$$

Коэффициенты высотной вытяжки

Порядковый номер варианта	Коэффициент высотной вытяжки										$\Sigma \eta$
1	1,00	1,25	1,50	—	—	—	—	—	—	—	1,87
2	1,00	1,60	1,60	—	—	—	—	—	—	—	2,08
3	1,00	1,35	1,70	—	—	—	—	—	—	—	2,30
4	1,00	1,40	1,80	—	—	—	—	—	—	—	2,52
5	1,00	1,45	1,90	—	—	—	—	—	—	—	2,76
6	1,00	1,50	2,00	—	—	—	—	—	—	—	3,00
7	1,00	1,17	1,34	1,50	—	—	—	—	—	—	2,35
8	1,00	1,20	1,40	1,60	—	—	—	—	—	—	2,69
9	1,00	1,23	1,46	1,70	—	—	—	—	—	—	3,05
10	1,00	1,27	1,54	1,80	—	—	—	—	—	—	3,52
11	1,00	1,30	1,60	1,90	—	—	—	—	—	—	3,95
12	1,00	1,33	1,67	2,00	—	—	—	—	—	—	4,44
13	1,00	1,12	1,25	1,37	1,50	—	—	—	—	—	2,90
14	1,00	1,15	1,30	1,45	1,60	—	—	—	—	—	3,47
15	1,00	1,17	1,35	1,52	1,70	—	—	—	—	—	4,11
16	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	—	—	—	—	—	4,84
17	1,00	1,22	1,45	1,67	1,90	—	—	—	—	—	5,66
18	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	—	—	—	—	—	6,56
19	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	—	—	—	—	3,6
20	1,00	1,22	1,24	1,36	1,48	1,60	—	—	—	—	4,47
21	1,00	1,14	1,28	1,42	1,56	1,70	—	—	—	—	5,60
22	1,00	1,16	1,32	1,48	1,64	1,80	—	—	—	—	6,69
23	1,00	1,18	1,36	1,54	1,72	1,90	—	—	—	—	8,07
24	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,0	—	—	—	—	9,67
25	1,00	1,08	1,17	1,24	1,93	1,41	1,50	—	—	—	4,46
26	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	—	—	—	5,77
27	1,00	1,12	1,23	1,35	1,47	1,58	1,70	—	—	—	7,36
28	1,00	1,13	1,27	1,40	1,53	1,66	1,80	—	—	—	9,22
29	1,00	1,15	1,30	1,45	1,60	0,75	1,90	—	—	—	11,52
30	1,00	1,17	1,33	1,50	1,67	1,83	2,00	—	—	—	14,28
31	1,00	1,07	1,14	1,21	1,28	1,35	1,42	1,50	—	—	5,43
32	1,00	1,09	1,17	1,26	1,34	1,43	1,52	1,60	—	—	7,46
33	1,00	1,10	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	—	—	9,8
34	1,00	1,11	1,23	1,34	1,46	1,57	1,68	1,80	—	—	12,7
35	1,00	1,13	1,26	1,39	1,52	1,65	1,78	1,90	—	—	16,8
36	1,00	1,14	1,29	1,43	1,57	1,71	1,85	2,00	—	—	20,9
37	1,00	1,06	1,12	1,19	1,22	1,31	1,37	1,24	1,50	—	6,91
38	1,00	1,07	1,15	1,22	1,30	1,37	1,45	1,52	1,60	—	9,56
39	1,00	1,09	1,18	1,26	1,35	1,44	1,53	1,62	1,70	—	13,3
40	1,00	1,10	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	—	17,8
41	1,00	1,11	1,22	1,33	1,44	1,55	1,67	1,79	1,90	—	22,8
42	1,00	1,12	1,25	1,37	1,50	1,62	1,75	1,87	2,00	—	30,9

6. Определим толщину полосы после каждого прохода

$$h_1 = \frac{75}{1,88} = 40 \text{ мм}; \quad h_2 = \frac{40}{1,73} = 23 \text{ мм}; \quad h_3 = \frac{23}{1,58} = 14,5 \text{ мм};$$

$$h_4 = \frac{14,5}{1,43} = 10 \text{ мм}; \quad h_5 = \frac{10}{1,29} = 7,75 \text{ мм}; \quad h_6 = \frac{7,75}{1,14} = 7 \text{ мм}.$$

7. Суммарное уширение $\sum \Delta b = 91,3 - 75 = 16,3 \text{ мм}$ разбиваем на шесть проходов: $\Delta b_1 = 6 \text{ мм}$; $\Delta b_2 = 4 \text{ мм}$; $\Delta b_3 = 3 \text{ мм}$; $\Delta b_4 = 2 \text{ мм}$; $\Delta b_5 = 0,9 \text{ мм}$; $\Delta b_6 = 0,4 \text{ мм}$. Данные по определению уширения Δb находим в табл. 28 (формула Л. Жеза).

8. Определяем ширину полосы после каждого прохода. Полученные данные сводим в табл. 48.

Т а б л и ц а 48

Калибровка полосы 7×90 мм

Номер калибра	η		$h_{\text{теор}}$ мм	h мм	$h_0 - h_1$ мм	Коэффициент уширения	Δb мм	b мм
	по табл. 47	исправленные						
1	1,0	1,0	7,0	7,0	1	0,37	0,4	91,3
2	1,15	1,14	7,83	8,0	2	0,36	0,9	90,9
3	1,30	1,29	10,1	10,0	5	0,34	2,0	90,0
4	1,45	1,43	14,68	15,0	8	0,27	3,0	88,0
5	1,60	1,58	23,3	23,0	17	0,22	4,0	85,0
6	1,75	1,73	40,3	40,0	35	0,12	6,0	81,0
7	1,90	1,86	75,0	7,5	—	—	—	75,0

Задача № 133. По методу Б. П. Бахтинова и М. М. Штернова [59] определить суммарное и частное обжатия в четвертой и восьмой клетях, т. е. в ребровых калибрах (см. рис. 104, б), исходя из следующих данных: размеры исходной заготовки в горячем состоянии 172×172 мм; размеры готовой полосы в горячем состоянии 162×16 мм; прокатку производят в девяти клетях, из них две — с ребровыми калибрами. Остальные исходные данные приведены в табл. 49.

Обжатие

$$\Delta h_{\text{max}} = D_k \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + f^2}} \right) = 500 \left(1 - \sqrt{\frac{1}{1 + (0,43)^2}} \right) = 42 \text{ мм}.$$

Коэффициенты деформации

$$\eta \leq \frac{H_0}{h_1} = \frac{172}{172 - 42} = 1,32.$$

Решение. 1. Определяем толщину полосы в этих клетях:

$$h_7 = h_0 \eta_9 = 16 \cdot 1,25 = 20 \text{ мм}.$$

Аналогично определяем толщину полосы после прокатки в других клетях. Расчет можно вести по ходу и против хода прокатки.

2. Основные параметры прокатки определяем по известным формулам и сводим в табл. 50.

Таблица 49

Таблица 50

Исходные данные расчета калибровки

Параметры прокатки полосы 162×16 мм

Номер клетки	Рабочий диаметр мм	Коэффициент трения	Коэффициент деформации в плоских калибрах η	Номер клетки	Толщина полосы после прокатки h мм	Обжатие Δh , мм	Уширение, рассчитанное по формуле Б. П. Бахтинова, Δb , мм
1	500	0,43	1,30	9	16	4	3,0
2	540	0,43	1,46	7	20	6	4,1
3	580	0,42	1,60	6	26	10	6,1
5	500	0,38	1,55	5	36	20	8,0
6	520	0,36	1,40	3	56	34	12,5
7	520	0,34	1,30	2	90	42	10,5
9	520	0,31	1,25	1	132	40	7,0
				—	172×172	—	51,2

Уширение определяем по формуле Б. П. Бахтинова (см. табл. 28), а коэффициент трения определяем по формуле Экелунда (см. табл. 23, 24). При этом учитываем следующие данные: валки первых четырех клетей изготовлены из стали, остальные—из чугуна; температура прокатки изменяется от 1250° С в первой клетке до 950° С — в последней; скорость прокатки изменяется от 0,6—0,8 м/сек в первой клетке до 5 м/сек — в последней.

3. Суммарное обжатие в ребровых калибрах в четвертой и восьмой клетях определяем по формуле

$$\Delta h_{p4} + \Delta h_{p8} = B_0 - b_9 + \sum_1^{n-2} \Delta b = 172 - 162 + 51,2 = 61,2 \text{ мм.}$$

Принимаем в предчистовом восьмом ребровом калибре $\Delta h_8 = 25$ мм. Тогда

$$h_8 = 162 - 3 = 159 \text{ мм и } b_7 = b_8 + \Delta h_8 = 159 + 25 = 184 \text{ мм.}$$

Коэффициент деформации в ребровом калибре

$$\eta_8 = \frac{b_7}{h_8} = \frac{184}{159} = 1,16,$$

что допустимо. Обжатие в четвертом ребровом калибре $\Delta h_{p4} = 61,2 - 25 = 36,2$ мм.

Расчет режима обжатий при прокатке полосовой стали по методу Б. П. Бахтинова и М. М. Штернова

1. Распределение деформации η_0 по проходам производят таким образом, что для каждого прохода устанавливают коэффициент деформации, при котором абсолютное обжатие равно

или меньше максимально допустимого Δh_{\max} , рассчитанного из условий захвата металла валками (см. табл. 20, формула 12-IV).

2. Коэффициенты деформации в плоских калибрах распределяют отдельно от ребровых.

3. Расчет толщины полосы ведут против хода прокатки для каждого плоского калибра.

4. Определяют линейные обжатия в каждом плоском калибре или проходе.

5. Находят суммарное обжатие в ребровых калибрах. Если в схеме прокатки имеются два ребровых калибра, а всего вместе с ними n калибров, то суммарное обжатие в ребровых калибрах будет равно:

$$\sum \Delta h_p = \Delta h_{p_1} + \Delta h_{p_2} = (B_0 - b_n) + \sum_1^{n-2} \Delta b,$$

где Δh_{p_1} и Δh_{p_2} — обжатия в первом и втором ребровых калибрах;

B_0 — ширина исходной заготовки в горячем состоянии;

b_n — ширина готовой полосы;

$\sum_1^{n-2} \Delta b$ — суммарное уширение при прокатке в калибрах или клетях непрерывного стана (при отсутствии ребровых калибров).

6. Уширение находят в каждом проходе по формуле Б. П. Бахтинова (см. табл. 28).

7. При распределении суммарного обжатия между ребровыми калибрами допускаемое обжатие в них принимают в пределах 5—20%.

8. Размеры предчистового ребрового калибра:

$$h_{n-1} = b_n - \Delta b_n; \quad b_{n-1} = h_n + \Delta h_n.$$

Уширение в ребровых калибрах обычно не рассчитывают, так как оно незначительно.

9. Коэффициент деформации в ребровом калибре $\eta = \frac{b_{n-2}}{h_{n-1}}$.

Ребровые калибры приведены на рис. 105, б¹.

10. Определяют ширину полосы в плоских калибрах.

Изложенный метод расчета обжатий при прокатке полосовой стали применим тогда, когда известны размеры исходного квадрата, диаметр валков, а также расположение рабочих клетей.

9. КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ ЛИСТОВЫХ СТАНОВ

Под калибровкой листового стана понимают последовательный подбор обжатий по проходам при прокатке.

При выборе рациональной калибровки необходимо установить размеры исходной заготовки (см. гл. I), определить начальную

¹ Нормы для определения размеров калибров приведены на с. 241.

температуру прокатки (см. гл. II), найти температуру металла по проходам, рассчитать усилия, возникающие при выбранных обжатиях (см. формулу 72-IV), определить расход энергии и мощности двигателя (см. гл. IV, с. 172), рассчитать производительность для всех возможных вариантов калибровки.

В решениях задач рассмотрены два метода распределения обжатий по проходам — В. А. Тягунова [24] и Н. В. Литовченко [80]. Рассмотрим сначала решение задачи методом В. А. Тягунова.

Задача № 134. Дано: начальная толщина сляба $h_0 = 220$ мм; конечная толщина $h_k = h_{n-1} = 7$ мм; температура начала прокатки $t_n = 1200^\circ\text{C}$, температура конца прокатки $t_k = 870^\circ\text{C}$. Определить температуру металла в начале пятого прохода, если прокатка производится при следующих обжатиях: $\Delta h_1 = 10$ мм, $\Delta h_2 = 18$ мм, $\Delta h_3 = 36$ мм, $\Delta h_4 = 20$ мм.

Решение. Сначала определяют коэффициент K , постоянный при заданных температурах:

$$K_1 = \frac{t_n - t_k}{h_0 - h_{n-1}} h_0 \cdot h_{n-1} = \frac{1200 - 870}{220 - 7} \cdot 220 \cdot 7 = 2380 \text{ град} \cdot \text{мм}.$$

Затем находят условную температуру

$$t_0 = \frac{K}{h_0} + t_n = \frac{2380}{220} + 1200 = 1211^\circ\text{C}.$$

Определив значения K и t_0 , вычисляют температуру металла в начале пятого прохода

$$t_5 = t_0 - \frac{K_1}{h_4},$$

где

$$h_4 = h_0 - \sum \Delta h = 220 - 84 = 136 \text{ мм}.$$

Тогда

$$t_5 = 1211 - \frac{2380}{136} = 1194^\circ\text{C}.$$

Температуру металла в начале каждого предыдущего (четвертого, третьего, второго проходов) определяют этим же методом, причем для всех проходов $t_0 = \text{const}$ и $K = \text{const}$, а переменными величинами являются только толщины h_1 , h_2 , h_3 и h_4 .

Задача № 135. Лист размерами $3 \times 1400 \times 8400$ мм прокатывают за восемь проходов из раската сечением 15×1500 мм массой 340 кг. Начальная температура $t_0 = 1007^\circ\text{C}$. Продолжительность прокатки в девяти проходах (один проход — проглаживание) $\tau = 40$ сек. Определить конечную температуру t_k металла.

Решение. Конечная температура металла $t_k = t_n - \Delta t$, где Δt — перепад температуры за девять проходов

$$\Delta t = \frac{K}{h_{n-1}} - \frac{K}{h_0} = K \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{15} \right) = 0,266K,$$

а

$$K = \frac{t_n - 400}{16} \cdot \frac{\mu_{cp}}{\mu_{cp} - 1} z = \frac{1007 - 400}{16} \cdot \frac{1,223}{1,223 - 1} \cdot 4,5 = 940 \text{ град} \cdot \text{мм},$$

где

$$z = \frac{\tau}{n} = \frac{40}{9} = 4,5 \text{ сек};$$

$$\lg \mu_{cp} = \frac{\lg \mu_{общ}}{n - 1} = \frac{\lg \frac{15}{3}}{9 - 1} = 0,087.$$

Откуда $\mu_{cp} = 1,223$.

Тогда

$$\Delta t = 0,266K = 0,266 \cdot 940 = 250^\circ \text{ C};$$

$$t_k = t_n - \Delta t = 1007 - 250 = 757^\circ \text{ C}.$$

Задача № 136 [73]. Составить режим обжатий для прокатки листа размерами $4 \times 1500 \times 5600 \text{ мм}$ из сляба $130 \times 300 \times 900 \text{ мм}$ массой 276 кг на стане $750/500/750 \times 2000$. Материал листа — Ст.3, предел прочности которой при 20° C равен 450 Мн/м^2 (45 кг/мм^2). Начальная температура прокатки 1200° C ; $t_{пл} = 1475^\circ \text{ C}$ (рис. 67); конечная температура листа 870° . Длина шейки валка $l = 425 \text{ мм}$; материал валков — чугун [допускаемое напряжение при изгибе $\sigma_{изг} = 80 \text{ Мн/м}^2$ (8 кг/мм^2)]; скорость вращения валков $n = 75 \text{ об/мин}$, скорость прокатки $v = 2,36 \text{ м/сек}$.

Определить для каждого прохода:

- 1) температуру металла перед каждым проходом;
- 2) ширину раската при прокатке сляба (угол $\varphi = 10^\circ$), при этом коэффициент вытяжки μ принят по данным табл. 51;
- 3) длину листа после каждого прохода, начиная с седьмого прохода (общее число всех проходов, считая последний без обжатий $n = 11$);
- 4) ширину пояса деформации при прокатке сляба ($b_{cp} = L/\cos \varphi$);
- 5) давление металла на валок;
- 6) допускаемое давление металла на валок

$$P_{доп} = \frac{0,4D^3\sigma_{изг}}{(L + l) - 0,5b_{cp}}.$$

Результаты расчетов сравнить с данными, приведенными в табл. 51.

Расчет производят по методу В. А. Тягунова [24] и [73].

Калибровку непрерывных толстолистовых станов рассчитывают аналогично, с той лишь разницей, что в случае непрерывной прокатки листа выбранные коэффициенты вытяжки по проходам и число оборотов рабочих клетей должны быть в полном соответствии с константой калибровки.

Таблица 51

Параметры прокатки листа $4 \times 1500 \times 5600$ мм из сляба
 $130 \times 300 \times 900$ мм массой 273 кг

Номер прохода	h , мм	Δh , мм	L , м	μ	B , мм	φ	$b_{ср}$, мм	t , °C	ρ		P_h	
									Мк/м ²	кг/м ²	Мн	Т
0	130	—	0,9	—	300	—	—	—	—	—	—	—
1	118	12	0,9	1,10	330	10	914	1200	53	5,3	2,91	291
2	97	21	0,9	1,22	400	10	915	1199	53	5,3	3,90	390
3	76	21	0,916	1,276	505	10	929	1196	53	5,3	3,92	392
4	55	21	0,930	1,38	690	10	945	1195	59	5,9	4,32	432
5	36	19	0,940	1,53	1035	10	955	1190	68	6,8	4,85	485
6	24	12	0,97	1,50	1500	10	1500	1180	77,5	7,75	4,95	495
7	15	9	1,56	1,60	1500	90	1500	1168	97	9,7	7,41	741
8	9	6	2,59	1,67	1500	90	1500	1144	127	12,7	8,08	808
9	5,7	3,9	4,10	1,58	1500	90	1500	1103	167	16,7	7,90	790
10	4,0	1,7	5,84	1,425	1500	90	1500	1037	215	21,5	7,25	725
11	4,0	0	5,84	0	1500	90	1500	973	—	—	—	—

Таблица 52

К решению задачи № 137

Формула	Номер прохода			
	2	3	4	5
$h_1 = \frac{h_0}{1+k}$, мм	$\frac{330}{1,0645} = 310$	$\frac{310}{1,0636} = 290$	$\frac{290}{1,0618} = 272$	$272 - 17 = 255$
$b_1 = b_0(1+k)$, мм	$1700 \times 1,0645 = 1810$	$1810 \times 1,0636 = 1940$	$1940 \times 1,0618 = 2070$	$2070 \times 1,066 = 220$
Δh , мм	$330 - 310 = 20$	$310 - 290 = 20$	$290 - 272 = 18$	$75 - (20 + 20 + 18) = 17$
$\Delta h_5 = \sum_2^4 \Delta h - (\Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4)$, мм	—	—	—	$\Delta h_5 = 75 - (20 + 20 + 17) = 17$ при $k = \frac{\Delta h}{h_5} = \frac{17}{255} = 0,066$

Задача № 137. Составить режим обжатий для прокатки листа размерами $100 \times 220 \times 4900$ мм из подката $330 \times 1700 \times 1900$ мм из стали марки МСт.3. Диаметр валков 1250 мм; двигатель $N = 5888$ квт (8000 л. с.) при $n_{\max} = 15$ об/мин. Задачу решить по методу Н. В. Литовченко [80] (табл. 52).

Решение. Уширение при прокатке принимаем равным нулю, т. е. $\Delta b = 0$. Тогда

$$\frac{h_0}{h_1} = \frac{b_1}{b_0} = \frac{2200}{1700} = 1,294.$$

В этих условиях толщина раската

$$h_1 = \frac{h_0}{1,294} = \frac{330}{1,294} = 255 \text{ мм.}$$

Суммарное обжатие при раскате

$$\sum \Delta h = h_0 - h_1 = 330 - 255 = 75 \text{ мм.}$$

Необходимое число проходов при раскате принимаем на один больше расчетного значения, исходя из нагрузки на двигатель и расположения кантователя. Первый проход делаем холостым. Число рабочих проходов $n = 4$. Определяем среднее обжатие за один проход:

$$\Delta h_{\text{ср}} = \frac{\sum \Delta h}{n} = \frac{75}{4} = 19 \text{ мм.}$$

Принимаем обжатие во втором проходе $\Delta h_2 = 20$ мм, считая, что в первом проходе $\Delta h_1 = 0$. Тогда толщина раската после второго прохода

$$h_2 = 330 - 20 = 310 \text{ мм.}$$

Отсюда

$$k_2 = \frac{\Delta h_2}{h_2} = \frac{20}{310} = 0,0645.$$

В пятом проходе, учитывая понижение температуры, принимаем $\Delta h_5 = 15$ мм. Тогда

$$k_5 = \frac{\Delta h_5}{h_5} = \frac{15}{255} = 0,059.$$

На основании данных относительных обжатий строим график (рис. 106). По оси абсцисс откладываем размеры h_2 и h_5 , по оси ординат — k_2 и k_5 . По этим координатам строим прямую линию;

методом интерполяции определяем значения k для каждого прохода:

$$k_1 = 0; \quad k_2 = 0,0645; \quad k_3 = 0,0636; \quad k_4 = 0,0618; \quad k_5 = 0,059.$$

Затем определяем толщину раската после каждого прохода.

Прокатка на длину при $B = \text{const}$.

Общее обжатие после кантовки

$$\sum \Delta h = h_5 - h_k = 255 - 100 = 155 \text{ мм.}$$

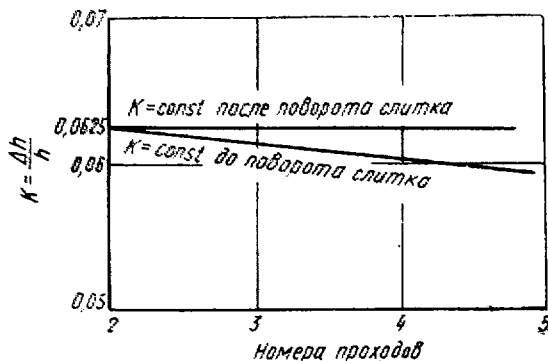


Рис. 106. График для определения константы k и толщины листа в каждом проходе

Из-за понижения температуры металла за период раската и подката металла на ширину листа среднее обжатие за проход при последующей прокатке раската принимаем равным $\Delta h_{cp} = 10$ мм.

$$n = \frac{\sum \Delta h}{\Delta h_{cp}} = \frac{155}{10} = 15.$$

В первом проходе после кантовки обжатие принимаем равным $\Delta h_6 = 15$ мм. Тогда

$$\frac{\Delta h_6}{h_6} = \frac{15}{255 - 15} = 0,0625.$$

В пятнадцатом проходе после кантовки, или в двадцатом от начала прокатки, линейное обжатие $\Delta h_{20} = 6,25$, а

$$k_{20} = \frac{\Delta h_{20}}{h_k} = \frac{6,25}{100} = 0,0625.$$

Получаем, что $k_6 = k_{20} = 0,0625$.

