

Д. И. СУЯРОВ, Л. Г. ЧУБРИКОВ, М. И. СИРОТИН

### НОМОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ОБЖАТИИ ПРИ ПРОКАТКЕ ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ

Согласно определению В. А. Тягунова [1], оптимальным режимом обжатий является тот, прокатка по которому происходит с полным использованием энергопрочностных возможностей стана. Для расчета оптимального режима обжатий из условия ограничения обжатия прочностными характеристиками стана В. А. Тягуновым предложена номограмма. При расчетах обжатий по ней не учитывается, однако, влияние внешних зон на удельное давление, что ведет к значительному завышению обжатий в некоторых пропусках. Кроме того, номограмма В. А. Тягунова построена для листового стана с определенным диаметром рабочих валков, что делает невозможным применение ее для станков с валками других диаметров. Этот недостаток номограммы можно исправить, приняв в качестве единицы измерения линейных размеров радиус валка, как предложил Б. Н. Бухвалов [4].

Для расчета обжатий по допустимому моменту прокатки В. А. Тягунов предложил две номограммы, которые позволяют по заданным значениям допустимого момента  $M_{дп}$  и удельного давления  $p$  определять обжатие при любых диаметрах рабочих валков и для двигателя любой мощности [3]. В этих номограммах влияние внешних зон также не учитывается.

В основу наших номограмм, свободных от недостатков, положено уравнение связи удельного давления и сопротивления деформации для широкого диапазона значений геометрического фактора формы зоны деформации, встречающихся при прокатке толстых листов, т. е. для

$$0,1 < \omega = \sqrt{\frac{tr \Delta h}{h_{i-1} h_i}} < 2,5,$$

где  $r$  — радиус рабочего валка;  
 $\Delta h_i = h_{i-1} - h_i$  — обжатие в  $i$ -том пропуске;  
 $h_{i-1}$  — входная толщина раската в  $i$ -том пропуске;  
 $h_i$  — выходная толщина раската в этом пропуске.

Уравнение связи получено на основании обобщения результатов исследований ряда авторов. В технической литературе имеется несколько предложений, касающихся представления

функции формы зоны деформации (коэффициента напряженного состояния)  $\varphi(\omega)$  посредством эмпирических и полуэмпирических формул и графиков<sup>1</sup>.

В. А. Тягунов [1] использует формулу А. Ф. Головина [2]

$$\varphi(\omega) = 1 + \frac{1}{3}(\omega - 1)$$

для  $\omega > 1$ ; при  $\omega < 1$  он считает  $\varphi(\omega) = 1$ .

А. И. Целиков и В. В. Смирнов [5] на основании опытов сжа-

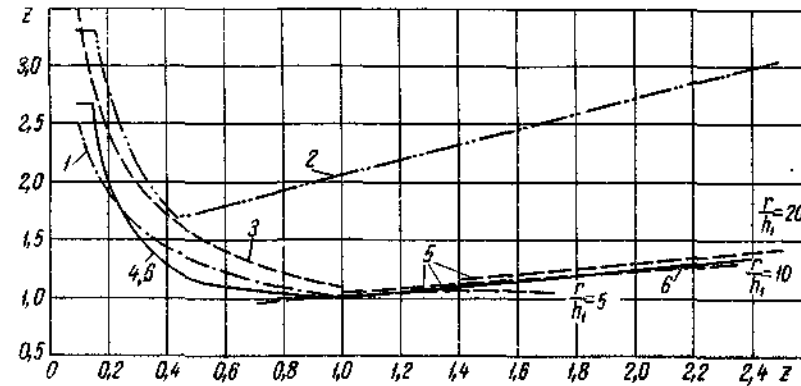


Рис. 1. Зависимость  $f(Z)$  по данным:

1 — А. И. Целикова и В. В. Смирнова [5]; 2 — Д. И. Пирязева и П. А. Александрова [6]; 3 — И. Я. Тарновского и В. П. Котельникова [7]; 4 — М. Я. Бровмана [8]; 5 — Р. Б. Симса [10]; 6 — В. М. Луговского и В. Ф. Потапкина [9]; 6' — А. Ф. Головина — В. А. Тягунова

тия параллелепипедов с жесткими концами и без них предложили для  $\omega < 1$  эмпирическую формулу

$$\varphi(\omega) = \omega^{-0.4}$$

Д. И. Пирязев и П. А. Александров [6] нашли следующие эмпирические зависимости:

$$\varphi(\omega) = 3,3 \