При $k = \text{const}$ расчет упрощается и построение графика теряет всякий смысл.

Так как прокатка заканчивается только на нечетном числе проходов, то обжатие в двадцатом проходе разбиваем соответственно на 4 и 2,25 мм.

Все расчетные данные приведены в табл. 53.

Проверку мощности двигателя при прокатке листа из подката производим по методике, рассмотренной в гл. IV.

Режим прокатки подката 330×1700×1900 мм в лист
размерами 100×2200×4900 мм

Номер прохода	H, мм	B, мм	L, мм	Δh, мм	$k = \frac{\Delta h}{h}$	Δb, мм	Δl, мм	α
1	330	1700	1900	—	—	—	—	—
2	310	1900	1810	20	0,0645	110	—	10° 15'
3	290	1900	1940	20	0,0636	130	—	—
4	272	1900	2070	18	0,0618	130	—	—
5 *	255	1900	2200	17	0,06	130	—	9° 30'
6	240	2200	2020	15	0,0625	—	120	8° 54'
7	226	2200	2145	14	0,0625	—	125	—
8	213	2200	2280	13	0,0625	—	135	—
9	200	2200	2430	13	0,0625	—	150	—
10	188	2200	2585	12	0,0625	—	155	—
11	177	2200	2745	11	0,0625	—	160	—
12	166	2200	2930	11	0,0625	—	185	—
13	156	2200	3110	10	0,0625	—	180	—
14	146	2200	3325	10	0,0625	—	215	—
15	137	2200	3545	9	0,0625	—	220	—
16	126	2200	3800	9	0,0625	—	255	—
17	120	2200	4050	8	0,0625	—	250	—
18	113	2200	4300	7	0,0625	—	250	—
19	106	2200	4570	7	0,0625	—	270	—
20	102	2200	4570	4	0,0625	—	180	—
21	100	2200	4850	2	0,0625	—	150	—

* После пятого прохода следует кантовка слитка.

10. КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ ДЛЯ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Основные принципы расчета калибровок

Кинематические условия течения металла в фасонных калибрах пока исследованы недостаточно, поэтому размеры всех фасонных калибров определяют по эмпирическим формулам и номограммам, а также по некоторым аналитическим формулам, полученным из геометрических соотношений очага деформации. Следовательно, правильность расчета калибровки во многом зависит от опыта и интуиции калибровщика.

При проектировании калибровок валков для прокатки фасонных профилей многие авторы рекомендуют придерживаться следующих принципиальных правил:

1. В начале процесса, когда температура металла высокая, можно применять значительные обжатия, не опасаясь неравномерности деформации металла.

2. По мере приближения формы металла к чистовому профилю необходимо создавать условия равномерной деформации с уменьшенными обжатиями полки (фланца) и шейки профиля.

3. Скоростной режим во фланцевом калибре с учетом постоянства секундных объемов для закрытого фланца $\frac{v_{ш}}{v_3} = \frac{F_3 + \Delta F_3}{F_3}$, для открытого фланца

$$\frac{v_{ш}}{v_0} = \frac{F_0 + \Delta F_0}{F_0},$$

где $v_{ш}$ — скорость, соответствующая катающему диаметру шейки

$$v_{ш} = \frac{\pi n}{60} \cdot D_{ш};$$

v_3 — средняя скорость перемещения частиц металла в закрытом калибре;

$v_0 = \frac{\pi n}{60} (D_{ш} + d)$ — средняя скорость, с которой должны проходить частицы металла в открытом калибре;

d — толщина шейки калибра;

F_3 и F_0 — площадь фланцев в закрытых и открытых калибрах;

ΔF_3 и ΔF_0 — изменение площадей фланцев в закрытых и открытых калибрах.

4. Радиусы закруглений у фланцевых профилей должны соответствовать толщине прилегающей части профиля, при этом за исходную величину принимают отношение радиуса к толщине прилегающей части профиля в готовом продукте, которое остается постоянным на протяжении всей калибровки, т. е. $R/b = \text{const}$, где R — радиус закругления шейки и фланцев в готовом профиле.

5. У фланцевых профилей выпуск боковых стенок (наклон стенок калибра) обычно принимают равным 5—8% (3—4°) в черновых калибрах, 1,5—2% (1—1,5°) — в предчистовом и до 1,25% (до 1°) — в чистовом. Наклон внутренних граней фланцевых ручьев составляет 12—16% (7—9°) в чистовом калибре и 40—70% (22—35°) — в разрезном. Во всех промежуточных калибрах наклон внутренних граней фланцевых ручьев плавно изменяют от максимального значения до минимального.

Следует иметь в виду, что явления, наблюдаемые при прокатке в балочном калибре, характерны также для любого фланцевого калибра: рельсового, швеллерного и т. п.

6. Расчеты по определению размеров фасонных калибров производят против хода прокатки.

Ввиду того, что расчет калибровки валков для прокатки фасонных профилей сложен, а сортамент профилей разнообразен,

в данном разделе приведен пример расчета калибровки только двутавровой балки как типового профиля, а также угловой стали, имеющей свои особенности. Более подробные данные по проектированию других фасонных профилей изложены в специальном курсе «Калибровка валков» в работах [7, 59, 75, 77].

Калибровка угловой стали

Схемы калибровки валков для прокатки угловой стали приведены на рис. 107. Выбор схемы калибровки зависит от типа стана, размеров исходной заготовки, а также от принятого принципа построения калибров валков всех клеток. В настоящее время наибольшее распространение получили два метода калибровки: с развернутыми полками в закрытых калибрах (см. рис. 107, б) и с применением открытых калибров (см. рис. 107, в и г).

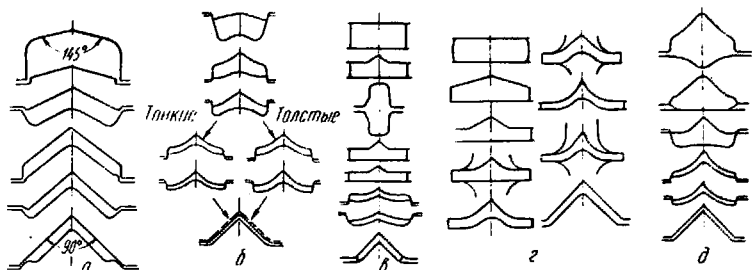


Рис. 107. Схема калибровки угловой стали:

а — с прямыми полками в закрытых калибрах; б — с развернутыми полками в закрытых калибрах; в — универсальная калибровка; г — открытые развернутые калибры (на непрерывных мелкосортных станах); д — диагональная калибровка

Достоинства и недостатки различных схем прокатки угловой стали подробно изложены в работах [75, 81, 87]. Ниже приведены две задачи по определению размеров угловых профилей для прокатки равнобокой $50 \times 50 \times 5 \div 6$ мм и неравнобокой $125 \times 80 \times 7 \div 8$ мм угловой стали.

Задача № 138. Определить основные параметры калибровки и размеры профильных калибров угловой стали $50 \times 50 \times 5 \div 6$ мм на стане 350. Схема расположения клеток и их характеристика приведены на рис. 108. Решить задачу по методу М. М. Штерна [81].

Производственные условия прокатки уголка $50 \times 50 \times 5 \div 6$ мм следующие. Получение уголка намечается в пяти профильных калибрах: клеток № 6, 8, 9, 10 и 12 (см. рис. 108). Клетки № 7 и 11 в прокатке не участвуют. Остальные клетки должны обеспечить получение заготовки размерами, необходимыми для задачи в первый профильный калибр. Скорость прокатки меняется от 1,5—3 м/сек в первых клетях стана, до 3—8 м/сек в клетях № 6—8 и до 8—11 м/сек в последних. Температура прокатываемых полос изменяется от 1150—1200 до 880—930° С. Валки клеток № 6—12

чугунные. При этих данных коэффициент трения принимают равным $f = 0,27 \div 0,38$. Остальные параметры определяются по номограммам (см. рис. 109, а, б).

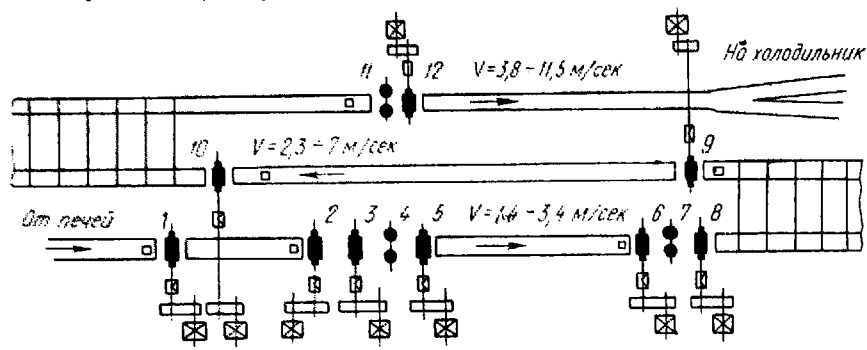


Рис. 108. Схема расположения и характеристика основного оборудования (1—12 — номера клеток) полу непрерывного стана 350 (к задаче 138)

Решение. 1. Расчетная толщина готового профиля

$$h_{\text{ср}} = \frac{h_1 + h_2}{2} = \frac{5 + 6}{2} = 5,5 \text{ мм.}$$

2. Размеры готового профиля в горячем состоянии и параметры, связанные с разворачиванием полок, находим следующим образом.

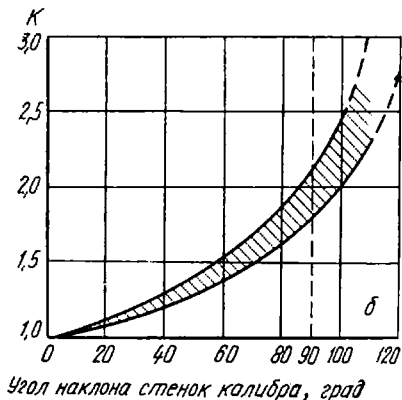
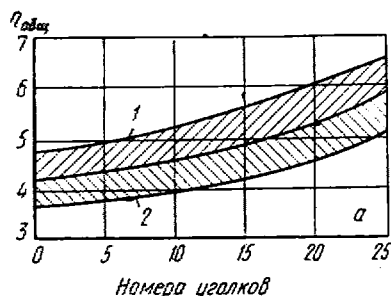


Рис. 109. Номограммы к расчету калибровки угловой стали:

а — зависимость необходимого общего коэффициента деформации от номера профиля (1 — спокойная сталь; 2 — кипящая сталь); б — зависимость коэффициента k от угла между полками (по данным М. М. Штернова)

Толщина полки угла

$$h_r = 1,013 \cdot 5,5 = 5,57 = 5,6 \text{ мм.}$$

Размеры полок в горячем состоянии

$$l_r = l_x \cdot 1,013 = 50 \cdot 1,013 = 50,65 \text{ мм.}$$

Высота условного чистового калибра (рис. 110, а)

$$H_1 = (0,4 \div 0,45) l_x = (0,4 \div 0,45) \cdot 50 = 22 \text{ мм.}$$

Радиус разворачивания полок (рис. 110, а)

$$R = (0,8 \div 0,9) l_x = (0,8 \div 0,9) \cdot 50 = 40 \text{ мм.}$$

Основание конструкционного треугольника (рис. 110, а)

$$C = H_1 = 22 \text{ мм.}$$

3. Высота полосы, задаваемой в шестую клеть:

$$h_{\text{заг}} = \eta_{\text{общ}} h_1 = 6,4,7 = 28 \text{ мм,}$$

где $\eta_{\text{общ}} = 4,7$ находят по графику (см. рис. 109, а).

С учетом принятой расчетной толщины полки уголка $h_1 = 5,5$ мм и высоты полосы, задаваемой в шестую клеть $h_{\text{заг}} = 28$ мм, общий коэффициент деформации

$$\eta_{\text{общ}} = \frac{h_{\text{заг}}}{h_1} = \frac{28}{5,5} = 5,1$$

или

$$\eta_{\text{общ}} = 5,1 = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5 = 1,13 \cdot 1,32 \cdot 1,46 \cdot 1,50 \cdot 1,55.$$

4. Определяем толщину полосы и обжатие в каждом калибре:

$$h_1 = 5,5 \text{ мм; } h_2 = h_1 \eta_1 = 5,5 \cdot 1,13 = 6,2 \text{ мм;}$$

$$h_3 = h_2 \eta_2 = 6,2 \cdot 1,32 = 8,2 \text{ мм}$$

и т. д. (табл. 54).

Линейные обжатия:

$$\Delta h_1 = h_2 - h_1 = 6,2 - 5,5 = 0,7 \text{ мм;}$$

$$\Delta h_2 = h_3 - h_2 = 8,2 - 6,2 = 2,0 \text{ мм}$$

и т. д. (табл. 54).

5. Определяем высоту второго калибра по средней линии

$$H'_2 = H_1 - \frac{H_1}{h_{\text{заг}} - h_1} \Delta h_1 = 22 - \frac{22}{28 - 5,5} \cdot 0,7 = 21,0 \text{ мм,}$$

где H_1 — высота условного чистового калибра;

$h_{\text{заг}}$ — толщина заготовки;

h_1 — толщина готового профиля.

Для третьего калибра

$$H'_3 = H_2 - \frac{H_1}{h_{\text{заг}} - h_1} \Delta h_2 = 21 - \frac{22}{28 - 5,5} \cdot 2,0 = 19,5 \text{ мм.}$$

Для четвертого калибра

$$H'_4 = H_3 - \frac{H_1}{h_{\text{заг}} - h_1} \Delta h_3 = 19,5 - \frac{22}{28 - 5,5} \cdot 3,9 = 16,0 \text{ мм}$$

и т. д.

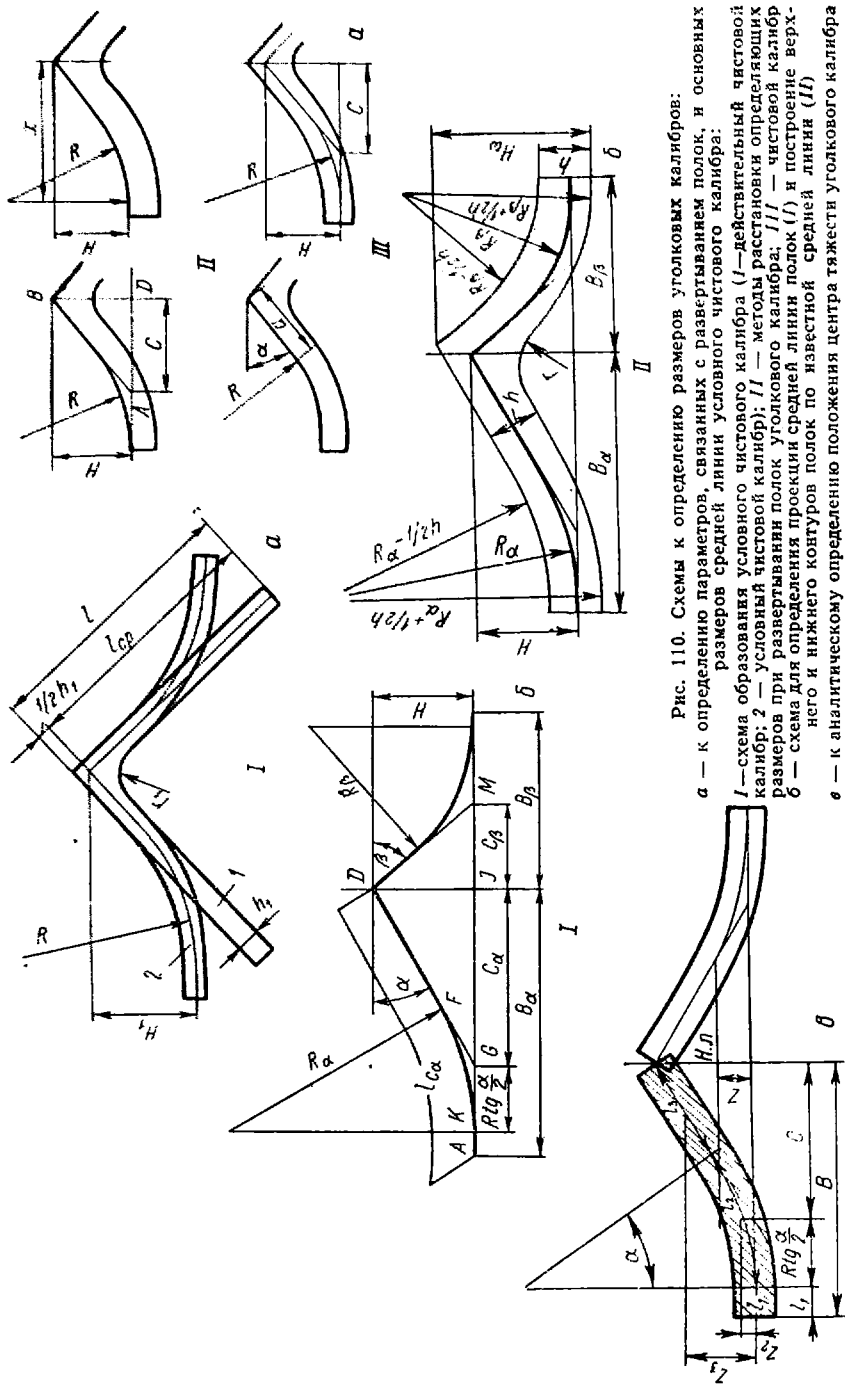


Рис. 110. Схемы к определению размеров уголкового калибра: а — к определению параметров, связанных с развертыванием полнок, и основных размеров средней линии условного чистового калибра: I — схема образования условного чистового калибра (J — действительный чистовой калибр; 2 — условный чистовой калибр); II — методы расстановки определяющих размеров при развертывании полнок уголкового калибра; III — чистовой калибр б — схема для определения проекции средней линии полнок (I) и построение верхнего и нижнего контуров полнок по известной средней линии (II) в — к аналитическому определению положения центра тажести уголкового калибра

Расчет калибровки для прокатки угловой стали
 $20 \times 50 \times 5 \div 6$ мм на стане 350 (см. рис. 110) [73, 81]

Параметры процесса	Номер калибра (номер клетки)				
	I (12)	II (10)	III (9)	IV (8)	V (6)
Коэффициент трения f	0,27	0,30	0,33	0,36	0,38
Коэффициент деформации η	1,13	1,32	1,46	1,50	1,55
Толщина профиля $h' = \eta h$	5,5	6,2	8,2	12,0	18,0
Обжатие $\Delta h = h_{n+1} - h_n$	0,7	2,0	3,8	6,0	10
Высота калибра по средней линии $H' = H_{n-1} - \frac{H_1}{h_{заг} - h_1} \Delta h_{n-1}$	—	21,0	19,5	16,0	11,0
Тангенс угла раскрытия полок $\operatorname{tg} \alpha = \frac{H_1}{C}$	1,000	0,9545	0,8864	0,7273	0,5000
Угол раскрытия полок α (рад)	45° 00 (0,785)	43° 41' (0,762)	41° 33' (0,725)	36° 01' (0,629)	26° 40' (0,465)
Уширение на гладкой бочке $\Delta b = 1,15 \frac{\Delta h}{2H} \times \left(\sqrt{R \Delta h} - \frac{\Delta h}{2f} \right)$	0,6	2,3	4,0	5,0	—
Коэффициент K , учитывающий увеличение уширения вследствие наличия угла между полками K (см. рис. 109, б)	2,0	1,9	1,8	1,6	1,3
Суммарное свободное уширение средних линий полок $\Delta b_{ср. л} = K \Delta b$	1,2	4,4	7,2	8,0	—

Параметры процесса	Номер калибра (номер клетки)				
	I (12)	II (10)	III (9)	IV (8)	V (6)
Стесненное уширение $\Delta b_{ст} = (0,5 - 0,65) \Delta b_{ср. л}$ (в чистовом калибре $\Delta b_{ст} = \Delta b_{ср. л}$)	1,2	2,6	4,2	4,7	—
Длина средней линии полки $l'_{ср. л} = l - 0,5h_1$ (I, рис. 110)	47,9	47,3	46,0	43,9	41,5
Проекция полки: $B = l_{ср} - C \times$ $\times (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} - 1) +$ $+ R \left(2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \right.$ $\left. - 0,01745\alpha_{град} \right),$ где $R = (0,8 \div 0,90) l_x$	—	40,6	39,9	39,6	39,3
Радиус закругления при стыке полок $r' = r\eta + \Delta h$	6,0	7,5	12,0	22,0	40,0
Радиус для верхней поверхности полка $R' = \left(R - \frac{1}{2} h \right)$	—	36,9	35,9	34,0	31,0
Радиус для нижней поверхности полка $R'' = \left(R + \frac{1}{2} h \right)$	—	43,1	44,1	46,0	49,0
Радиусы на концах полок	3,0	4,0	2,0	6,0	6,0
Длина дуги $l_2 = 0,01745R\alpha_{град}$	—	30,5	29,1	25,1	18,6

Параметры процесса	Номер калибра (номер клетки)				
	I (12)	II (10)	III (9)	IV (8)	V (6)
Ордината центра тяжести дуги $z_2 = R \left(1 - \frac{\sin \alpha}{0,01745\alpha} \right)$	—	3,7	3,4	2,6	1,4
Длина прямого отрезка $l_3 = l_{cp} + C + R \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - (B + l_2)$	—	14,3	14,2	14,2	14,2
Ордината центра тяжести прямого отрезка $z_3 = H - \frac{1}{2} l_3 \sin \alpha$	—	16,1	14,8	11,8	7,8
Ордината центра тяжести всего шаблона $z = \frac{l_2 z_2 + l_3 z_3}{l_{cp}}$	—	7,2	6,6	5,2	3,2

Примечания: 1. В формулах (3), (5), (12) и (14) обозначения со штрихом относятся к искомому, а без штриха — к предыдущему по ходу расчета калибра.

2. В формуле (17) следует учитывать правило Б. П. Бахтинова, а именно: а) в калибрах, имеющих разъем сверху, радиус предыдущего по ходу расчета калибра принимают $r' = r + \Delta h$; б) в калибрах, имеющих разъем снизу, радиус принимают равным или немного большим величины обжатия в предыдущем калибре, т. е. $r' \geq \Delta h$.

6. Рассчитываем угол раскрытия полок, считая против хода прокатки. Тангенс угла раскрытия полок

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H_1}{C} = \frac{22}{22} = 1,$$

угол раскрытия полок

$$\alpha_1 = \operatorname{arctg} \frac{H}{C} = \operatorname{arctg} 1; \quad \alpha_1 = 45^\circ;$$

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg} \frac{21}{22} = \operatorname{arctg} 0,9545; \quad \alpha_2 = 43^\circ 40'$$

и т. д. (см. табл. 54).

7. Уширение на гладкой бочке (h_0 — толщина задаваемой полосы) вычисляем по формуле Б. П. Бахтинова. В первом калибре

$$\Delta b_1 = \frac{\Delta h}{2h_3} \left(\sqrt{R\Delta h} - \frac{\Delta h}{2f} \right) = 1,15 \frac{0,7}{2 \cdot 6,2} \left(\sqrt{159 \cdot 0,7} - \frac{0,7}{2 \cdot 0,27} \right) = 0,6 \text{ мм.}$$

Результаты расчета калибровки валков для прокатки угловой стали $125 \times 80 \times 7 + 8$ мм на стане 500
(см. рис. 109, 112)

Параметры прокатки	Номер калибра (номер клетки)					
	1 (9)	2 (8)	3 (7)	4 (6)	5 (5)	6 (4)
Коэффициент трения f	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,45
Коэффициент деформации η	1,15	1,30	1,45	1,55	1,60	1,60
Толщина профиля $h' = \eta h$, мм	7,5	8,6	11,0	16,0	25,0	40,0
Обжатие Δh , мм	1,1	2,4	5,0	9,0	15,0	25,0
Высота калибра $H' = H_{n-1} - \frac{H_1}{h_{\text{заг}}} \Delta h$, мм	45,0	44,0	42,0	38,0	31,0	20,0
Тангенс угла раскрытия большой полки $\text{tg} \alpha = \frac{H}{C \alpha}$	0,640	0,6258	0,5973	0,5404	0,4409	0,2844
Угол раскрытия большой полки α	32° 37'	32° 02'	30° 51'	28° 23'	23° 48'	15° 53'
Тангенс угла раскрытия малой полки $\text{tg} \beta = \frac{H}{C \beta}$	1,562	1,528	1,458	1,319	1,076	0,6944
Угол раскрытия малой полки β	57° 23'	56° 48'	55° 34'	52° 51'	47° 06'	34° 47'

Параметры прокатки	Номер калибра (номер клетки)					
	1 (9)	2 (8)	3 (7)	4 (6)	5 (5)	6 (4)
Уширение на гладкой бошке $\Delta b = 1,15 \frac{\Delta h}{2H} \left(\sqrt{R \Delta h} - \frac{\Delta h}{2f} \right), \text{ мм}$	1,1	2,7	5,2	7,5	9,2	12,8
Коэффициент K , увеличения уширения из-за угла между полками (см. рис. 109, б)	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,3
Суммарное свободное уширение средних линий полков $\Delta b_{\text{ср. л}} = K \Delta b, \text{ мм}$	2,2	5,2	9,4	12,7	14,7	16,6
Степенное уширение $\Delta b_{\text{ст}} = (0,5 + 0,65) \Delta b_{\text{ср. л}}$ (в чистовом калибре $\Delta b_{\text{ст}} = \Delta b_{\text{ср. л}}$)	2,2	3,0	5,4	7,3	8,5	9,6
Уширение большой полки $\Delta b_{\alpha} = \frac{l_{\alpha}}{l_{\alpha} + l_{\beta}} \Delta b_{\text{ст}}$	1,3	1,8	3,3	4,5	5,2	5,8
Уширение малой полки $\Delta b_{\beta} = \frac{l_{\beta}}{l_{\alpha} + l_{\beta}} \Delta b_{\text{ст}}$	0,9	1,2	2,1	2,8	3,3	3,8

Параметры прокатки	Номер калибра (номер клетки)					
	1 (9)	2 (8)	3 (7)	4 (6)	5 (5)	6 (4)
<p>Длина средней линии большой полки (в чистовом калибре $l_{C\alpha} = l_{\alpha_{гор}} - 0,5h_1$)</p> <p>$l'_{C\alpha} = l_{C\alpha} - \Delta b_{\alpha}$, мм</p>	122,9	121,6	119,8	116,5	112,0	106,8
<p>Длина средней линии малой полки (в чистовом калибре $l_{C\beta} = l_{\beta_{гор}} - 0,5h_1$)</p> <p>$l'_{C\beta} = l_{C\beta} - \Delta b_{\beta}$, мм</p>	77,3	76,4	75,2	73,1	70,3	67,0
<p>Проекция большой полки</p> <p>$B_{\alpha} = l_{C\alpha} - C_{\alpha} (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} - 1) + R_{\alpha} \left(2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - 0,01745 \alpha^{\circ} \right)$, мм</p>	—	110,9	110,0	108,3	106,3	104,3
<p>Проекция малой полки</p> <p>$B_{\beta} = l_{C\beta} - C_{\beta} (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta} - 1) + R_{\beta} \left(2 \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} - 0,01745 \beta^{\circ} \right)$, мм</p>	—	58,0	58,1	58,5	59,8	61,9

Параметры прокатки	Номер калибра (номер клетки)					
	1 (9)	2 (8)	3 (7)	4 (6)	5 (5)	6 (4)
Радиус закругления при стыке полок $r' = r\eta + \Delta h$, мм	11,0	14,0	20,0	34,0	62,0	115,0
Радиусы на концах полок, мм	3,7	5,0	3,0	8,0	9,0	24,0
Радиус для верхней поверхности широкой полки $R' = \left(R_\alpha - \frac{1}{2} h \right)$, мм	—	125,7	124,5	122,0	117,5	110,0
Радиус для нижней поверхности широкой полки $R'' = \left(R_\alpha + \frac{1}{2} h \right)$, мм	—	134,3	135,5	138,0	142,5	150,0
Радиус для верхней поверхности узкой полки $R'_1 = \left(R_\beta - \frac{1}{2} h \right)$, мм	—	55,7	54,5	52,0	47,5	40
Радиус для нижней поверхности узкой полки $R''_1 = \left(R_\beta + \frac{1}{2} h \right)$, мм	—	64,3	65,5	68,0	72,5	80,0

Параметры прокатки	Номер калибра (номер клетки)					
	1 (9)	2 (8)	3 (7)	4 (6)	5 (5)	6 (4)
Длина дуги $l_3 = 0,01745R_\alpha \cdot \alpha_{\text{град}}, \text{ мм}$	—	72,7	70,0	64,4	54,0	36,0
Ордината центра тяжести дуги $z_3 = R_\alpha \left(1 - \frac{\sin \alpha}{0,01745 \alpha_{\text{град}}} \right), \text{ мм}$	—	6,6	6,2	5,2	3,7	1,6
Длина прямого отрезка $l_3 = l_{\text{ср}} + C_\alpha + R_\alpha \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - (R_\alpha + l_2), \text{ мм}$	—	45,6	46,0	47,0	49,4	54,9
Ордината центра тяжести прямого отрезка $z_3 = H - \frac{1}{2} l_3 \sin \alpha, \text{ мм}$	—	31,9	30,2	26,8	21,0	12,5
Ордината центра тяжести широкой полки $z_\alpha = \frac{l_2 z_2 + l_3 z_3}{l_{C_\alpha}}, \text{ мм}$	—	15,8	15,1	13,5	10,9	6,8
Узкая полка: Длина дуги $l_2 = 0,01745R_\beta \beta_{\text{град}}, \text{ мм}$	—	59,5	58,2	55,3	49,3	36,4

Параметры прокатки	Номер калибра (номер клетки)					
	1 (9)	2 (8)	3 (7)	4 (6)	5 (5)	6 (4)
Ордината центра тяжести дуги $z_2 = R_\beta \left(1 - \frac{\sin \beta}{0,01745\beta} \right), \text{ мм}$	—	9,3	9,0	8,1	6,5	3,6
Длина прямого отрезка $l_3 = l_{cp} + C_\beta + R_\beta \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} - (B_\beta + l_2), \text{ мм}$	—	20,2	19,3	17,9	16,1	16,3
Ордината центра тяжести прямого отрезка $z_3 = H - \frac{1}{2} l_3 \sin \beta, \text{ мм}$	—	35,6	34,0	31,0	25,1	15,4
Ордината центра тяжести узкой полки $z_\beta = \frac{l_2 z_2 + l_3 z_3}{l_{C\beta}}, \text{ мм}$	—	16,5	15,5	13,5	10,1	5,5
Ордината центра тяжести шаблона $z = \frac{l_{C\alpha} z_\alpha + l_{C\beta} z_\beta}{l_{C\alpha} + l_{C\beta}}, \text{ мм}$	—	16,0	15,0	13,5	10,5	6,5

Примечание. Обозначения со штрихом относятся к искомому, а без штриха — к предыдущему по ходу расчета калибра.

Уширение в остальных калибрах, подсчитанное этим же методом, дано в табл. 54.

В чистовом калибре уширение фактически не стесненное, поэтому из этого калибра справедлива полученная ранее величина.

8. Определение длины средней линии полки:
в чистовом калибре

$$l_{\text{ср1}} = l_{\text{гор}} - \frac{1}{2} h_1 = 50,65 - 1/2 \cdot 5,5 = 47,9 \text{ мм};$$

во втором калибре

$$l_{\text{ср2}} = l_{\text{ср}} - 0,5 \Delta b_{\text{ст}} = 47,9 - 0,5 \cdot 1,2 = 47,3 \text{ мм};$$

в третьем калибре

$$l_{\text{ср3}} = l'_{\text{ср}} - 0,5 \Delta b_{\text{ст}} = 47,3 - 0,5 \cdot 2,6 = 46,0 \text{ мм}$$

и т. д. (см. табл. 55).

Расчет остальных параметров прокатки приведен в табл. 55.

Положение центра тяжести готового профиля указано в ГОСТ 8509—57. Центры тяжести остальных шаблонов находят по формулам, приведенным в табл. 54 (см. рис. 110, в, д).

Чертежи шаблонов для нарезки валков, на которых прокатывают угловую сталь $50 \times 50 \times 5 \div 6$ мм, приведены на рис. 111. Расчетные данные приведены в табл. 54.

Неравнобокая угловая сталь (ГОСТ 8510—57)

В табл. 55 приведен расчет калибровки угловой стали $125 \times 80 \times 7 \div 8$ мм для стана 500 по формулам, выведенным в работе М. М. Штернова.

Задача № 139. Рассчитать размеры профилировочных калибров для прокатки угловой стали $125 \times 80 \times 7 \div 8$ мм на крупносортом стане 500. Схема расположения клетей и их характеристика приведены на рис. 112, а чертежи шаблонов на рис. 113.

Расчет производим по методу М. М. Штернова [81]. При решении задачи используем графики, которые рассматривались при решении задачи № 138. Методика расчета аналогична методике расчета, примененной в предыдущей задаче.

Решение. Размеры профиля в горячем состоянии и параметры, связанные с разворачиванием полок (см. рис. 110, а), определяем по известным формулам:

$$h_1 = \frac{7+8}{2} = 7,5 \text{ мм}; \quad l_{\alpha_r} = 1,013 l_{\alpha_x} =$$

$$= 1,013 \cdot 125 = 126,6 \text{ мм};$$

$$l_{\beta_r} = 1,013 l_{\beta_x} = 1,013 \cdot 80 = 81,0 \text{ мм};$$

$$H_1 = (0,4 \div 0,45) \frac{l_{\alpha} + l_{\beta}}{2} = (0,4 \div 0,45) \frac{125 + 80}{2} = 45 \text{ мм};$$

$$R_{\alpha} = (1,0 \div 1,1) l_{\alpha} = (1,0 \div 1,1) \cdot 125 = 130 \text{ мм};$$

$$R_{\beta} = (0,7 \div 0,8) l_{\beta} = (0,7 \div 0,8) \cdot 80 = 60 \text{ мм};$$

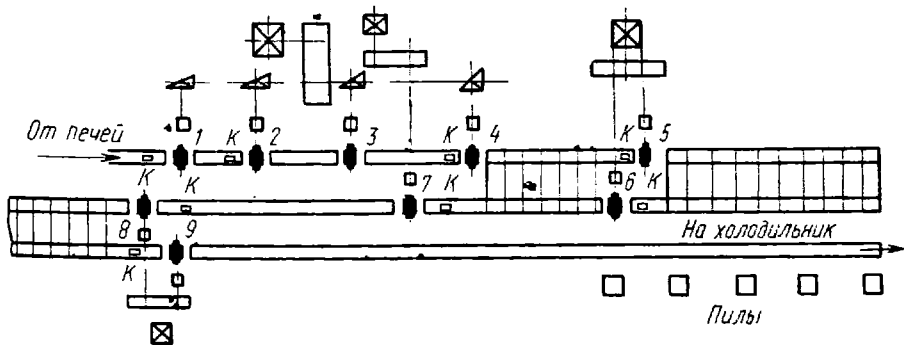
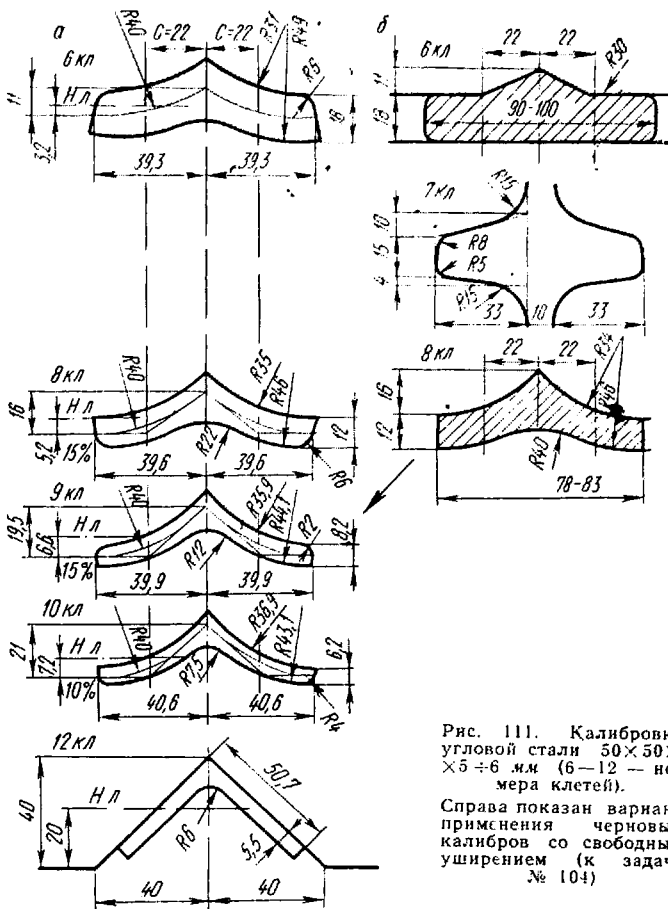


Рис. 112. Схема расположения и характеристика основного оборудования крупносортового стана 500:

1—9 — номера клетей; 10 — пилы; К — кантовальная втулка

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{I_\beta}{I_\alpha} = \frac{80}{125} = 0,640; \quad \operatorname{tg} \beta_1 = \frac{125}{80} = 1,5625;$$

$$C_\alpha = \frac{H_1}{\operatorname{tg} \alpha_1} = \frac{45}{0,640} = 70,31 \text{ мм} = \text{const};$$

$$C_\beta = \frac{H_1}{\operatorname{tg} \beta_1} = \frac{45}{1,5625} = 28,8 \text{ мм} = \text{const}.$$

По данным М. М. Штернова, с увеличением числа профильных калибров общий коэффициент деформации и толщину заготовки

можно выбрать несколько большими, чем значения этих параметров, приведенные на графике (рис. 109, а).

В данном случае принимаем общий коэффициент деформации $\eta_{\text{общ}} = 8,64$, который распределен по шести калибрам, считая против хода прокатки (см. рис. 113) следующим образом:

$$\eta_{\text{общ}} = 8,64 = 1,15 \cdot 1,30 \times \\ \times 1,45 \cdot 1,55 \cdot 1,60 \cdot 1,60.$$

Тогда толщина заготовки, задаваемой в первый профильный калибр:

$$h_{\text{заг}} = \eta_{\text{общ}} h_1 = 7,5 \cdot 8,64 = \\ = 64,7 = 65 \text{ мм}.$$

Н. В. Литовченко толщину заготовки $h_{\text{заг}}$ для прокатки в первом профильном калибре получил равной 52 мм, приняв для неравнобокой стали размеры $125 \times 80 \times 80$ мм меньшие коэффициенты деформации:

$$\eta_{\text{общ}} = 6,5 = 1,15 \cdot 1,25 \times \\ \times 1,35 \cdot 1,45 \cdot 1,55 \cdot 1,60.$$

Тогда

$$h_{\text{заг}} = 6,5 \cdot 8 = 52 \text{ мм}.$$

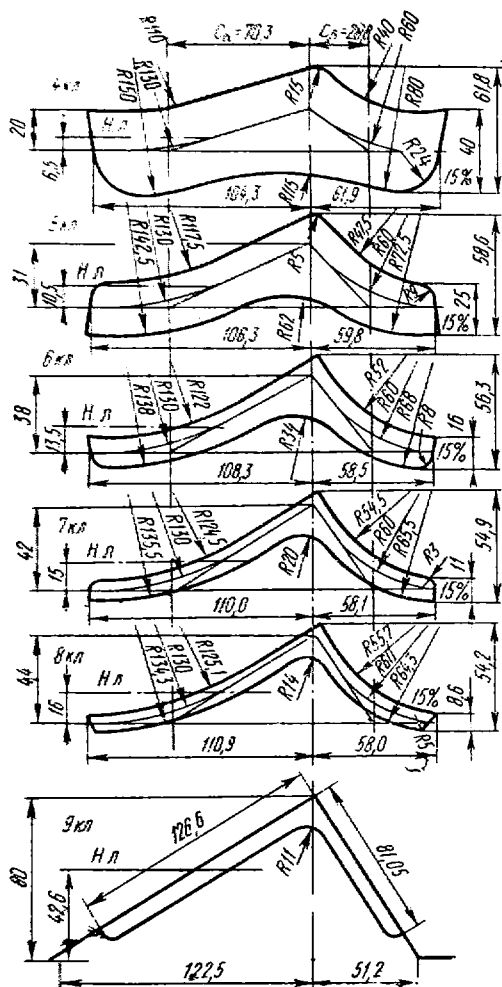


Рис. 113. Калибровка угловой стали $125 \times 80 \times 80$ мм (к задаче № 105)

Кроме расчета калибровки угловой стали по методу М. М. Штернова, имеются и другие методы расчета, среди которых наиболее известны методы Б. П. Бахтинова, Н. В. Литовченко, Б. В. Мерекина, А. К. Кноблоха, И. И. Кучко [7, 73, 59].

Калибровка двутавровой балки

Типовые схемы прокатки двутавровых балок приведены на рис. 114.

Следует обратить особое внимание на следующие особенности деформации балки при прокатке:

1. При прокатке балок в каждом проходе, особенно в первых, имеет место неравномерная деформация отдельных частей профиля.

2. Скорости валков отдельных частей калибра различны.

3. Захват валками стенки и фланцев происходит не одновременно.

4. В открытых фланцах высота профиля увеличивается, в закрытых — уменьшается, что принято называть утяжкой металла.

5. Прокатка балок сопровождается боковыми обжатиями металла.

6. В балочном калибре скоростные и силовые условия по его периметру различны.

Трудность формирования профиля из прямоугольной заготовки, неравномерная деформация металла по сечению, различие в окружных скоростях элементов профиля, а также различный характер деформации металла в открытых и закрытых фланцах калибра — все это, по мнению И. И. Кучко [78], при разработке калибровки вызывает необходимость принимать различные коэффициенты обжатий для отдельных элементов калибра.

Равенство коэффициентов обжатий И. И. Кучко принимает только в отделочном калибре, где величина деформации металла во всех элементах весьма незначительная и где из-за вертикальной обработки в закрытом фланце имеется возможность смещать металл даже больше, чем в открытом фланце.

Как показала практика, в хорошо работающих калибровках коэффициент обжатия открытого фланца во всех калибрах K_o , за исключением первых черновых, может быть связан с коэф-

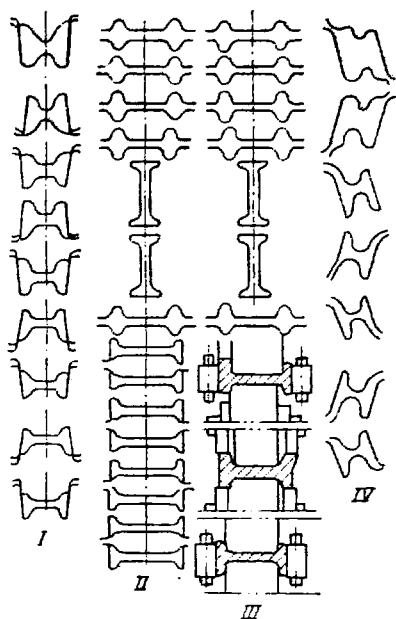


Рис. 114. Типовые схемы I—IV прокатки балок

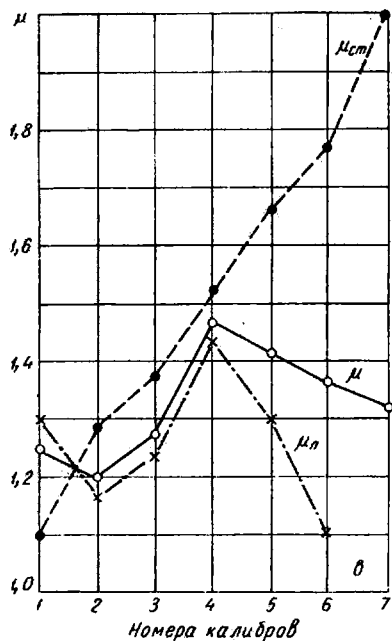
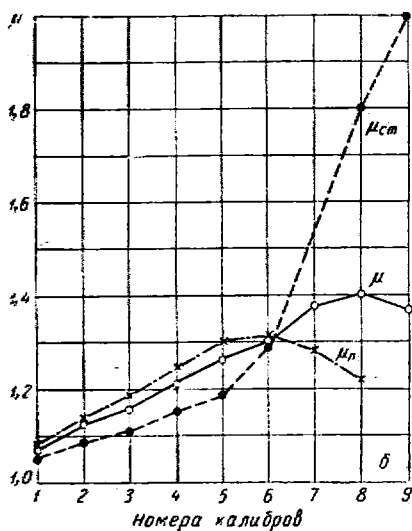
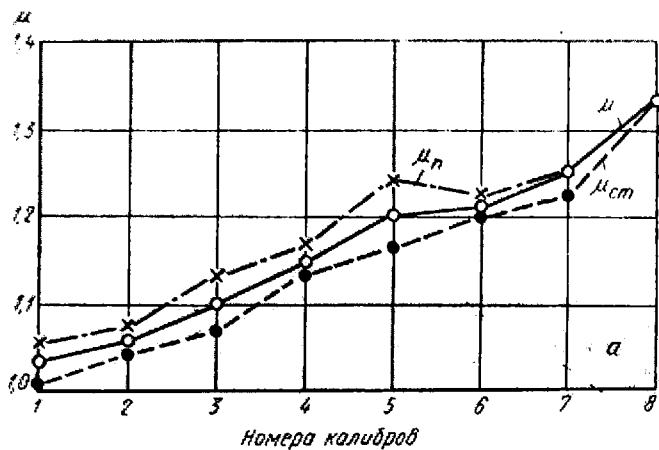


Рис. 115. Изменение коэффициентов вытяжки в калибрах:
 а — балка № 55, стан 750; б — балка № 20, стан 500; в — балка № 10, стан 550

Т а б л и ц а 56
Общие коэффициенты вытяжки и обжатия по элементам двугранных балок различных номеров

Но- мера ка- лavra	№ 18			№ 20			№ 22			№ 24		
	$k_{ст}$	$k_{з, фл}$	$k_{о, фл}$	$k_{ст}$	$k_{з, фл}$	$k_{фл}$	$k_{ст}$	$k_{з, фл}$	$k_{о, фл}$	$k_{ст}$	$k_{з, фл}$	$k_{о, фл}$
1	1,67	1,0	1,18	1,67	1,0	1,345	1,34	1,02	1,405	1,48	1,035	1,29
2	1,64	1,04	1,44	1,58	1,017	1,55	1,50	1,022	1,61	1,45	1,065	1,47
3	1,57	1,035	1,605	1,54	1,026	1,53	1,465	1,035	1,56	1,427	1,065	1,48
4	1,49	1,03	1,55	1,475	1,023	1,50	1,41	1,015	1,51	1,40	1,062	1,44
5	1,37	1,025	1,45	1,38	1,017	1,46	1,34	1,007	1,43	1,335	1,035	1,42
6	1,28	1,017	1,36	1,283	1,012	1,38	1,265	0,99	1,345	1,23	1,03	1,35
7	1,20	1,02	1,28	1,19	1,0	1,28	1,20	0,99	1,27	1,16	1,01	1,29
8	1,155	0,98	1,20	1,145	0,98	1,22	1,15	0,98	1,21	1,13	0,98	1,19
9	1,10	0,97	1,155	1,105	0,97	1,15	1,11	0,98	1,15	1,085	0,95	1,12
10	1,075	0,96	1,10	1,070	0,96	1,105	1,065	0,96	1,10	1,060	0,94	1,09

Примечание. $k_{ст}$ — коэффициент обжатия стенок; $k_{з, фл}$ — коэффициент обжатия закрытого фланца; $k_{о, фл}$ — коэффициент обжатия открытого фланца.

коэффициентом обжатия стенки $K_{ст}$ следующим простым соотношением:

$$\frac{K_0}{K_{ст}} = 1,04 \div 1,10,$$

где предельные значения соответствуют наименьшему и наибольшему размерам профиля. Для первых двух-трех черновых проходов $K_0/K_{ст} \leq 1,0$.

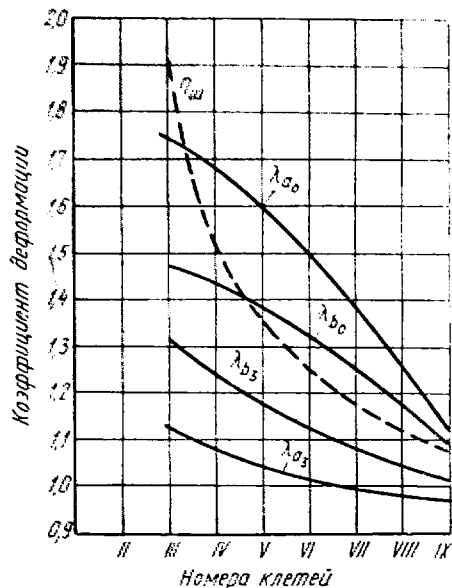


Рис. 116. Определение соотношения коэффициентов деформации в элементах калибра для различных проходов (по методу М. М. Штернова)

балок применяют режим обжатий, приведенный на рис. 115, в.

График для определения коэффициентов деформации в элементах калибра двутавровой балки по данным М. М. Штернова приведен на рис. 116.

Среди специалистов-калибровщиков нет единого мнения по вопросу распределения обжатий по элементам двутавровой балки. Поэтому на практике при проектировании калибровок основываются главным образом на опытных данных, а при расчетах пользуются эмпирическими зависимостями.

Методика калибровки валков

Перечисленные особенности прокатки балок при калибровке валков требуют выполнения следующих правил:

1. При построении калибров необходимо чередовать открытые и закрытые фланцы, что позволяет получать в готовом профиле одинаковые фланцы. В первых проходах, считая от заготовки,

По данным П. И. Полухина [2], на практике осуществляют более дифференцированный подход к распределению обжатий по элементам профиля. Для крупных балок с массивной стенкой профиля (площадь сечения $>50\%$ от всей площади профиля) применяют режим обжатий, указанный на рис. 115, а. Для средних балок, прокатываемых от начала до конца в закрытых балочных калибрах, обычно применяют иной режим обжатий (рис. 115, б). При прокатке средних и малых ба-

это правило не соблюдается. В этом случае нижние и верхние фланцы следует оставлять открытыми. При применении закрытых калибров, когда сечение профиля достаточно велико, допускается несколько проходов в одном калибре или подряд в двух-трех калибрах без чередования фланцев.

2. Боковое обжатие распределяют таким образом, чтобы в закрытых ручьях у основания фланцев оно было больше, а у края — меньше, а в открытых ручьях — наоборот — у основания фланцев обжатие делают меньшим, а у края — большим.

3. Чем больше боковое обжатие, тем больше приращение высоты открытых фланцев.

4. Боковое обжатие возрастает с увеличением уклона внутренних граней фланцев, поэтому угол уклона внутренних граней увеличивают примерно с 10° в чистовом и предчистовом калибрах до $35-40^\circ$ (по данным П. И. Полухина — до $22-35^\circ$) в черновых разрезных калибрах [2].

5. Для возможности переточек и свободного выхода металла из валков наружные стенки калибров делают с уклоном. Уклон или выпуск принимают равным $5-8\%$ ($3-4^\circ$) в черновых калибрах, $1,5-2\%$ ($1-1,5^\circ$) — в предчистовом и до $1,25\%$ — в чистовом.

6. При прокатке крупных балок, где стенка занимает значительную часть площади профиля, во всех калибрах, начиная от чистового, коэффициенты вытяжки стенки применяют меньше, чем коэффициенты вытяжки фланцев. При прокатке небольших балок, когда действие стенки на фланцы значительно меньше, в черновых калибрах обжатие стенки превышает обжатие фланцев, однако в чистовом и предчистовых калибрах вытяжка стенки должна быть меньше вытяжки фланцев.

7. Разность в ширине калибров равна естественному уширению металла, которое принимают равным от $0,5-3$ мм в чистовых и до $7-10$ мм в черновых калибрах.

Для определения уширения в балочных калибрах пользуются эмпирической формулой

$$\Delta b = 0,01B_{\text{чист}} + (n - 1), \quad (26-V)$$

где Δb — уширение в данном калибре;

$B_{\text{чист}}$ — ширина чистового калибра;

n — порядковый номер калибра, считая от чистового.

8. При построении балочных калибров радиусы закруглений выбирают в зависимости от толщины прилегающей части профиля (рис. 117).

Н. В. Литовченко [7], пользуясь данными Б. П. Бахтинова и М. М. Штернова [59], для определения наружных и внутренних радиусов закруглений предлагает ряд формул:

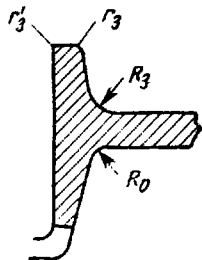


Рис. 117. К определению радиусов закруглений

наружные для первых четырех—шести калибров

$$R_0 = C_0^b b_0, \quad R_3 = C_3^b b_3; \quad (27-V)$$

наружные для черновых калибров

$$\left. \begin{aligned} R_0 &= (0,8 \div 0,9) C_0^b b_0; \\ R_3 &= (0,8 \div 0,9) C_3^b \cdot b_3; \end{aligned} \right\} \quad (28-V)$$

внутренние для всех калибров

$$r_0 = C_0^a a_0; \quad r_3 = C_3^a a_3,$$

где

$$C_0^b = C_3^b = \frac{R_{\text{числ}}}{b_{\text{числ}}};$$

$$C_3^a = C_0^a = \frac{r_{\text{числ}}}{a_{\text{числ}}}.$$

Радиус закругления закрытого фланца r' принимают, исходя из конструктивных соображений в пределах 1—5 мм, чтобы исключить концентрацию напряжений в этой части калибра. Обозначения, принятые в последних трех формулах, указаны на рис. 118. При анализе действующих калибров деформацию отдельных элементов можно легко определить, если сложный балочный профиль заменить простейшим (рис. 119).

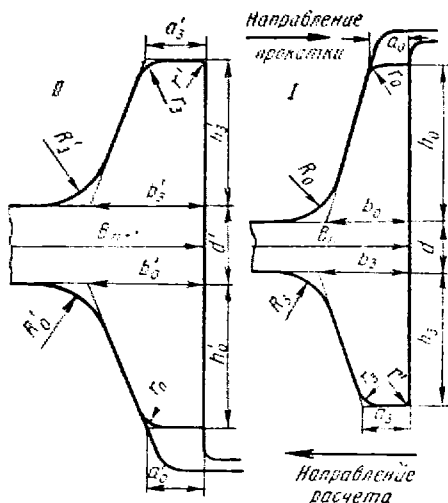


Рис. 118. Построение калибров и обозначение элементов при расчете калибровки по коэффициентам деформации

9. Первый по ходу прокатки разрезной калибр может быть закрытым или открытым.

В разрезном калибре делают несколько проходов. В зависимости от ширины балок угол гребней принимают равным 45—70°, причем более острый угол предусматривают со стороны открытой части калибра.

Тупые грани вызывают значительную утяжку, поэтому их применяют только при прокатке крупных балок. Разрезные калибры при этом делают открытыми. При прокатке в закрытом разрезном калибре профиль имеет толстые фланцы и узкую стенку. Для получения требуемого профиля, ввиду ограничения бокового обжатия фланцев, необходимо применять большое число проходов. Открытые балочные калибры не требуют большого увеличения диаметра валков.

Тупые грани вызывают значительную утяжку, поэтому их применяют только при прокатке крупных балок. Разрезные калибры при этом делают открытыми. При прокатке в закрытом разрезном калибре профиль имеет толстые фланцы и узкую стенку. Для получения требуемого профиля, ввиду ограничения бокового обжатия фланцев, необходимо применять большое число проходов. Открытые балочные калибры не требуют большого увеличения диаметра валков.

Открытые разрезные калибры проектируют с большим (до 25%) уклоном наружных и внутренних стенок ручья.

Высота заготовки для прокатки балок обычно в 2—2,5 раза больше высоты фланцев конечного профиля. Ширину заготовки определяют по ширине разрезного калибра и принимают равной или несколько меньшей минимальной ширины разрезного калибра.

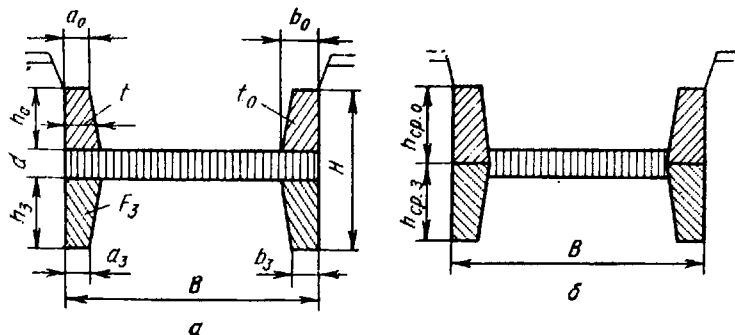


Рис. 119. Обозначение размеров двутавровой балки и способы деления балки на элементы

Выбор диаметра валков и числа проходов при прокатке двутавровых балок производится по графику, предложенному А. П. Чекмаревым (рис. 120), а также по данным, приведенным в табл. 57.

Особые случаи калибровки валков для прокатки тонкостенных двутавровых балок, балок с параллельными полками, а также валков с косорасположенными калибрами рассмотрены в работах Н. В. Литовченко [7] и П. И. Полухина [2].

При разработке калибровки валков для прокатки двутавровых балок в косорасположенных калибрах (см. рис. 114, IV) необходимо учитывать следующие положения:

1) для прокатки балок и других фланцевых профилей целесообразно с точки зрения сокращения удельного расхода энергии, уменьшения давления металла на валки и изменения условий службы валков применять калибры с диагональной системой разъемов;

2) в калибрах с диагональной системой разъемов возникают осевые усилия, для восприятия которых необходимо предусматривать на валках упорные бурты;

3) увеличение угла наклона калибра и обжатия шейки резко снижают осевые усилия;

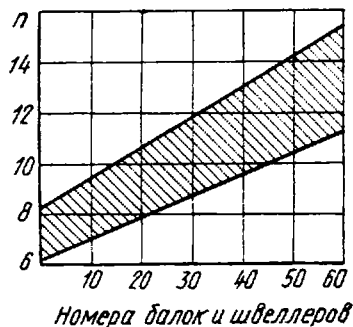


Рис. 120. Определение числа фасонных калибров n (по данным А. П. Чекмарева)

Зависимость числа проходов в фасонных калибрах от номера профиля

Номер профиля	Диаметр валков, мм	Число проходов в фасонных калибрах	Номер профиля	Диаметр валков, мм	Число проходов в фасонных калибрах
10—12	350—500	6—8	18—27	500—950	8—11
12—18	400—650	7—9	24—60	600—950	10—15

4) с ростом угла наклона калибра увеличивается утяжка закрытого и приращение открытого фланцев;

5) с увеличением угла наклона калибра наблюдается скручивание профиля при увеличении угла закручивания полосы;

6) по мере увеличения угла наклона косорасположенных калибров приращение открытых и утяжка закрытых фланцев возрастают.

Косое расположение калибров может найти применение при освоении прокатки облегченных и тонкостенных балок.

Известно значительное число методов калибровки валков. Все они достаточно подробно рассмотрены П. И. Полухиным. Ниже рассмотрен только метод А. П. Чекмарева, отличающийся от многих других своей простотой, а также давший положительные результаты на практике [73].

Рассчитаем в общем виде по этому методу калибровку валков для прокатки двутавровой балки, если задан номер балки и ее размеры в холодном состоянии, соответствующие ГОСТ 8239—56 с изменениями, внесенными в 1959 г. Тангенс угла наклона внутренней поверхности $\operatorname{tg} \varphi \leq \frac{1}{12} = 0,0833$, или $\varphi \leq 4^\circ 45'$.

Заданы диаметр валков и схема расположения оборудования. Требуется определить размеры калибров для прокатки заданного профиля. Условные обозначения элементов калибра приведены на рис. 117 и 118.

Расчет ведем против хода прокатки в следующем порядке:

1. Определяем число фасонных калибров для прокатки балки по графику рис. 120.

2. Находим горячие размеры профиля (с частичным использованием отрицательных допусков).

3. Рассчитываем производные размеры чистового профиля, необходимые для дальнейших расчетов (условные обозначения см. рис. 119).

Высота фланца

$$h_n = \frac{H_n - d_n}{2}.$$

Большое основание фланца

$$b_n = t_n + \frac{h_{\text{фл}}}{2} \operatorname{tg} \varphi_n.$$

Малое основание фланца

$$a_n = 2t_n - b_n.$$

Площадь поперечного сечения фланца

$$F_{\text{нфл}} = t_n h_n.$$

Площадь поперечного сечения чистового калибра

$$F_n = 4F_{\text{нфл}} + B_n d_n.$$

4. Определяем отношение оснований фланца

$$a_n/b_n.$$

По номограмме, приведенной на рис. 121, предварительно определяем уширения для разрезного калибра Δb_p , для остальных калибров $\sum \Delta b_{n-1}$ и общее уширение $\sum \Delta b$.

5. Тогда ширина заготовки

$$B_0 = B_n - \sum \Delta b,$$

где индексом n обозначен размер чистового профиля.

Ширина разрезного калибра

$$(B')_p = B_0 - \Delta b_p.$$

6. Общее уширение (кроме разрезного калибра)

$$\sum \Delta b = B_n - (B')_p.$$

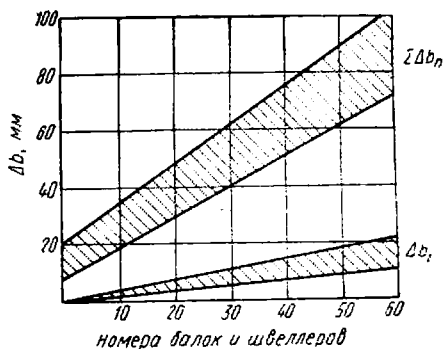


Рис. 121. Определение уширения при прокатке балок и швеллеров (по данным А. П. Чекумарева)

Общее уширение $\sum \Delta b$ распределяем по калибрам (кроме разрезного) в соответствии с относительным приращением длины фланца ($\mu_{\text{фл}} - 1$), т. е.

$$\Delta b = m (\mu_{\text{фл}} - 1),$$

где

$$m = \frac{\sum \Delta b}{\sum (\mu_{\text{фл}} - 1)};$$

$\mu_{\text{фл}}$ — принимаем по табл. 56, или по номограммам рис. 115 и 116.

Задача № 140. Допустим, имеется ряд коэффициентов вытяжек фланцев: $\mu_{\text{фл}1} = 1,46$; $\mu_{\text{фл}2} = 1,50$; $\mu_{\text{фл}3} = 1,50$; $\mu_{\text{фл}4} = 1,5$; $\mu_{\text{фл}5} = 1,48$; $\mu_{\text{фл}6} = 1,40$; $\mu_{\text{фл}7} = 1,25$; $\mu_{\text{фл}8} = 1,12$. Тогда

$$\sum \mu_{\text{фл}} - 1 = 0,46 + 0,5 + 0,5 + 0,5 + 0,48 + 0,4 + 0,25 + 0,12 = 3,21.$$

По номограмме на рис. 121 находим, что $\sum \Delta b = 40$ мм. Тогда

$$\frac{\sum \Delta b}{\sum (\mu_{\text{фл}} - 1)} = \frac{40}{3,21} = 12,46.$$

Откуда для второго калибра

$$\Delta b_2 = t (\mu_{\text{фл}} - 1) = 12,46 \cdot 0,5 = 6,23 \text{ мм и т. д.}$$

После этого составляем таблицу.

7. Определяем высоту фланцев во всех балочных калибрах в зависимости от номера балок или швеллеров и утяжки фланцев (табл. 58).

Составляем таблицу данных расчета высоты фланцев в балочных калибрах с учетом утяжки.

8. Затем определяем размеры разрезного калибра (рис. 122 и 123) по следующим формулам.

Т а б л и ц а 58

Зависимость утяжки фланцев от номера балки или швеллера

Номер балки или швеллера	Утяжка, мм	
	закрытого фланца	открытого фланца
10—18	5	0,5
20—30	6	1,0
32—60	7	1,5

Размер большого основания открытого фланца¹

$$b_{o.p} = 0,5 (B')_p.$$

Размер малого основания того же фланца

$$a_{o.p} = \frac{a_n}{b_n} (B')_p.$$

Площадь открытого фланца

$$F_{o. \text{фл. п}} = \frac{a_{o.p} + b_{o.p}}{2} (h_1)_{o.p}.$$

Уклон разрезающего гребня для открытого фланца

$$\text{tg } \alpha_p = \frac{b_{o.p} - a_{o.p}}{(k_1)_{o.p}}.$$

Конструкционные точки²: абсцисса

$$l = \frac{b_{o.p} \text{ tg } \alpha_n - \text{tg } \alpha_p b_n}{\text{tg } \alpha_p - \text{tg } \varphi_n};$$

ордината

$$C = \frac{l + b_{o.p}}{\text{tg } \alpha_p}.$$

¹ Буквы с индексом n относятся к чистовому профилю.

² См. рис. 123: φ_n — угол чистового калибра.

Площадь закрытого фланца разрезного калибра

$$F_{з. \text{ фл. п}} = \frac{a_{з. п} + b_{з. п}}{2} (h_1)_{з. п.}$$

Проверка:

$$C = \frac{l + b_n}{\text{tg } \varphi_n}.$$

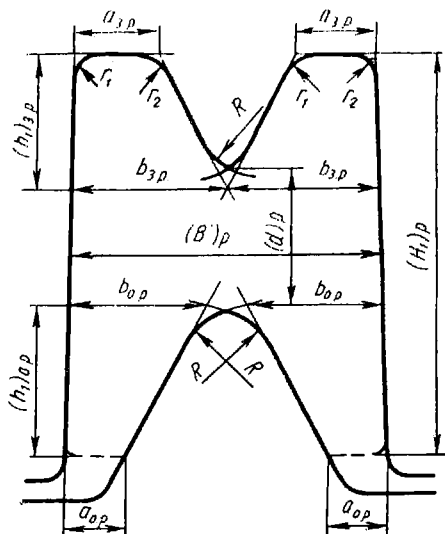


Рис. 122. Определение общей высоты разрезного калибра с учетом закруглений гребней

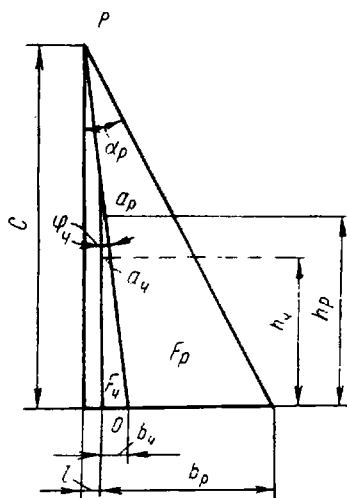


Рис. 123. Наложение фланцев чистового и разрезного калибров

Средняя толщина открытого фланца

$$t_{о. \text{ фл. п}} = \frac{F_{о. \text{ фл. п}}}{(h_1)_{о. \text{ фл. п}}}.$$

Средняя толщина закрытого фланца

$$t_{з. \text{ фл. п}} = \frac{F_{з. \text{ фл. п}}}{(h_1)_{з. \text{ фл. п}}}.$$

Уклон разрезающего гребня

$$\text{tg } \alpha_p = \frac{t_{з. \text{ фл. п}} + l}{C - 0,5 (h_1)_{о. п.}}$$

Большое основание закрытого фланца

$$b_{з. п} = C \text{ tg } \alpha_p - l.$$

Малое основание закрытого фланца

$$a_{о. п} = 2d_p - b_{о. п.}$$

Толщина разрезного калибра (см. рис. 122) с учетом закруглений (по данным А. П. Чекмарева, $k = 0,8 \div 1,0$)

$$d_p = \frac{2d_n F_{\text{о. фл. р}}}{k (2F_{\text{ф. н}} + 0,5d_n \sum \Delta b_{n-1} (1-k) d_n b_{\text{о. фл. р}})}$$

Общая высота разрезного калибра

$$(H_1)_p = (h_1)_{\text{о. р}} + (h_1)_{\text{з. р}} + (d)_p$$

Площадь разрезного калибра

$$F_p = 4F_{\text{фл. р}} + (B')_p d_p$$

9. Определяем размеры исходной заготовки. Высоту заготовки по данным Н. В. Литовченко [7] рекомендуется определять по формуле М. С. Мутьева:

$$H_0 = \left(0,65 + 0,35 \frac{B_0 H_p}{F_p} \right) H_p$$

где H_0 — высота заготовки;

B_0 — ширина заготовки;

H_p — высота разрезного калибра;

F_p — площадь поперечного сечения разрезного калибра.

Для расчетов также рекомендуется применять формулу А. П. Чекмарева:

$$H_0 = \frac{H_p^2 B_0}{F_p}$$

Менее приемлемой для практических расчетов является формула Б. П. Бахтинова, учитывающая форму разрезных гребней калибра:

для калибров с острыми гребнями

$$H_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{F_p}{B_{\text{ср}}} + H_p$$

где

$$B_{\text{ср}} = \frac{B_0 + B_p}{2};$$

для калибров со значительным притуплением гребней

$$H_0 = \frac{\left(2 + \frac{B_p - 2b}{B_p - 2a} \right) F_p}{3B_{\text{ср}}} + H_p$$

где a и b — толщины фланца разрезного калибра на конце и у основания.

В случае несимметричных калибров величины a и b определяют как среднее арифметическое между размерами верхних и нижних фланцев:

$$a = \frac{a_{\text{в}} + a_{\text{н}}}{2}; \quad b = \frac{b_{\text{в}} + b_{\text{н}}}{2}$$

Расчет промежуточных фасонных калибров

1. Общий коэффициент вытяжки в промежуточных калибрах

$$\mu_{\text{общ}} = \frac{F_p}{F_{\text{чист}}}$$

2. Общий коэффициент вытяжки по проходам

$$\mu_{\text{общ}} = \mu_1 \mu_2 \dots \mu_{n-1} \mu_n$$

3. Общий коэффициент вытяжки фланцев

$$\mu_{\text{общ. фл}} = \frac{F_{\text{о.фл. р}}}{F_{\text{чист. фл}}}$$

4. Поправочный коэффициент

$$m = \sqrt[n-1]{\frac{\mu_{\text{общ. фл}}}{\mu_{\text{общ}}}}$$

5. Коэффициент вытяжки фланцев в калибрах

$$\mu_{\text{фл2}} = m\mu_2; \mu_{\text{фл3}} = m\mu_3; \mu_{\text{фл4}} = m\mu_4 \text{ и т. д.}$$

Зная коэффициенты вытяжки, можно определить площади фланцев по проходам.

6. Уширение определяют по методу А. П. Чекмарева [73, с. 294]. Уширение принимают пропорциональным расчетной вытяжке фланцев, общее уширение распределяют по калибрам в соответствии с относительным приращением длины.

Конечные результаты расчета калибровки двутавровой балки приводят в виде таблицы.

При составлении чертежа калибров для прокатки двутавровых балок необходимо строго руководствоваться порядком расстановки размеров калибров (рис. 124).

В заключение предлагаем по вышеизложенной методике обосновать размеры калибров, приведенных на рис. 124, для прокатки балки № 16 на стане 500.

Глава VI

ОХЛАЖДЕНИЕ СТАЛИ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Режим охлаждения стали за период прокатки слитков или заготовок до конечного профиля и после прокатки годных изделий является одной из основных составных частей технологии прокатного производства.

Знание истинной температуры металла после каждого прохода имеет существенное значение для определения силовых усло-

вий процесса и проектирования средств и режимов охлаждения металла.

Теплотехнические инженерные расчеты производят по формулам, включающим значительное число допущений. Поэтому результаты аналитических расчетов не всегда совпадают с практическими данными, полученными с помощью современной измерительной техники.

Например, давление металла на валок P определяют методами, изложенными в работе А. Е. Гуревича и Е. С. Рокотяна [82], а температуру конца прокатки фиксируют с помощью саморегистрирующего прибора ФЭП (фотоэлектрический пирометр).

При выборе средств и режимов охлаждения прокатных изделий необходимо руководствоваться эпюрой распределения температурных напряжений по сечению тела (см. рис. 9 и 14). Однако следует отметить, что распределение напряжений по сечению охлаждаемого тела существенно отличается от распределения напряжений при нагревании тела.

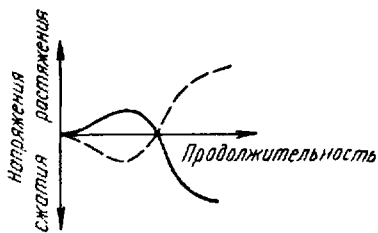


Рис. 125. Изменение напряжений при охлаждении стали (по данным Шайля)

Если при нагревании тела в первый момент поверхностные слои его (см. рис. 9) подвергаются действию сжимающих напряжений (—), а середина — растягивающих (+), то при охлаждении — наоборот, т. е. поверхностные слои подвергаются действию растягивающих (+), а середина — сжимающих (—) напряжений. При дальнейшем охлаждении усадка наружных слоев металла почти прекращается, причем они становятся холодными и утрачивают пластичность, а середина продолжает еще остывать и сжиматься. Вследствие этого, картина напряжений изменяется: снаружи появляются сжимающие, а внутри растягивающие напряжения.

Схема изменения напряжений при охлаждении стали, по данным Шайля, приведена на рис. 125 [14]. Из нее следует, что при охлаждении стали, особенно высоколегированной малопластичной типа быстрорежущей марки Р19, начальный период охлаждения, когда поверхностные слои тела подвергаются действию растягивающих напряжений, считается опасным. В подобных сталях в этот период возникают поверхностные закалочные трещины. Для предотвращения их образования необходимо поддерживать минимальную разность температур между температурой поверхностного слоя и температурой окружающей среды. Первый период охлаждения стали является для средних слоев безопасным, так как они подвергаются действию сжимающих напряжений.

Для поверхностных слоев первый период опасен до момента изменения знака напряжений с плюса на минус. С этого момента охлаждения начинается второй период охлаждения, когда поверх-

ностные слои сжимаются, а средние растягиваются. В этот период для стали типа быстрорежущей и хромоалюминиевой создаются условия, способствующие образованию прерывистых внутренних трещин, а в отдельных случаях — кольцевых трещин (рис. 126). В настоящее время критическую точку изменения знаков напряжений для каждой группы сталей определяют эмпирическим

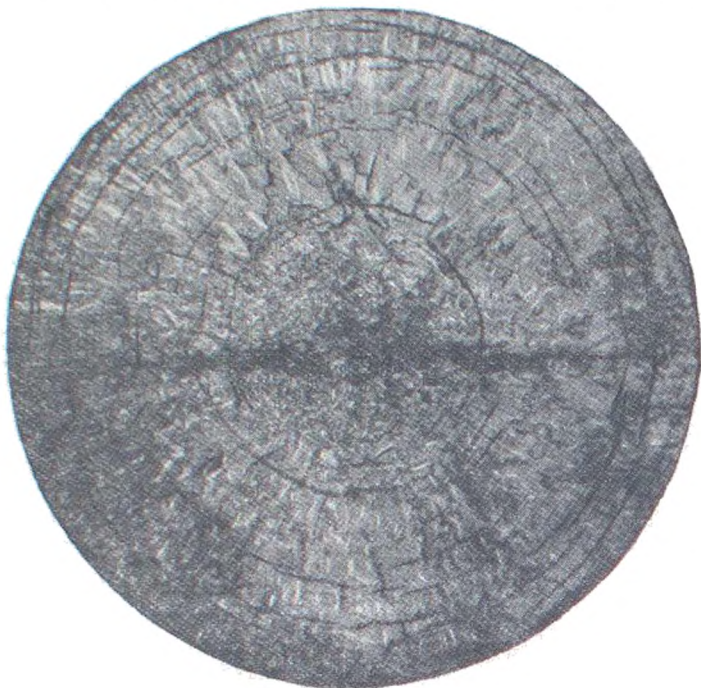


Рис. 126. Макроструктура поперечного размера слитка массой 200 кг из сплава ферритного класса марки 1Х25Ю5. Концентрические трещины образовались при охлаждении

методом, так как определение ее аналитическим методом представляет значительные трудности.

По данным Ю. М. Чижикова [14] изменение знака напряжений происходит примерно при 300°C . Так, у стали мартенситно-ледебуритного класса опасность образования трещин возникает при температуре, несколько превышающей комнатную, и становится наибольшей после полного охлаждения, когда остаточные напряжения достигают своего максимума.

Закономерности изменения остаточных напряжений рассмотрены в трудах С. И. Губкина [32, 34].

У нелегированных сталей остаточные напряжения могут быть также высокими. Пример действия остаточных напряжений на прокатанные изделия при их охлаждении показан на рис. 127.

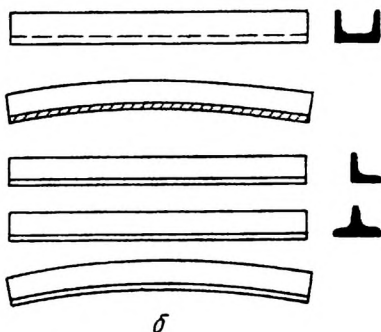
Если получающиеся внутренние остаточные напряжения достигают величин, превышающей предел прочности металла, то в нем могут образовываться внутренние микро- и макротрещины, а также трещины, выходящие наружу.

Иногда достаточно незначительного внешнего воздействия, чтобы появились трещины. Такими внешними незначительными воздействиями могут быть: толчок, встряхивание, нанесение ца-



Рис. 127. Влияние остаточных напряжений на качество изделий:

a — штанга диаметром 45 мм из Х10С2М (ЭИ107) с двумя крупными продольными трещинами, возникшими от действия остаточных напряжений при охлаждении металла на воздухе (по данным Ю. М. Чижикова); *б* — искривление профилей (по данным Ю. А. Нехендзи)



рапин, местное изменение температуры, например, при зачистке стали абразивными кругами и др. Неоднородность металла, микропоры, газовые пузыри, неметаллические включения, крупные скопления карбидов также могут быть причиной появления поверхностных и внутренних трещин.

Известно, что нарушение сплошности тела является следствием действия растягивающих напряжений. Поэтому для уменьшения действия растягивающих напряжений при охлаждении стали рекомендуется изделия после прокатки охлаждать медленно до выравнивания температур поверхности и середины тела. Медленное охлаждение стали способствует также уменьшению структурных напряжений.

В ряде случаев, перечисленных ниже, прибегают к охлаждению металла в воде.

1. Когда предъявляются высокие требования к чистоте поверхности по окалине. Например, сутуночные полосы после выхода из стана при последнем проходе поступают в бассейн с водой. Таким

способом охлаждают стали, в которых при любой скорости охлаждения не образуются никакие дефекты.

2. Когда необходимо получить сталь без цементитной (карбидной) сетки, например, ШХ15, У9—У12 и т. д. В этом случае

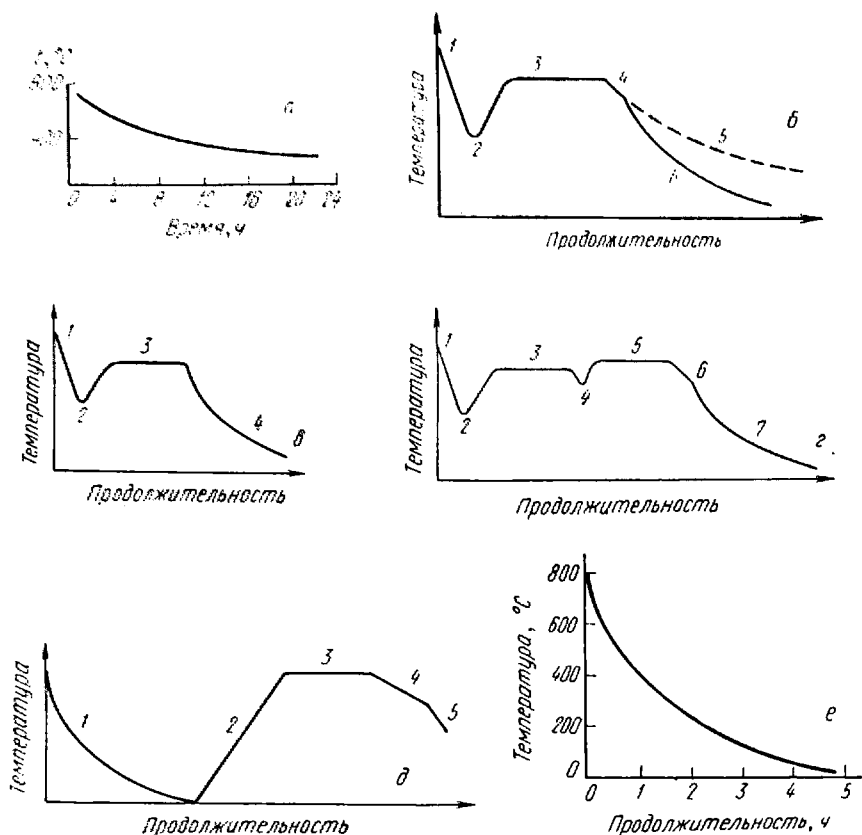


Рис. 128. Режимы охлаждения стали после прокатки:

a — в неотплавленном колодце и термостате при засыпке стали теплоизоляционным материалом; *б* — в отапливаемой печи или колодце (1 и 2 — начало и конец загрузки; 3 — выдержка при температуре перлитного распада аустенита или выше температуры A_{c1} ; 4 и 5 — охлаждение с печью; 6 — охлаждение на воздухе); *в* — с изотермическим термоустойчивым расходом аустенита (1 и 2 — начало и конец загрузки в отапливаемую печь; 3 — выдержка при температуре перлитного распада аустенита; 4 — охлаждение на воздухе); *г* — изотермический распад аустенита (1—4) и отжиг (5—7); *д* — комбинированный режим охлаждения (1 — охлаждение на воздухе; 2 — нагрев; 3 — выдержка при температуре отжига; 4 — охлаждение с печью; 5 — охлаждение на воздухе); *е* — на стеллажах

металл охлаждают в воде до потемнения. После этого осуществляют самоотпуск.

В воде охлаждают преимущественно такие стали, которые даже при самой большой скорости охлаждения не склонны к образованию трещин и флокенов.

3. Когда требуется получить сталь с достаточно равномерной структурой, например листы из низкоуглеродистой стали, предназначенные для глубокой штамповки. При охлаждении листов в воде не выпадает свободный цементит и исключается образование неравномерной структуры. Если полосы сматывают в рулоны, то быстрое охлаждение производят до 700°C .

Особо чувствительные к термическим и другим напряжениям стали, например, быстрорежущая, после прокатки медленно охлаждают и затем не позже чем через сутки после охлаждения подвергают термической обработке (изотермическому отжигу). Только в этих случаях быстрорежущая сталь теряет склонность к трещинообразованию.

Все виды брака (закалочные трещины, внутренние концентрические или поперечные трещины, флокены, карбидная сетка) и причины их образования при охлаждении стали достаточно подробно рассмотрены в работе Ю. М. Чижикова [14].

В целях предупреждения образования всех видов брака при охлаждении стали применяют следующие способы охлаждения: 1) в малотеплопроводящих материалах (кизельгур, доменный шлак, песок, шлаковая вата, каменноугольная зола, мелкий гравий); 2) в термостатах; 3) в неотапливаемых колодцах; 4) в подогреваемых колодцах и печах; 5) в отапливаемых печах и колодцах; 6) в воде.

Большинство углеродистых и легированных сталей охлаждают непосредственно на воздухе. Охлаждение происходит на стеллажах, где изделия лежат в один ряд, или в пакетах и штабелях. Остывание стали на стеллажах идет значительно интенсивнее, чем в пакетах и штабелях.

При выборе режимов и средств охлаждения стали после прокатки необходимо знать следующие основные данные:

- 1) склонность стали к образованию флокенов, закалочных поверхностных и кольцевых внутренних трещин [14];
- 2) температуру конца прокатки стали;
- 3) критические точки фазовых превращений [83];
- 4) физико-механические свойства металла при температурах конца прокатки [13], [12];
- 5) остаточные напряжения в металле после прокатки.

Основные графики охлаждения стали после прокатки, используемые на производстве, представлены на рис. 128.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА В КОНЦЕ ПРОКАТКИ

Задача № 141 [33]. Определить температуру конца прокатки рудничного рельса массой одного метра $4,6\text{ кг}$ и сечением $130 \times 130\text{ мм}^2$ по следующим данным:

Начальная температура заготовки t_n , °C	1200
Масса заготовки G , кг	118
Начальная длина заготовки l_n , м	0,89
Конечная длина раската l_k , м	25,5
Площадь поперечного сечения исходной заготовки F_n , м ²	0,0169
Площадь поперечного сечения готового профиля F_k , м ²	0,00059
Площадь исходной поверхности заготовки Π_n , м ²	0,462
Площадь поверхности раската заданного профиля Π_k , м ²	4,25
Общее время прокатки $z_{\text{общ}}$, сек	119,76

Решение. Температуру металла после прокатки в течение заданного периода времени определяют по формуле Ш. Гелен:

$$t_k = t_n e^{-\lambda R}, \quad (1-VI)$$

где λ — коэффициент теплопередачи, определяемый по формуле:

$$\lambda = 0,036 \cdot \left(\frac{t_n - 800}{500} \right) + 0,02;$$

$$R = \frac{1}{GC} \left[\Pi_n \tau + 0,5 (\Pi_k - \Pi_n) \cdot \frac{\tau^2}{z_{\text{общ}}} \right],$$

где $\tau = 30$ сек — период изменения температуры в результате излучения.

По заданным условиям задачи определяем:

$$\frac{1}{GC} = \frac{1}{118 \cdot 0,16} = \frac{1}{19},$$

где $C = 696$ дж/кг·град (0,16 ккал/кг·град) — теплоемкость прокатываемого металла.

$$\Pi_n \tau = 0,462 \cdot 30 = 13,86;$$

$$\Pi_k - \Pi_n = 4,25 - 0,462 = 3,79 \text{ м}^2;$$

$$\frac{\tau^2}{z_{\text{общ}}} = \frac{30^2}{119,76} = 7,5.$$

Тогда

$$R = \frac{1}{19} (13,86 + 0,5 \cdot 3,79 \cdot 7,5) = 1,47.$$

При получении значений R уравнение (1-VI) приобретает вид:

$$t_k = t_n e^{-1,47\lambda}. \quad (2-VI)$$

Общее время прокатки $Z_{\text{общ}} = 119,76$ сек ≈ 120 сек распределяем на циклы с периодом $\tau = 30$ сек, а именно: 30; 60; 90 и 120 сек.

Пользуясь уравнением (2-VI), определяем температуру металла в конце каждого принятого нами цикла времени, в течение

которого наблюдается изменение температуры, вызванное излучением. В этом случае имеем:

$$\begin{aligned}
 t_n &= 1200^\circ \text{C}; \\
 \lambda_{30} &= 0,036 \frac{1200 - 800}{500} + 0,02 = 0,049; \\
 t_{30} &= 1200 \cdot e^{-1,47 \cdot 0,049} = 1117^\circ \text{C}; \\
 \lambda_{60} &= 0,036 \frac{1117 - 800}{500} + 0,02 = 0,043; \\
 t_{60} &= 1117 \cdot e^{-1,47 \cdot 0,43} = 1049^\circ \text{C}; \\
 \lambda_{90} &= 0,036 \frac{1049 - 800}{500} + 0,02 = 0,038; \\
 t_{90} &= 1049 e^{-1,47 \cdot 0,038} = 992^\circ \text{C}; \\
 \lambda_{120} &= 0,036 \frac{992 - 800}{500} + 0,02 = 0,034; \\
 t_{120} &= 992 e^{-1,47 \cdot 0,034} = 944^\circ \text{C}.
 \end{aligned}$$

Полученную температуру рудничного рельса в конце прокатки $t_k = 944^\circ \text{C}$ необходимо откорректировать с учетом подъема температуры металла под действием полезной работы деформации и снижения температуры из-за поглощения тепла валками. Подобные расчеты при сортовой прокатке не имеют практического значения, так как повышение температуры металла под действием полезной работы деформации почти полностью компенсируется снижением температуры металла вследствие поглощения тепла валками [33].

По данным Ш. Гелен [33] температура рудничного рельса повышается на 114°C под действием полезной работы деформации и снижается на 118°C из-за поглощения тепла валками. Пренебрегая этими температурами, мы допускаем ошибку на $0,42\%$ от расчетной температуры конца прокатки $t_k = 944^\circ \text{C}$.

Существуют и другие формулы для расчета процесса охлаждения стали при прокатке. Например, А. Г. Стукач [84] предлагает формулу для расчета уменьшения температуры полосы в результате лучеиспускания:

$$\Delta T_n = 67 \frac{P}{G} \left(\frac{T_{cp}}{1000} \right)^4 \Delta Z, \quad (3-VI)$$

где P — площадь поверхности излучения;

G — масса полосы;

T — средняя температура за время охлаждения температуры полосы, $^\circ \text{K}$.

Повышенные температуры полосы за действием деформации металла за проход рассчитывают по формуле

$$\Delta T_{\text{деф}} = 4,28 \rho_{\text{сп}} \lg \frac{h_0}{h_1}, \quad (4-VI)$$

где $\rho_{\text{сп}}$ — удельное сопротивление деформированию;
 h_0 и h_1 — толщина полосы до и после прокатки.

Задача № 142 [84]. Определить температуру переднего конца полосы квадратного сечения размерами $6,5 \times 6,5$ мм при выходе ее из валков диаметром 250 мм, если известно:

1) квадрат прокатывают из овальной полосы $h \times b = 5 \times 13$ мм;

2) овальная полоса задается в квадратный калибр последующей клетки петлей через $\Delta Z = 3$ сек после выхода овала из валков с температурой переднего конца 1025°C ;

3) материал полосы — Ст.3.

Решение. Температуру переднего конца полосы квадратного сечения размерами $6,5 \times 6,5$ мм находим по формуле (3-VI).

Поверхность излучения Π и массу полосы определяют из расчета на 1 м длины полосы.

Для овальной полосы сечением 5×13 мм, считая по формуле $F = \frac{\pi}{4} bh$, получили $F = 51$ мм². На участке длиной 1 м боковая поверхность $\Pi = 0,03$ м². Масса $G = 0,395$ кг/м.

Среднюю температуру овальной полосы принимаем несколько ниже начальной, а именно:

$$T_{\text{сп}} = 1298 - 20 = 1278^\circ \text{K}.$$

Тогда по формуле (3-VI) имеем

$$\Delta T_{\text{п}} = 67 \frac{0,03}{0,395} \left(\frac{1278}{1000} \right)^4 \cdot 3 = 41^\circ \text{K}.$$

Температура овальной полосы перед задачей в квадратный калибр

$$T_{\text{ов}} = 1298 - 41 = 1257^\circ \text{K}.$$

Температура овальной полосы снижается на 41°K только в результате лучеиспускания.

Теперь определим повышение температуры квадратной полосы под действием деформации овала в квадрате.

Находим размеры полосы $b \times h = 13 \times 5$ мм.

Отношение осей овала

$$\frac{b}{h} = \frac{13}{5} = 2,6.$$

Площадь овала $F_{\text{ов}} = 51 \text{ мм}^2$. Такие же площадь и соотношение осей имеет и соответствующая полоса. Откуда высота соответствующей полосы

$$h_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{F_{\text{ов}}}{2,6}} = \sqrt{\frac{51}{2,6}} \approx 4,47 \text{ мм.}$$

Из отношения

$$\frac{b_{\text{ср}}}{h_{\text{ср}}} = \frac{b_{\text{ср}}}{4,47} = 2,6$$

имеем

$$b_{\text{ср}} = 4,47 \cdot 2,6 = 11,62 \text{ мм.}$$

Определяем коэффициент деформации полосы в квадрате $6,5 \times 6,5 \text{ мм}$:

$$\frac{1}{\eta} = \frac{b_{\text{ср}}}{h_1} = \frac{11,62}{6,5} = 1,79.$$

(В обычных условиях $\frac{1}{\eta} = \frac{b_0}{h_1}$.)

Температура плавления стали марки Ст.3 $t_{\text{пл}} = 1480^\circ \text{C}$, а предел прочности $\sigma_{\text{в}} = 380 \div 470 \text{ Мн/м}^2$ ($38 \div 47 \text{ кг/мм}^2$) (см. рис. 67). По формуле В. А. Тягунова

$$\begin{aligned} \rho_{\text{ср}} &= \frac{(t_{\text{пл}} - 75) - T_{\text{ов}}}{1500} \cdot \sigma_{\text{в}} = \frac{1758 - 1257 - 75}{1500} \times \\ &\times 425 = 119 \text{ Мн/м}^2 (11,9 \text{ кг/мм}^2). \end{aligned}$$

Пользуемся формулой А. Г. Стукача для определения повышения температуры металла от его деформации:

$$\Delta T_{\text{деф}} = 4,28 \rho_{\text{ср}} \lg \frac{h_0}{h_1} = 4,28 \cdot 11,9 \lg 1,79 = 12,9^\circ \approx 13^\circ \text{K}.$$

Таким образом, температура переднего конца квадратной полосы в результате прокатки повысится:

$$T_{\text{кв}} = 1257 + 13 = 1270^\circ \text{K} (997^\circ \text{C}).$$

Снижение температуры металла за период прокатки овала в квадрате составит $1025 - 997 = 28^\circ \text{C}$.

Задача № 143 [1]. Определить время охлаждения рельса массой 65 кг/м с 1073°K (800°C) до 323°K (50°C).

Решение. Время охлаждения рельса

$$\tau = \frac{Q}{\alpha F T_{\text{ср}}}, \quad (5\text{-VI})$$

где $\alpha = 67 \text{ кдж/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°К}$ — коэффициент теплоотдачи;
 $F = 0,7 \text{ м}^2$ — поверхность рельса;
 $T_{\text{ср}}$ — средняя температура металла

$$T_{\text{ср}} = \frac{(T_1 - T_0) - (T_2 - T_0)}{\lg \frac{T_1 - T_0}{T_2 - T_0}}, \quad (6-VI)$$

где $T_1 = 1073^\circ \text{ К}$ (800° С); $T_2 = 323^\circ \text{ К}$ (50° С); $T_0 = 293^\circ \text{ К}$ (20° С).

Тогда

$$T_{\text{ср}} = \frac{(1073 - 293) - (323 - 293)}{\lg \frac{1073 - 293}{323 - 293}} = 503^\circ \text{ К} (230^\circ \text{ С}).$$

Количество тепла, отдаваемое металлом за время охлаждения:

$$Q = Q_1 - Q_2. \quad (7-VI)$$

Для решения уравнения (7-VI) определяем количество тепла, содержащееся в металле:

при 800° С

$$Q_1 = q_1 t_1 m = 0,6886 \cdot 800 \cdot 65 = 35\,807 \text{ кдж},$$

где $q_1 = 0,6886 \text{ кдж/кг} \cdot \text{°С}$ — удельное теплосодержание стали при 800° С ;

при 50° С

$$Q_2 = q_2 t_2 m = 0,469 \cdot 50 \cdot 65 = 1518 \text{ кдж},$$

где $q_2 = 0,469 \text{ кдж/кг} \cdot \text{°С}$ — удельное теплосодержание стали при 50° С .

Тогда

$$Q = Q_1 - Q_2 = 35\,807 - 1518 = 34\,289 \text{ кдж}.$$

После этого по уравнению (5-VI) определяем время охлаждения рельса:

$$\tau = \frac{Q}{\alpha F T_{\text{ср}}} = \frac{34289}{67 \cdot 0,7 \cdot 230} \approx 3,2 \text{ ч}.$$

По данным М. И. Бояршинова, время охлаждения рельсов, лежащих на стеллажах без интервалов, до 50° С равно 4 ч для рельсов типа IA и 3 ч 20 мин для рельсов типа IIA.

Для листовой и универсальной стали А. И. Сероватин [85] рекомендует время охлаждения определять по простой формуле:

$$\tau = 28h \lg \frac{t_1}{t_2} \text{ мин}, \quad (8-VI)$$

где h — толщина полос;

t_1 — начальная температура металла;

t_2 — конечная температура металла после охлаждения, которую можно определить по методу В. А. Тягунова (см. с. 248, задача 135).

Задача № 144 [85]. Определить время охлаждения на воздухе полосовой стали сечением 50×7 мм и квадратного сечения 50×50 мм, если известно, что температура металла, поступающего на холодильник, $T_1 = 1073^\circ \text{K}$ (800°C) и требуется охладить его до $T_2 = 323^\circ \text{K}$ (50°C).

Решение. Время охлаждения сортовой стали

$$\tau = 336 \cdot 10^3 \cdot \frac{S}{P_{\text{п}}} \cdot 2,3 \lg \frac{T_1}{T_2} \text{ сек}, \quad (9\text{-VI})$$

где S — площадь поперечного сечения профиля;

$P_{\text{п}}$ — периметр поперечного сечения профиля;

T_1 — температура металла, поступающего на холодильник;

T_2 — температура металла после охлаждения.

Для полосовой стали:

$$S_{\text{п}} = 0,05 \cdot 0,007 = 0,00035 \text{ м}^2.$$

$$P_{\text{п}} = 2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,007 = 0,114 \text{ м}.$$

$$\frac{S_{\text{п}}}{P_{\text{п}}} = \frac{0,00035}{0,114} = 0,00307.$$

$$2,3 \lg \frac{T_1}{T_2} = 2,3 \lg \frac{1073}{323} = 2,3 \lg 3,32 = 2,3 \cdot 0,521 \approx 1,2;$$

$$\tau = 336 \cdot 10^3 \cdot 0,00307 \cdot 1,2 = 1238 \text{ сек (21 мин)}.$$

Для квадратной стали:

$$S_{\text{кв}} = 0,05 \cdot 0,05 = 0,0025 \text{ м}^2;$$

$$P_{\text{кв}} = 4 \cdot 0,05 = 0,20 \text{ м};$$

$$\frac{S_{\text{кв}}}{P_{\text{кв}}} = \frac{0,0025}{0,20} = 0,0125;$$

$$2,3 \lg \frac{T_1}{T_2} = 2,3 \lg \frac{1073}{323} = 1,2;$$

$$\tau = 336 \cdot 10^3 \cdot 0,0125 \cdot 1,2 = 5040 \text{ сек (84 мин)}.$$

Задача № 145 [68]. По методу Г. П. Иванцова определить время охлаждения листа сечением 20×1500 мм от $t_1 = 850^\circ \text{C}$ до $t_2 = 100^\circ \text{C}$. Масса листа $G = 234$ кг; теплоотводящая поверхность листа $\Pi = 3,04 \text{ м}^2$.

Решение. Время охлаждения проката

$$Z = \frac{G}{\Pi} \tau \text{ ч}, \quad (10\text{-VI})$$

где G — масса полосы;

P — площадь теплоотводящей поверхности;

τ — время охлаждения прокатного изделия массой 1 кг с площадью теплоотводящей поверхности, равной 1 м².

Т а б л и ц а 59

Зависимость времени охлаждения от толщины изделия

Толщина изделия мм	Скорость потока воздуха м/сек	Время охлаждения с 850° С. ч	
		до 100° С	до 50° С
45	0	0,013	0,018
	2	0,007	0,010
50	0	0,013	0,021
	2	0,009	0,013
100	0	0,015	0,022
	2	0,011	0,016

расположенного с промежутками между отдельными полосами, скорость этого потока доходит до 2 м/сек.

В табл. 59 приведены значения времени охлаждения стального проката массой 1 кг с площадью теплоотводящей поверхности, равной 1 м².

При $\tau = 0,012$ ч · м²/кг получим:

$$Z = \frac{234}{3,04} \cdot 0,012 = 0,93 \text{ ч (54 мин.)}$$

По данным А. И. Целикова [76] при естественном охлаждении листов или широких полос скорость потока воздуха практически близка к нулю, а при охлаждении сортового металла,

3. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какими аналитическими и экспериментальными методами определяется температура конца прокатки стали?

2. Перечислить достоинства и недостатки рассмотренных аналитических методов определения температуры конца прокатки.

3. От каких факторов зависит температура конца прокатки?

4. От таких факторов зависит время охлаждения стали после ее прокатки?

5. Какие применяют режимы охлаждения изделий после прокатки?

6. Какими способами определяют время охлаждения стали на воздухе после ее прокатки?

7. Составить в общем виде тепловой баланс процесса прокатки.

8. Дать анализ уравнения Ш. Гелеи [33]:

$$Q_1 + Q_2 = \beta \Delta F p_{\text{ср}} v_{\text{пр}} \frac{1}{A} \tau, \quad (11-VI)$$

где $\beta = (1,05 \div 0,8) \frac{\Delta h}{h}$ — коэффициент, учитывающий влияние сплющивания валков;

ΔF — уменьшение поперечного сечения полосы при деформации;

$v_{\text{пр}}$ — скорость прокатки;

τ — время прокатки;

$A = 4,27$ кдж 1 ккал (427 кГ·м 1 ккал) — механический тепловой коэффициент;

Q_1 — тепло, получаемое полосой в результате пластической деформации;

Q_2 — тепло, получаемое полосой от трения металла о валки.

9. Какими аналитическими методами можно определить напряжения в любой точке сечения стальной заготовки при ее охлаждении за период ΔZ , считая от температуры конца прокатки?

10. Определить, насколько повысится температура прокатываемой полосы от трения металла о валки при заданных условиях прокатки.

11. Определить, насколько повысится температура прокатываемой полосы в результате пластической деформации.

12. Какими методами определяют потери тепла и снижение температуры металла в результате лучеиспускания, конвекции и теплопроводности?

13. Перечислить все виды брака, возникающего при охлаждении стали после прокатки, и объяснить их причины.

14. Какими потерями тепла при определении температуры конца прокатки можно пренебречь и почему?

15. Какие прокатные изделия можно охлаждать быстро до определенных температур, какие — медленно, и почему?

16. Почему образуются кольцевые трещины (см. рис. 126) при охлаждении стали 1Х25Ю5 и происходит коробление профилей (см. рис. 127)?

17. Можно ли определять температуру конца прокатки сортовой стали по методу В. А. Тягунова?

18. Перечислить достоинства метода определения времени охлаждения металла Г. П. Иванцова.

19. Для чего необходимо знать температуру фазовых превращений при охлаждении стали?

20. Перечислить все способы охлаждения стали после ее прокатки. Какие из них используют на практике в зависимости от структуры сталей и размеров профиля катаных изделий?

Глава VII

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ЭКОНОМИКИ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

1. СЕБЕСТОИМОСТЬ ПРОКАТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ¹

Основным качественным показателем работы прокатных станов является себестоимость одной тонны годной продукции.

¹ В работе над данным разделом книги принимал участие Главный экономист завода «Электросталь» МЧМ СССР А. А. Панкратов.

Себестоимость одной тонны проката

$$C = (M - m) + P, \quad (1-VII)$$

где M — стоимость металла, запускаемого в производство для получения одной тонны годной продукции;

m — стоимость отходов (отходы обрубки, брак, стружка — отходы обдирки металла, абразивная пыль — отходы зачистки металла в адьюстаже);

P — расходы по переделу (нагрев, прокатка, обработка на адьюстаже, травление, термическая обработка и т. п.).

В расходы по переделу в условиях металлургического производства входят следующие статьи затрат: 1) технологическое топливо (мазут, газ и др.); 2) энергетические затраты (электроэнергия, сжатый воздух, пар, вода и т. п.); 3) зарплата производственных рабочих и начисления на зарплату; 4) амортизация затрат на основные средства; 5) износ сменного оборудования и инструмента; 6) текущий ремонт и содержание основных средств; 7) передвижение грузов; 8) прочие цеховые расходы; 9) общезаводские расходы.

Калькуляцию себестоимости проката составляют в соответствии с утвержденной в 1964 г. инструкцией по планированию, учету и калькулированию себестоимости продукции на предприятиях черной металлургии.

Калькуляции себестоимости проката составляют по отдельным станам — агрегатные калькуляции и по видам проката или по группам марок стали — сортовые калькуляции.

Агрегатные калькуляции составляют, как правило, по стану в целом. Исключением являются рельсо-балочные, колесопрокатные и бандажные станы, которые характеризуются длительным циклом производства и значительными остатками металла в незавершенном производстве. Для этих станков калькуляции себестоимости проката определяют в два передела.

Кроме агрегатных калькуляций, составляют общезаводские калькуляции, по которым определяют полную себестоимость:

$$K = C + B, \quad (2-VII)$$

где C — агрегатная (цеховая) себестоимость;

B — внепроизводственные расходы.

Внепроизводственные расходы включают в себя расходы, связанные со сбытом готовой продукции (транспортные расходы, комиссионные сборы сбытовых контор, отчисления на научно-исследовательские расходы, на новую технику и др.).

Пути снижения себестоимости

Прокатное производство относится к весьма материалоемким производствам. Стоимость основных материалов, слитков или заготовок, — на одну тонну годного составляет 80—95% от себестоимости

мости прокатной продукции. Поэтому уменьшение затрат на основные материалы является решающим фактором, влияющим на снижение себестоимости проката.

Удельная норма расхода слитков или заготовки на тонну проката зависит от величины потерь при прокатке в виде обреза, угара, брака и пыли от зачистки. Общее представление о расходе металла и выходе годного при прокатке различных изделий можно получить по данным, приведенным в табл. 1.

Основные мероприятия, направленные на увеличение выхода годного, следующие: 1) улучшение качества слитка или заготовки; 2) мерность раската; 3) использование рациональных технологических режимов (нагрева, прокатки и др.).

Снизить расходы по переделу можно в основном за счет:

а) экономии топлива;

б) уменьшения энергетических затрат, скрытых простоев и холостого хода оборудования, повышения производительности станков, а также использования двигателей соответствующих мощностей и т. д.;

в) сокращения расходов на текущий ремонт и содержание оборудования, что достигается соблюдением правил технической эксплуатации оборудования, улучшением качества планово-предупредительных ремонтов и организации ремонтного хозяйства.

К оценочным показателям работы предприятий в соответствии с новой системой планирования и экономического стимулирования относятся: объем реализованной продукция, прибыль и уровень рентабельности.

Показатель реализации готовой продукции — есть произведенная за отчетный период времени продукция, отгруженная заказчикам и оплаченная ими. Это показатель ставит производителей под экономический контроль потребителей, получающих товарную продукцию по договорам.

Прибыль — разница между оптовой ценой продукции и ее себестоимостью — отражает все стороны деятельности предприятия. Прибыль дает полное представление о конечных результатах деятельности производства, наглядно показывает, насколько эффективно используются средства производства, какова окупаемость основных фондов.

Показатель уровня рентабельности — отношение прибыли к основным и оборотным фондам — характеризует эффективность использования основных и оборотных фондов.

Новая система планирования и экономического стимулирования предусматривает выгодность производства продукции не только для государства в целом, но и для непосредственных исполнителей — предприятий и трудящихся. Поэтому в распоряжение предприятия из полученной прибыли по установленным нормативам, учитывающим выполнение плана реализации продукции и уровня рентабельности производства, передаются так называемые стимулирующие фонды: фонд материального поощрения, фонд

культурно-бытового назначения и жилищного строительства и фонд развития производства.

Так, например, на электрометаллургическом заводе «Электро-сталь» им. И. Ф. Тевосяна стимулирующие фонды за три года работы по новой системе увеличились на 20%.

2. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

К основным технико-экономическим показателям, характеризующим прокатное производство, относятся расход металла, топлива на нагрев металла, электроэнергии для главных приводов и для электродвигателей вспомогательных механизмов, технической воды и инструмента на единицу годного изделия.

Все эти показатели изменяются в широких пределах в зависимости от конструкции стана, режимов нагрева, калибровки валков, схем прокатки, технологии охлаждения и обработки металла на адьюстаже. Техничко-экономические показатели зависят от физико-механических свойств и качества исходного металла слитков или заготовок, от формы и размеров конечной прокатанной продукции, а также от производственно-технической дисциплины и организации производства. Рассмотрим отдельно каждый из показателей.

Расход металла. Ранее отмечалось, что расход металла на единицу годной продукции является основным параметром ее себестоимости. Если M — масса металла, запускаемого в производство, а m — число единиц годной продукции, то расход металла на единицу годной продукции и коэффициент выхода годного n соответственно будут равны:

$$\left. \begin{aligned} j &= \frac{M}{m}; \\ n &= \frac{Q}{M} \cdot 100\%, \end{aligned} \right\} \quad (3-VII)$$

где Q — масса продукции, полученной из металла массой M .

Удельный расход металла определяют для каждого сорта изделий и каждой марки стали или группы марок.

Если годную товарную продукцию изготовляют в несколько переделов, то для определения ее себестоимости находят так называемый сквозной коэффициент расхода металла на единицу годного по формуле

$$N = \frac{n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_k}{10^{2k}}, \quad (4-VII)$$

где n_1, n_2, \dots, n_k — выход годного по переделам, %;
 k — число переделов.

Допустим, годное изделие прокатывают в три этапа: слиток — блюм с выходом годного $n_1 = 82\%$; блюм — заготовка при $n_2 = 92\%$ и заготовка — годное изделие при $n_3 = 93,5\%$. Тогда

сквозной выход годного от слитка до годного изделия по формуле (4-VII) будет равен:

$$N = \frac{n_1 n_2 n_3}{10^{2k}} = \frac{82 \cdot 92 \cdot 93,5}{10^6} = 0,705, \text{ или } 70,5\%,$$

что соответствует расходу металла на единицу годной продукции:

$$j = \frac{100}{N} = \frac{100}{70,5} = 1,418 \text{ т.}$$

Величина

$$A = j - 1 \quad (5-VII)$$

называется отходами металла при производстве годного.

В ранее рассмотренном примере величина

$$A = 1,418 - 1 = 0,418 \text{ т} = 418 \text{ кг}$$

является отходами, т. е. суммой потерь металла при прокатке годного изделия:

$$A = a_1 + a_2 + a_3, \quad (6-VII)$$

где a_1 — отходы обрубки, стружка при обдирке слитков, заготовок или готовой продукции, обрезь, получаемая при раскросе раската;

a_2 — брак передела по разным причинам;

a_3 — безвозвратные потери.

Наиболее опасными потерями металла для экономики производства принято считать так называемые безвозвратные потери, к которым относят угар металла при его нагреве перед прокаткой. Угар металла при нагреве быстрорежущей стали достигает 5%.

Уменьшению потерь металла способствуют следующие организационно-технические мероприятия:

- 1) внедрение рациональных схем прокатного производства;
- 2) развитие непрерывной разливки стали, позволяющей повышать выход годного проката в результате сокращения отходов в обрезь на 5—15% и выше;
- 3) развитие непрерывной прокатки и более совершенной так называемой бесконечной прокатки;
- 4) усовершенствование технологического процесса нагрева металла и внедрение так называемого безокислительного скоростного нагрева, индукционного нагрева с использованием ТВЧ или ТПЧ, нагрев в вакуумных печах;
- 5) интенсификация режимов обжатий и применение рациональных калировок валков;
- 6) применение при изготовлении годных изделий из малопластичных, дорогостоящих сплавов метода гидроэкструзии;
- 7) применение тяжелых слитков (прибыльную часть слитка подогревают с использованием электричества или газа) и увеличения массы заготовки и сечения блюмов;
- 8) увеличение диаметра валков обжимных станков и их стойкости;
- 9) повышение скорости прокатки;

10) освоение новых профилей и прокатки с ужесточенными допусками, расширение производства облегченных профилей, использование гнутых профилей, периодических профилей проката, широкополочных балок, увеличение производства изделий с антикоррозионными покрытиями, упрочнение изделий проката термической обработкой и др.

Подробные сведения об экономии металла изложены в специальной литературе [89—91 и др.].

Расход топлива на единицу годных изделий прокатного производства колеблется в широких пределах (табл. 60).

Таблица 60

**Расход топлива на единицу годных изделий
прокатного производства (1)**

Стали	Изделие	Расход условного топлива на 1 т годных изделий		Примечание
		кдж	тыс. ккал	
Блюминг	Блюм Сляб	1 150 000	250	95% посада в нагревательные колодцы составляют горячие слитки
Рельсобалочный	Рельс Балка	628 500 712 000	150 170	
Сортовые	Сортамент (см. табл. 8 и 9)	1675—2090	400—500	Первая величина относится к станам, на которых осуществляют прокатку из мелкой заготовки (50×50÷100××100 мм). Вторая величина относится к станам, использующим более тяжелые заготовки (125×125—250××250 мм)
Штрипсовые станы	Лента и штрипсы	1 675 000	375	
Листовые	Листы толстые и средние	4 200 000 5 000 000	1000 1200	При прокатке из слябов При прокатке из слитков
Непрерывные и полунепрерывные листовые станы	Тонкие листы	1 675 000	400	Для нагрева слябов

Теплотворная способность 1 кг условного топлива составляет 29,3 Мдж/кг (7000 ккал/кг).

Фактический расход топлива на единицу годного металла определяют следующим образом. Допустим, что на мелкосортном стане за смену прокатано 36 т годного проката и израсходовано 3,6 т мазута. Теплотворная способность мазута 41,9 Мдж/кг (10 000 ккал/кг).

Определить удельный расход условного топлива и расход топлива на 1 т годного.

Удельный расход условного топлива

$$a_1' = \frac{3600 \cdot 41,9 \cdot 100}{36000 \cdot 29,3} = 14,3\%.$$

Удельный расход топлива

$$a_2' = \frac{3600 \cdot 41,9}{36} = 4190 \text{ Мдж/т} \text{ (} 10^8 \text{ ккал/т)}.$$

При разработке организационно-технических мероприятий, направленных на уменьшение удельного расхода топлива, необходимо составить тепловой баланс печи. В качестве примера ниже приведен расчет теплового баланса нагревательной печи производительностью 55 т/ч при нагреве заготовки сечением 140 × 140 мм и длиной $l = 1,45$ м (материал — Ст.3) [6].

Тепловой баланс печи рассчитан Ю. Н. Розенгарт (табл. 61).

Из теплового баланса печи следует, что более половины тепла расходуется на потери тепла с уходящими газами и с охлаждающей глиссажные трубы водой, что в сумме составляет 64% от общего прихода тепла.

Из этого следует, что для уменьшения непроизводительных потерь тепла целесообразно установить рекуператор для подогрева воздуха до температуры не ниже 500° С и устройства для утилизации тепла горячей воды, уходящей из глиссажных труб.

Удельный расход электроэнергии зависит от многих факторов. Нормы расхода электроэнергии на единицу годной продукции устанавливают на основе анализа отдельных составляющих расхода и выбора рациональных режимов работы агрегатов.

При анализе энергетического баланса процессов прокатки необходимо учитывать влияние ряда технологических факторов на величину удельного расхода электроэнергии, к ним относятся: температура металла, число проходов при прокатке, сортамент стана, коэффициент вытяжки металла и тип стана. Влияние перечисленных факторов на удельный расход электроэнергии по данной работе [92] показано в виде графиков на рис. 129 и 130.

Большое влияние на расход электроэнергии оказывает отношение толщины полосы после прокатки к катающему диаметру ручья h/D_k , поэтому целесообразно прокатку вести с минимально допустимым для данного профиля диаметром валков.

Тепловой баланс печи (6)

Приходные статьи				Расходные статьи			
Наименование	10 ⁶ кдж/ч	10 ⁶ ккал/ч	%	Наименование	10 ⁶ кдж/ч	10 ⁶ ккал/ч	%
Тепло, выделившееся при сгорании топлива (общая тепловая мощность печи)	128,4	30,70	84,0	Тепло, усвоенное металлом при сгорании топлива	43,4	10,39	28,5
Физическое тепло воздуха	18,3	4,37	12,0	Тепло, усвоенное металлом при окислении железа	3,81	0,91	2,5
Тепло, выделившееся при окислении железа	6,18	1,48	4,0	Потери тепла с уходящими газами	66,3	15,85	43,4
				Потери тепла с охлаждающей водой	31,6	7,55	20,6
				Потери тепла через кладку	1,94	0,463	1,2
				Потери тепла через окна	0,302	0,072	0,2
				Потери тепла с окалиной	2,38	0,57	1,5
				Прочие потери	3,28	0,785	2,1
Итого	153,0	36,55	100	Итого	153,0	36,55	100

Весьма значительное влияние на удельный расход электроэнергии оказывает коэффициент использования прокатного стана, учитывающий неизбежные паузы между проходами изделия через валки, когда стан работает вхолостую:

$$k_{\text{исп}} = \frac{T_p}{T_o + T_p}, \quad (7-VII)$$

где T_p — время полезной работы стана;

T_o — время работы стана вхолостую.

Чем больше $k_{\text{исп}}$, тем выше производительность стана и меньше удельный расход электроэнергии.

Удельный расход электроэнергии

$$\gamma_{\text{эл}} = \frac{Q_{\text{эл}}}{\Pi} \text{ квт} \cdot \text{ч}/\text{т}, \quad (8-VII)$$

где $Q_{\text{эл}}$ — электроэнергия, затраченная за отчетный период работы прокатного стана;

Π — количество прокатанного металла за этот же отчетный период времени.

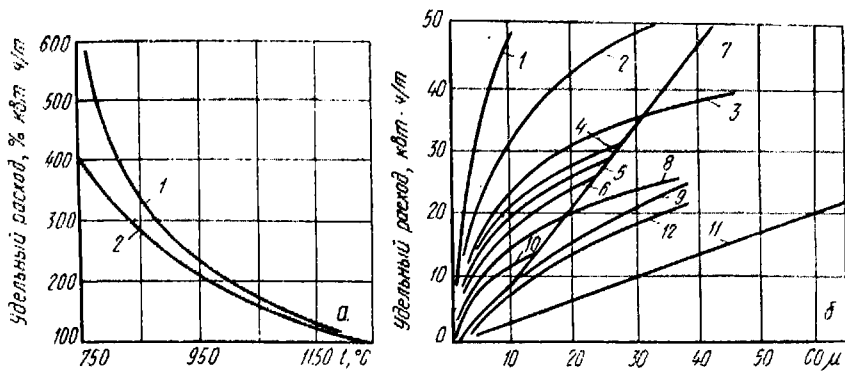


Рис. 129. Влияние технологических факторов на расход энергии:

а — температура (1 — сталь с 0,36% С; 2 — сталь с 0,18% С); б — сортament изделий (1 — тонкий лист; 2 — оброчное изделие; 3 — легкий прутья; 4 — балки; 5 — рельсы; 6 — швеллеры; 7 — тонкая проволока; 8 — сутунки; 9 — листы; 10 — заготовки; 11 — толстая проволока; 12 — круглые изделия); в — тип подшипника (1 — скольжения; 2 — роликовые)

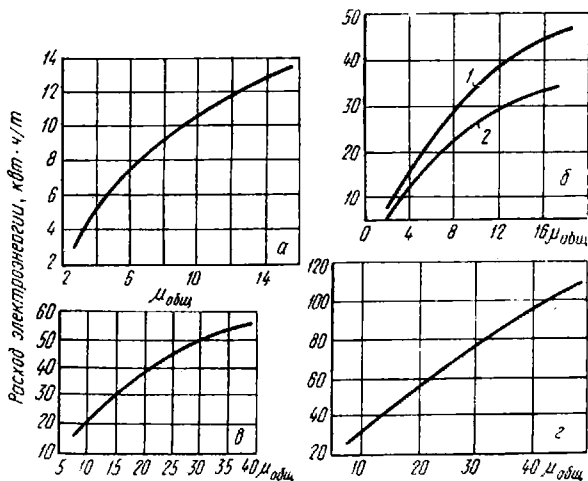
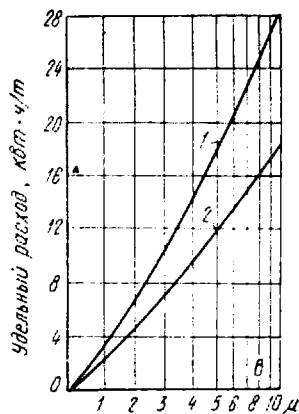


Рис. 130. Влияние суммарной вытяжки на расход электроэнергии в главном приводе станов: а — блюминг; б — рельсо-балочный стан (1 — двутавровые балки; 2 — рельсы); в — сортовой стан; г — толстолистовой стан

Уменьшение удельного расхода электроэнергии возможно, как видно из формулы (8-VII), за счет увеличения количества прокатанного металла, что достигается уменьшением времени полезной работы стана T_p на прокатку единицы изделия. Уменьшить T_p можно, уменьшив число проходов или увеличив скорость прокатки.

В табл. 62 показано изменение удельного расхода электроэнергии в зависимости от сменной производительности стана при прокатке канатной проволоки, биметалла и обода.

Таблица 62

Зависимость удельного расхода электроэнергии ($\gamma_{эл}$) от производительности (Π) прокатных станов [91]

Канатная проволока			Обод		
Π , т/смена	$\gamma_{эл}$. посад	$\gamma_{эл}$. год	Π , т/смена	$\gamma_{эл}$. посад	$\gamma_{эл}$. год
20—30	159,0	171,0	20—55	100	129
31—40	140,6	148,2	40—45	83,2	94
41—50	133,5	140,0	45—50	73,2	84
51—60	121,0	125,0	51—56	75	87
61—70	114,0	117,0	55—60	71,2	82,7
			60—65	68,1	76

Одним из элементов калькуляции себестоимости единицы прокатных изделий является расход валкового хозяйства за отчетный период работы прокатного цеха. Этот расход делят на выпуск товарной продукции и таким образом определяют удельный расход валков на одну тонну годных прокатных изделий в рублях или в $кг/т$. По практическим данным [2], удельный расход валков составляет, $кг/т$:

Блюминги:		Рельсо-балочные станы:	
1150	0,10	дуо	0,35
1000	0,12	трио	0,35
Обжимные станы	0,17—0,30	Крупносортовые станы	2,50

Естественно, чем меньше покупная стоимость валков, больше их стойкость и производительность прокатных станов, тем меньше будет удельный расход валков на единицу годных прокатных изделий. Валки должны обладать высокой стойкостью, т. е. свойством материала валков оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях их эксплуатации. Стойкость валков характеризуется продолжительностью их работы за кампанию или за весь срок службы до износа, определяемой величиной предельного размера рабочего диаметра (см. гл. V).

Значительное влияние на стойкость прокатных валков оказывают условия эксплуатации: интенсивность и ритмичность режима прокатки, что особенно важно при прокатке малопластичных

сталей. Необходимость обеспечить наиболее благоприятный для качества продукции нагрев металла (колебания температуры должны быть исключены).

Для увеличения срока службы стальных валков при их ремонтах (переточках) используют поверхностную закалку и наплавку валков. Для повышения коррозионно-усталостной прочности прибегают к упрочнению рабочих поверхностей валка методом накатки роликом с рифленой поверхностью [93].

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Производительность прокатного стана [85, 94] зависит от вида, формы и размеров изделий, марки стали и требований, которые предъявляются к готовому прокату. В расчетах принимают среднюю производительность, так называемую средневзвешенную часовую производительность:

$$A_{\text{ср}} = \frac{1}{\frac{1}{100} \left(\frac{a_1}{A_1} + \frac{a_2}{A_2} + \dots + \frac{a_n}{A_n} \right)} = \frac{100}{\frac{a_1}{A_1} + \frac{a_2}{A_2} + \dots + \frac{a_n}{A_n}}, \quad (9-VII)$$

где A_1, A_2, \dots, A_n — часовая производительность по каждому профилирующему размеру, включенному в программу стана, m ;

a_1, a_2, \dots, a_n — удельный вес отдельных видов продукции в программе работы стана, %.

Если известны масса слитков или заготовки Q , ритм или такт прокатки $T_{\text{ритм}}$ и коэффициент выхода годного m , можно определить часовую производительность стана:

$$A_{\text{в}} = \frac{3600}{T_{\text{ритм}}} Q m / \text{ч}; \quad A_{\text{г}} = \frac{3600}{T_{\text{ритм}}} Q \cdot m m / \text{ч} \quad \left. \right\} \quad (10-VII)$$

по всаду и годному соответственно.

В производственных условиях по разным причинам возможны перерывы в работе стана. В связи с этим вводят коэффициент использования стана ($\eta = 0,95 \div 0,96$), учитывающий эти потери времени. Тогда часовая производительность стана будет:

$$n_{\text{в}} = \eta Q \frac{3600}{T_{\text{ритм}}}; \quad n_{\text{г}} = \eta m Q \frac{3600}{T_{\text{ритм}}} \quad \left. \right\} \quad (11-VII)$$

по всаду и по годному соответственно.

Большие значения коэффициента η принимают для современных автоматизированных непрерывных и полунепрерывных станов и для обжимных станов с узким сортаментом. Значение $\eta = 0,9$ принимают для рельсо-балочных линейных сортовых и листовых станов с одной и двумя рабочими клетями.

Для определения ритма прокатки $T_{\text{ритм}}$ (промежуток времени от момента задачи полосы в чистовую клетку до момента задачи следующей полосы в эту же клетку и тот же калибр) строят график Адамецкого (рис. 131), где по горизонтали откладывают общее время прокатки, а по вертикали — номера клетей.

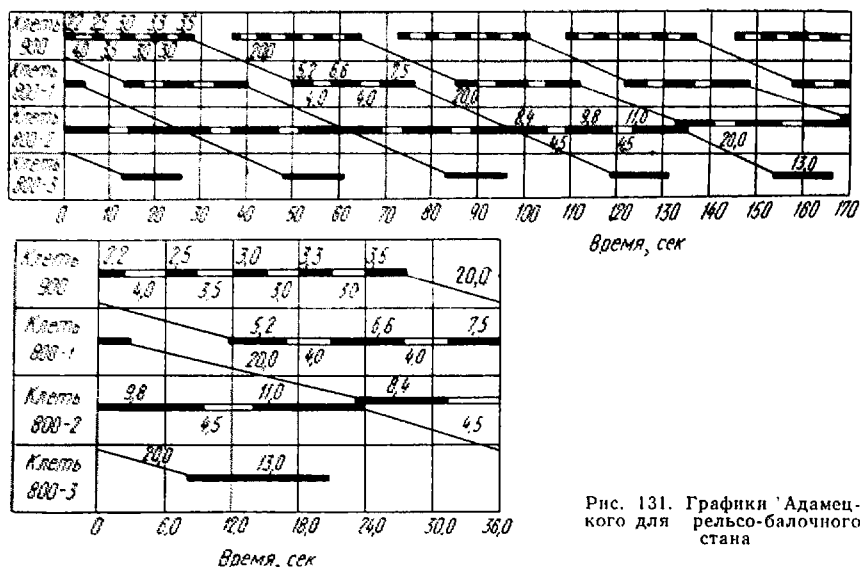


Рис. 131. Графики Адамецкого для рельсо-балочного стана

Общее время, затрачиваемое в одном проходе, включая время задачи металла в ручей, откладывают по горизонтали в виде полоски, причем машинное время заштриховывают, а вспомогательное (непроизводительное) не заштриховывают. Таким же образом отмечают время для второй, третьей и k -й клетей, а затем концы полосок соединяют тонкой линией. Время, затрачиваемое на прокатку одного раската, считая от задачи в первый калибр до выхода его из последнего калибра, называют *периодом прокатки*.

Одновременно в разных клетях и ручьях можно прокатывать несколько полос. Время одновременного или параллельного выполнения операций для двух полос называют *перекрытием*.

Ритм, или такт прокатки, можно определить как разность между периодом прокатки и перекрытием:

$$T_{\text{ритм}} = T_{\text{период}} - T_{\text{перекр}} \quad (12-VII)$$

Период прокатки

$$T_{\text{период}} = T_{\text{маш}} + T_{\text{ручн}} \quad (13-VII)$$

Машинное время $T_{\text{маш}}$ для станов с постоянной окружной скоростью валков

$$T_{\text{маш}} = \frac{60l_0F_0}{\pi D_k n F_n} = 19,1 \frac{l_0 \mu_{\text{общ}}}{D_k n}, \quad (14-VII)$$

где l_0 — длина заготовки или слитка;
 D_k — рабочий диаметр валков;
 F_0 и F_n — площади начального и конечного сечения заготовки или слитка;
 n — число оборотов валка в минуту;
 $\mu_{\text{общ}} = \frac{F_0}{F_n}$ — коэффициент вытяжки.

Время $T_{\text{ручн}}$ определяют по данным хронометража. Для определения годовой производительности стана необходимо знать номинальное и фактическое время работы стана за год.

$$HB = [KB - (BD + ПД + КР)] ЧС \cdot ДС; \quad (15-VII)$$

$$T_{\phi} = HB \left(1 - \frac{k_{\text{п}}}{100}\right), \quad (16-VII)$$

где HB — номинальное время;
 KB — календарное время;
 BD — выходные дни;
 $ПД$ — праздничные дни;
 $КР$ — простои на капитальный ремонт;
 $ЧС$ — число смен работы стана в сутки;
 $ДС$ — длительность смены;
 $k_{\text{п}}$ — учитываемые простои стана (см. табл. 62);
 T_{ϕ} — фактическое время работы стана за год.

Примерный баланс времени прокатных станов различных типов приведен в табл. 63 [85].

Режим работы технологического оборудования (нагревательных печей, пресс-ножниц, пил и вспомогательного оборудования) должен соответствовать режиму работы прокатного стана.

Определив часовую производительность стана по формуле (11-VII) и фактическое время работы стана T_{ϕ} по формуле (16-VII) и табл. 63, можно узнать производственную мощность или годовую производительность стана в год по всаду и по годному:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{маш. в}} &= HB \left(1 - \frac{k_{\text{п}}}{100}\right) \eta Q \frac{3600}{T_{\text{ритм}}}; \\ P_{\text{маш. г}} &= HB \left(1 - \frac{k_{\text{п}}}{100}\right) m \eta Q \frac{3600}{T_{\text{ритм}}}, \end{aligned} \right\} \quad (17-VII)$$

где $\eta = 0,95 \div 0,98$, а значения m см. в табл. 1.

Баланс времени прокатных станов [85]

Прокатные станы	График работы	Календарное число суток в год	Нерабочие дни				Номинальное время			Простой ¹		Фактическое число рабочих часов в год
			праздничные и выходные	капитальный ремонт	планово-предупредительные и текущие ремонты	всего	номинальное число суток	часов в сут-ки	часов в году	%	часов	
Блюминги, слябинги, непрерывно-заготовочные и крупносортовые	Непрерывный	365	6	15	24	45	320	24	7680	10	768	6912
Все станы, не перечисленные выше	Прерывный	365	6+52	7	В выходные дни	65	300	24	7200	10	720	6480
										5	360	6840

¹ По данным Ю. М. Чижикова [61] по продолжительности простоев станы разбивают на четыре группы: I — блюминги, слябинги, заготовочные станы, имеющие простой 8% от номинального времени, равного 8376 ч в год; II — непрерывные проволочные (простой 10% от номинального времени, равного 8250 ч в год); III — непрерывные и полунепрерывные среднесортные и мелкосортные с номинальным числом часов работы станы в год 8376, а также тонколистовые, среднелистовые универсальные и 3—5-клетевые станы холодной прокатки с номинальным числом часов работы 8100 (простой 12—13%); IV — рельсобалочные и крупносортовые станы имеют простой 18% от номинального времени, равного 8250 ч в год; более точные данные см. [94, с. 237].

Методика решения задач по определению производительности прокатных станов

Выше были приведены формулы для определения производительности нереверсивных прокатных станов с постоянной скоростью вращения валков. Несколько сложнее определить производительность реверсивных станов и станов, скорость валков которых за период прохода металла через калибр изменяется, как например у блюмингов и слябингов. Методика решения таких задач разработана М. Л. Зарощинским [1] и А. Ф. Метсом [94].

Для определения производительности блюминга при заданных условиях необходимо знать такт или ритм прокатки одного слитка:

$$T_{\text{такт}} = \sum T_{\text{маш}} + \sum \tau + i, \quad (18-VII)$$

где $\sum T_{\text{маш}}$ — суммарное машинное время, затраченное на прокатку одного слитка;

$\sum \tau$ — суммарное время пауз между проходами слитка во всех калибрах;

i — продолжительность паузы, необходимой для опускания верхнего валка до установления нормального зазора между буртами валков для прокатки следующего слитка в первом проходе.

Минимальное время одного прохода можно определить, если известны длина раската $l_n = \mu l_{n-1}$ (где μ — коэффициент вытяжки, а l_{n-1} — длина раската после предыдущего прохода) и скорость валков $v = \frac{\pi D_K n}{60}$.

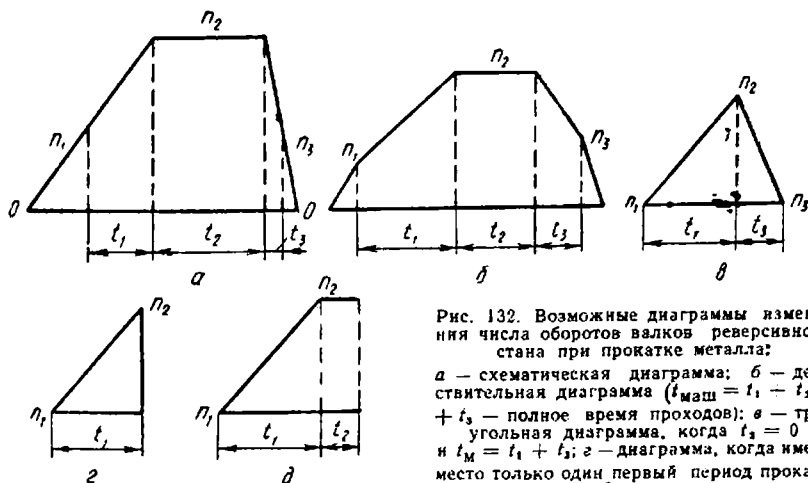


Рис. 132. Возможные диаграммы изменения числа оборотов валков реверсивного стана при прокатке металла:

a — схематическая диаграмма; $б$ — действительная диаграмма ($t_{\text{маш}} = t_1 + t_2 + t_3$ — полное время проходов); $в$ — треугольная диаграмма, когда $t_3 = 0$ и $t_{\text{м}} = t_1 + t_2$; $г$ — диаграмма, когда имеет место только один первый период прокатки, т. е. $t_{\text{м}} = t_1$; $д$ — диаграмма, когда наблюдается два периода прокатки t_1 и t_2 , т. е. $t_{\text{м}} = t_1 + t_2$.

На блюминге число оборотов валков n в течение одного прохода — величина переменная, а именно: n_1 — в период захвата металла валками, n_2 — в период прокатки и n_3 — в период выхода металла из валков. Возможные диаграммы изменения чисел оборотов валков реверсивного стана, к которым относится стан блюминг, приведены на рис. 132.

М. Л. Зарошинский [1] вывел следующие формулы для вычисления машинного времени $T_{\text{маш}}$, необходимого для прокатки одного слитка:

а) при трапецеидальном графике (см. рис. 132, б)

$$T_{\text{маш}} = \frac{19,1}{n_2} \cdot \frac{L}{D_K} + \frac{a+b}{2ab} \cdot \frac{(n_2 - n_1)^2}{n_2}; \quad (19-VII)$$

б) при треугольном графике (см. рис. 132, в)

$$T_{\text{маш}} = \frac{n_2 - n_1}{a} + \frac{n_2 - n_3}{b}; \quad (20-VII)$$

в) при графике, показанном на рис. 132, г:

$$T_{\text{маш}} = \frac{n_2 - n_1}{a}; \quad (21-VII)$$

г) при графике, показанном на рис. 132, д:

$$T_{\text{маш}} = \frac{19,1}{n_3} \cdot \frac{L}{D} + \frac{(n_2 - n_1)^2}{2an_3}, \quad (22-VII)$$

где D_k — катающий диаметр валков;

L — длина раската;

n_1 — число оборотов валков в период ускорения;

n_2 — максимальное число оборотов в период постоянной скорости валков;

n_3 — число оборотов в период замедления.

Для реверсивного электродвигателя $a = 20$ об/мин/сек и $b = 40$ об/мин/сек.

Особенно ответственным моментом при определении машинного времени является выбор скоростного режима работы реверсивного стана и величины максимального числа оборотов валков n_2 в период постоянной скорости валков.

М. Л. Зарощинский [1] при определении числа оборотов n_2 принял треугольную диаграмму изменения числа оборотов валков за период одного прохода слитка (см. рис. 132, е). Приняв скоростной режим прокатки, соответствующий треугольному графику (при $t_2 = 0$), М. Л. Зарощинский предлагает следующую формулу для определения n_2 :

$$n_2 = \sqrt{\frac{n_1^2 b + n_3^2 a + 38,2ab \frac{L}{D}}{a + b}}. \quad (23-VII)$$

Если принять $a = 20$ об/мин/сек и $b = 40$ об/мин/сек, то уравнение (23-VII) примет вид

$$n_2 = \frac{\sqrt{2n_1^2 + n_3^2 a + 1530 \frac{L}{D}}}{1,73}. \quad (24-VII)$$

$$\text{При } n_1 = n_3 \quad n_2 = \sqrt{n_1^2 + 510 \frac{L}{D}}. \quad (25-VII)$$

При работе по графику, приведенному на рис. 132, з:

$$n_2 = \sqrt{n_1^2 + 760 \frac{L}{D}}. \quad (26-VII)$$

При разных значениях n_2 и L/D машинное время можно определить по номограммам рис. 132, 133.

По данным А. А. Александрова [95], на блюминге при прокатке слитка для первого, второго и третьего проходов число оборотов валков в период постоянной скорости n_2 принимают равным 25 об/мин, а для последующих проходов n_2 определяют по формуле

$$n_2 = \sqrt{484L}, \quad (27-VII)$$

где L — длина раската после прохода.

Машинное время определяют по формуле (19-VII). Второе слагаемое этой формулы равно:

$$\frac{a+b}{2ab} \cdot \frac{(n_2 - n_1)^2}{n_2} = 0,005n_2.$$

Тогда формула (19-VII) примет вид:

$$T_{\text{маш}} = \frac{19,1}{n_2} \cdot \frac{L}{D_K} + 0,005n_2. \quad (28-VII)$$

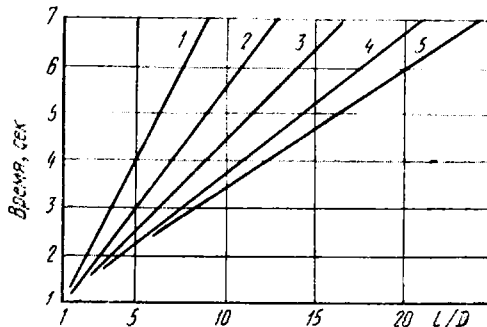


Рис. 133. Номограмма для определения машинного времени прокатки на реверсивном стане. Число оборотов n_2 , об/мин: 1 — 25; 2 — 37,5; 3 — 50; 4 — 60; 5 — 75

Продолжительность пауз $\sum \tau$ в соответствии с формулой (18-VII) принимаем равной 2 сек между проходами без кантовки и 4,5 сек — между проходами с кантовкой.

При современных скоростях вспомогательных механизмов блюминга можно принять следующую среднюю величину пауз при прокатке блюмов, сек [1]: 1,5 — без кантовки; 4,0—3,0 — с кантовкой и 4,5—6,0 — между слитками.

Продолжительность паузы на опускание верхнего вала до установления нормального зазора между буртами валков для прокатки следующего слитка в первом проходе определяют по формуле

$$i = \frac{H_1 - [(a-h) + \Delta]}{c_{\text{ср}}}, \quad (29-VII)$$

где H_1 — высота слитка после первого прохода;

a — высота блюма;

h — глубина калибра, в котором совершается последний проход;

Δ — нормальный зазор между буртами валков (обычно $\Delta = 10$ мм);

$c_{\text{ср}}$ — средняя скорость подъема верхнего вала, мм/сек.

Зная $\sum T_{\text{маш}}$, $\sum \tau$ и i , по формулам (17-VII) и (18-VII) и табл. 63 можно определить годовую производительность блюминга.

Задача № 146 [85]. Определить производительность дуо-реверсивного блюминга 1150, прокатывающего за 15 проходов слиток из спокойной стали массой $G = 7$ т в блюмы 250×250 мм. Кантовку раската производят после 2, 6, 10, 12 и 14-го проходов.

Известны основные данные калибровки валков и схема прокатки слитка до сечения 250×250 мм.

Решение. По схеме прокатки и основным данным калибровки валков (табл. 64).

Результаты расчетов к задаче № 146

Номер прохода	Коэффициент вытяжки μ	Длина раската по формуле $L_n = \mu L_{n-1}$	Катающий диаметр по данным калибровки D_k , мм	$\frac{L_n}{D_k}$	Число оборотов валков n_2 в минуту		Машинное время по формуле (28-VII)	Продолжительность паузы t_p , сек [1]
					по формуле (27-VII)	принятое для определения машинного времени		
1	1,100	2,2	1,045	2,10	—	25	1,75	1,5
2	1,136	2,5	1,045	2,40	—	25	1,96	4К
3	1,140	2,85	1,045	2,72	—	25	2,2	1,5
4	1,193	3,4	1,045	3,26	40,5	40	1,75	1,5
5	1,176	4	1,045	3,84	44,1	40	2,03	1,5
6	1,300	5,2	1,045	3,98	50,2	50	2,15	4К
7	1,125	5,85	0,965	6,07	53,5	50	2,56	1,5
8	1,128	6,60	0,965	6,84	56,5	55	2,65	1,5
9	1,151	7,6	0,965	7,88	60,7	60	2,81	1,5
10	1,184	9	0,965	9,32	66,0	65	3,10К	4К
11	1,111	10,03	0,965	10,40	69,6	65	3,37	1,5
12	1,115	11,3	0,965	11,71	73,9	70	3,39К	4К
13	1,256	12,6	0,965	13,10	78,1	75	3,70	1,5
14	1,166	14,7	0,965	15,23	84,3	80	3,04	4
15	1,041	15,30	0,975	15,70	86,0	85	3,93	—
Итого . . .							41,39	33,50

Такт прокатки одного слитка 79,49 сек

Примечание. По формуле (29-VII) величина

$$i = \frac{H_1 - [(a-h) + \Delta]}{c_{\text{ср}}} = \frac{645 - [(250 - 170) + 10]}{120} = 4,60.$$

1) длину раската после каждого прохода определяют как $L_n = \mu L_{n-1}$;

2) катающий диаметр валка берут из чертежа калибровки валков;

3) находят максимальное число оборотов валков n_2 за каждый проход по формуле (27-VII);

4) определяют машинное время за каждый проход и сумму этого времени за 15 проходов по формуле (28-VII);

5) по данным М. Л. Зароцинского [1] определяют продолжительность паузы;

6) задаются величиной паузы между проходами при прокатке слитка и определяют их сумму за 15 проходов $\sum t_p$;

7) находят такт прокатки одного слитка по формуле (18-VII).

Результаты расчетов по указанным формулам сведены в табл. 64.

Технически возможная часовая производительность стана по всаду определяют по формуле (11-VII):

$$n_{\text{в}} = \eta Q \frac{3600}{T_{\text{такт}}} = 0,95 \cdot 7 \frac{3600}{79,49} = 300 \text{ м/ч.}$$

Приняв для обычного блюминга, работающего по непрерывному графику, номинальное число часов в год 7680, величину простоев 10%, коэффициент использования стана за 1 ч фактической работы $\eta = 0,95$, выход годного 83%, ритм прокатки одного слитка $T_{\text{ритм}} = 79,49 \text{ сек}$ и массу слитка 7,0 т, определим годовую мощность стана по выпуску годной продукции по формуле (17-VII):

$$\begin{aligned} P_{\text{маш. г}} &= NB \left(1 - \frac{k_{\text{п}}}{100}\right) m \eta Q \frac{3600}{T_{\text{ритм}}} = \\ &= 7680 \left(1 - \frac{10}{100}\right) 0,83 \cdot 0,95 \cdot 7 \frac{3600}{79,49} = 1724 \text{ 360 м/год.} \end{aligned}$$

Годовая производительность стана по прокатке слитков

$$P_{\text{маш. в}} = \frac{1724 \text{ 360} \cdot 100}{83} = 2077 \text{ 542 м/год.}$$

Задача № 147 [85]. Определить производительность рельсобалочного стана по следующим данным. В состав стана входят две линии: первая — обжимная дуо-реверсивная клеть 900 мм; вторая — две клетки трио и одна дуо-реверсивная, приводимые от двух двигателей. Сортамент стана для расчета производительности: 60% рельсов Р-50 и 40% двутавровых балок № 40.

Исходную заготовку применяют массой 2,6 т для железнодорожных рельсов и 2,8 т — для балки. Стан работает по непрерывному графику. Фактическое время работы стана $N_{\text{ср}} = 7296 \text{ ч}$ (см. табл. 63).

На основании данных калибровки и графика Адамецкого имеем такты прокатки: $T_{\text{ритм}} = 51 \text{ сек}$ для железнодорожных рельсов и $T_{\text{ритм}} = 84 \text{ сек}$ для балки. Коэффициент выхода годного $m_1 = 93\%$ — по рельсам и $m_2 = 94\%$ — по балкам.

Решение. Технически возможная производительность стана по годовому:

при прокатке рельсов по формуле (11-VII)

$$n_{\text{г}}' = \eta \frac{3600}{T_{\text{ритм}}} Q m = 0,95 \frac{3600 \cdot 2,6 \cdot 0,93}{51} = 162 \text{ м/ч;}$$

при прокатке балок $n_{\text{г}}' = 0,95 \frac{3600 \cdot 2,8 \cdot 0,94}{84} = 107,4 \text{ м/ч.}$

Средневзвешенная часовая производительность стана по годовому при заданном сортаменте (9-VII)

$$A_{\text{ср}} = \frac{100}{\frac{a_1}{A_1} + \frac{a_2}{A_2}} = \frac{100}{\frac{60}{162} + \frac{40}{107}} = 134,4 \text{ м/ч.}$$

Годовая производительность стана при $T_{\text{ф}} = 7296 \text{ ч/мен}$ (см. табл. 63): $P = 134,4 \cdot 7296 = 980 \text{ 580 м/год.}$

Данный и все последующие расчеты считают предварительными, ориентировочными, так как в зависимости от местных условий производства коэффициент использования η , внутрисменные учитываемые простои и число часов фактической работы стана в год T_{ϕ} меняются в широких пределах. Коэффициент η , величина N_{ϕ} и внутрисменные учитываемые простои зависят от организации прокатного производства.

Задача № 148. Определить производительность стана 500 при прокатке угловой стали $75 \times 75 \times 8$ мм в количестве 40% (раскат 50 м, заготовка 256 кг) и рудничных рельсов 18 кг/м в количестве 60% от валового выпуска (раскат 49,8 м, заготовка 840 кг).

Стан 500 состоит из девяти рабочих дуо-неревверсивных клетей, расположенных последовательно по трем линиям прокатки: в первой линии — пять клетей с $D_k = 630$ мм; во второй линии — три клетки с $D_k = 530$ мм; в третьей линии — одна клеть с $D_k = 530$ мм.

Минимальное число оборотов в девятой клетке, на которой затрачивается наибольшее время на прокатку, $n_9 = 230$ об/мин.

Стан работает по прерывному графику. Фактическое время работы стана $N_{\phi} = 6840$ ч (см. табл. 63). Коэффициент выхода годного $m = 94\%$. Продолжительность паузы на передачу раската из восьмой в девятую клеть $i = 7,5$ сек. Расчет производят по девятой клетке.

Решение. При прокатке углового железа скорость прокатки в чистой клетке

$$v_9 = \frac{3,14 \cdot 0,53 \cdot 230}{60} = 6,3 \text{ м/сек.}$$

$$\text{Машинное время прокатки } T_{\text{маш}} = \frac{50}{6,3} = 8 \text{ сек.}$$

$$\text{Ритм прокатки } T_{\text{ритм}} = 8 + 7,5 = 15,5 \text{ сек.}$$

Технически возможная часовая производительность стана при прокатке углового железа

$$A_{\phi} = 0,95 \frac{3600}{15,5} \cdot 0,256 \cdot 0,94 = 53,0 \text{ т/ч.}$$

При прокатке рудничного рельса машинное время

$$T_{\text{маш}} = \frac{49,8}{6,3} \approx 7,9 \text{ сек.}$$

$$\text{Такт прокатки } T_{\text{ритм}} = 7,9 + 7,5 = 15,4 \text{ сек.}$$

Технически возможная часовая производительность по годовому при прокатке рельсов

$$A_{\phi} = 0,95 \frac{3600}{15,4} \cdot 0,84 \cdot 0,94 = 175,5 \text{ т/ч.}$$

Средневзвешенная часовая производительность стана по годовому при заданном сортаменте, согласно формуле (9-VII):

$$A_{\text{ср}} = \frac{100}{\frac{a_1}{A_1} + \frac{a_2}{A_2}} = \frac{100}{\frac{40}{53,0} + \frac{60}{175,5}} = 91 \text{ т/ч.}$$

Годовая производительность стана по годовому

$$П = 91 \cdot 6840 = 622\,440 \text{ т/год.}$$

Если по данным Ю. М. Чижикова [61] номинальное число часов в год для данного стана принять равным 8376 ч, а время простоев равным 13% от номинального времени, то годовая производительность стана

$$П = 91 \cdot 8376 (1 - 0,13) = 91 \cdot 7287 = 663\,000 \text{ т/год.}$$

Задача № 149. Определить производительность полунепрерывного стана 250 при прокатке круглой стали диаметром 9 мм из заготовки массой 136 кг в количестве 70% от всей программы и квадратной стали 16×16 мм из заготовки массой 394 кг в количестве 30% от программы.

Стан состоит из двух непрерывных групп (первая — шесть и вторая — две клетки) и четырех чистовых клетей, расположенных в линию.

Для круглой стали $d = 9$ мм, прокатываемой в три нитки, установлено, что больше всего времени, примерно 42 сек, затрачивается на прокатку в чистовой клетей, а для квадратной стали 16×16 мм, прокатываемой в две нитки, это время составляет 48 сек. Выход годного для обоих профилей $m_1 = m_2 = 96\%$.

Стан работает по прерывному графику $T_{\phi} = 6700$ ч.

Решение. Ритм прокатки:

$$\text{для круглой стали } T_1 = \frac{42}{3} = 14 \text{ сек,}$$

$$\text{для квадратной стали } T_2 = \frac{48}{2} = 24 \text{ сек.}$$

Технически возможная производительность при прокатке круглой стали:

$$A_{\phi} = \frac{3600}{T_1} Qm\eta = \frac{3600 \cdot 0,136 \cdot 0,96 \cdot 0,95}{14} = 32 \text{ т/ч,}$$

при прокатке квадратной стали

$$A_{\phi} = \frac{3600 \cdot 0,394 \cdot 0,96 \cdot 0,95}{24} = 53 \text{ т/ч.}$$

Средневзвешенная часовая производительность стана по годовому при заданном сортаменте равна:

$$A_{\text{ср}} = \frac{100}{\frac{70}{32} + \frac{30}{53}} = 36 \text{ т/ч.}$$

Годовая производительность стана по годовому

$$П = 36 \cdot 6700 = 241\,200 \text{ т/год.}$$

Определение пропускной способности вспомогательного оборудования: нагревательных печей, колодцев, режущих устройств (гильотинных, маятниковых, салазковых и летучих ножиц) и другого оборудования не представляет больших затруднений. Расчет пропускной способности вспомогательного прокатного оборудования рассмотрен в работах М. Л. Зарошинского [1], Ю. М. Чижикова [61] и А. И. Сероватина [85].

ЛИТЕРАТУРА

1. Зарошинский М. Л. Технологические основы проектирования прокатных станов. Металлургиздат, 1962.
2. Полухин П. И. и др. Прокатное производство. Изд-во «Металлургия», 1968.
3. Гинцбург Я. С., Андрацкий К. К. Прокатка качественной стали. Металлургиздат, 1953.
4. Ксензук Ф. А., Трощенко Н. А. Прокатка и отделка полосовой нержавеющей стали. Металлургиздат, 1963.
5. Прокатное производство (справочник), т. I и II. Металлургиздат, 1962.
6. Тайц Н. Ю., Розенгарт Ю. Н. Методические нагревательные печи. Металлургиздат, 1964.
7. Литовченко Н. В. и др. Калибровка валков сортовых станов. Металлургиздат, 1963.
8. Виноградов А. П., Виноградов Г. А. Калибровка прокатных валков. Металлургиздат, 1950.
9. Литовченко Н. В. Применение высоких обжатий на блюмингах. Металлургиздат, 1956.
10. Александров П. А. Принцип калибровки валков блюминга и условия деформации слитка. Труды НТО ЧМ, т. X. Металлургиздат, 1956, с. 326.
11. Малый С. А. Экономический нагрев металла. Изд-во «Металлургия», 1967.
12. Зуев М. И. и др. Пластичность стали при высоких температурах. Металлургиздат, 1954.
13. Тарновский И. Я. Механические свойства стали при горячей обработке давлением. Изд-во «Металлургия», 1966.
14. Чижиков Ю. М. Процесс обработки давлением легированных сталей и сплавов. Изд-во «Металлургия», 1965.
15. Тайц Н. Ю. Технология нагрева стали. Металлургиздат, 1962.
16. Мариенбах Л. М. Теория и конструкция нагревательных печей. Машгиз, 1940.
17. Справочник. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Изд-во «Энергия», 1967.
18. Теплофизические свойства веществ (справочник). ГЭИ, 1956.
19. Ицкович Н. М. Методы приближенных расчетов нагревательных печей. Металлургиздат, 1957.
20. Кулаков В. Ф., Плотников П. И. Сталь, 1961, № 11, с. 1035.
21. Кулаков В. Ф. Нагрев стали в печи. Металлургиздат, 1955.
22. Глинков М. А. Основы общей теории печей. Металлургиздат, 1962.
23. Мастеров В. А., Берковский В. С. Теория пластической деформации и обработка металла давлением. Изд-во «Металлургия», 1970.
24. Швейкин В. В., Тягунов В. А. Технология прокатного производства. Металлургиздат, 1956.
25. Чижиков Ю. М. Прокатка и ковка высоколегированных сталей. Металлургиздат, 1941.

26. Соок Р. М. J. of the Iron and Steel Inst. Strinder. XI, 3 с., 309—15, 1956.
27. Кутателадзе С. С., Боричанский В. М. Справочник по теплопередаче. Госэнергоиздат, 1959.
28. Стали с пониженным содержанием никеля (справочник). Металлургия, 1961.
29. Громов Н. П. Теория обработки металлов давлением. Изд-во «Металлургия», 1967.
30. Целиков А. И., Гришков А. И. Теория прокатки. Изд-во «Металлургия», 1970.
31. Смирнов В. С. Теория прокатки. Металлургия, 1967.
32. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов, т. 1—3. Metallurgizdat, 1961.
33. Гелен Ш. Расчет усилий и энергии при пластической деформации металлов. Metallurgizdat, 1958.
34. Губкин С. И. Теория обработки металлов давлением. Metallurgizdat, 1947.
35. Тарновский И. Я. Формоизменение при пластической обработке металлов. Metallurgizdat, 1954.
36. Тарновский И. Я. Теория обработки металлов давлением, 1963.
37. Чекарев А. П. и др. Теория продольной прокатки. Изд. ХГУ, 1965.
38. Павлов Иг. М. Теория прокатки. Metallurgizdat, 1950.
39. Павлов Иг. М. Основные положения современной теории прокатки. Труды НТО ЧМ, т. 10. Metallurgizdat, 1956, с. 12.
40. Кузнецов В. Д. ФТТ, 1947, т. 4, с. 386.
41. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. Физматгиз, 1962.
42. Томленов А. Д. Механика процессов обработки металлов давлением. Mashgiz, 1963.
43. Безухов Н. И. Примеры и задачи по теории упругости, пластичности и ползучести. Изд-во «Высшая школа», 1965.
44. Чертов А. Г. Международная система единиц измерений. Изд-во «Высшая школа», 1967.
45. Хилл Р. Математическая теория пластичности, ГИТЛ, 1956.
46. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. Оборонгиз, 1952.
47. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление деформации пластическим деформациям. Mashgiz, 1949.
48. Курош А. Г. Курс высшей алгебры. Изд-во «Наука», 1968.
49. Павлов Иг. М. Научные исследования. Труды Имет им. А. А. Байкова, ч. III, 1961, с. 13.
50. Протасов А. А. Калибровка валков для прокатки быстрорежущей стали. Metallurgizdat, 1956.
51. Зайков М. А. Режимы деформации и усилия при горячей прокатке. Metallurgizdat, 1960, с. 145.
52. Гуляев А. П. Металловедение. Металлургия, 1966.
53. Кащенко Н. А. Основы металловедения. Metallurgizdat, 1956.
54. Гудремон Э. Специальная сталь. Металлургия, 1966.
55. Штейнберг С. С. Металловедение. Металлургия, 1961.
56. Целиков А. И. Теория расчета усилий на прокатных станах. Metallurgizdat, 1962.
57. Победин М. С., Дрозд В. Г. Производство сортовой стали. Metallurgizdat, 1962.
58. Гуревич Д. Я. Сборник задач и упражнений по прокатке. Metallurgizdat, 1953.
59. Бахтинов Б. П., Штернов М. М. Калибровка прокатных станов. Metallurgizdat, 1953.
60. Грудев А. П. Материалы совещания по листопрокатному производству. Труды НТО ЧМ, т. 23. Metallurgizdat, 1960, с. 353.
61. Чижигов Ю. М. Прокатное производство. Metallurgizdat, 1958.
62. Павлов Иг. М., Галлай Я. С. Оперение при прокате. ОНТИ, 1936.
63. Бахтинов Б. П. Прокатное и трубное производство. Приложение к журналу «Сталь», Metallurgizdat, 1958, с. 10.

64. Штернов М. М. Расчеты технологических параметров горячей прокатки. Металлургиздат, 1961.
65. Чижигов Ю. М. Сталь, 1948, № 11, с. 989.
66. Головин А. Ф. Прокатка, ч. III. Калибровка. ОНТИ, 1936.
67. Королев А. А. Механическое оборудование прокатных станов. Металлургиздат, 1969.
68. Целиков А. И. Прокатные станы. Metallurgizdat, 1946.
69. Крейндли Н. Н. Расчет обжатий при прокатке. Metallurgizdat, 1963.
70. Третьяков А. А., Радченко К. М. Изменение механических свойств металлов и сплавов при холодной прокатке. Metallurgizdat, 1960.
71. Голубев Г. М. и др. Сталь, 1957, № 2, с. 141.
72. Валквист Г. Исследование энергосиловых параметров при горячей прокатке. Metallurgizdat, 1957.
73. Протасов А. А. Калибровка прокатных станов. Metallurgizdat, 1963.
74. Чекмарев А. П., Нефедов А. А. Технический прогресс в прокатном производстве. Изд-во «Металлургия», 1968.
75. Дномидов Б. Б., Литовченко Н. В. Калибровка прокатных валков. Изд-во «Металлургия», 1970.
76. Целиков А. И. Основы теории прокатки. Изд-во «Металлургия», 1965.
77. Вусатовский З. Основы прокатки. Изд-во «Металлургия», 1967.
78. Кучко И. И. Труды НТО ЧМ, т. 10, Metallurgizdat, 1956, с. 387.
79. Хофф Х., Даль Т. Прокатка и калибровка. Metallurgizdat, 1957.
80. Литовченко Н. В. Труды НТО ЧМ, т. 23. Metallurgizdat, 1960, с. 119.
81. Штернов М. М. Калибровка угловой стали. Metallurgizdat, 1961.
82. Гуревич А. Е., Рокотян Е. С. Методы исследования прокатных станов. Metallurgizdat, 1957.
83. Доронин В. М. Термическая обработка углеродистой и легированной стали. Metallurgizdat, 1955.
84. Стукач А. Г. Расчет охлаждения металла при горячей прокатке. Сталь 1955, № 7, с. 626.
85. Сероватин А. И. Методика расчета оборудования прокатных цехов. Изд-во «Металлургия», 1970.
86. Павлов Иг. М. Теория прокатки и основы пластической деформации металлов. ГОНТИ, 1938.
87. Жадан В. Т., Стефанов В. Б. Эффективный способ прокатки фасонных профилей. Изд-во «Металлургия», 1970.
88. Протасов А. А. Прокатка сортовых профилей (справочное руководство). Metallurgizdat, 1964.
89. Гунин И. В. и др. Экономия металла при производстве сортового проката. Изд-во «Техника», 1969.
90. Беда Н. И. Пути снижения расхода металла в прокатных цехах. Metallurgizdat, 1960.
91. Метс А. Ф. Эффективность новой технологии в прокатном производстве. Изд-во «Металлургия», 1968.
92. Руководящие указания по нормированию удельных расходов электроэнергии. Metallurgizdat, 1959.
93. Безнос М. П. Валки крупносортовых и рельсобалочных станов. Изд-во «Металлургия», 1966.
94. Метс А. Ф. Организация производства в прокатных цехах. Изд-во «Металлургия», 1969.
95. Александров А. А. Блюминги и слабинги. Изд. АН СССР, 1942, с. 232.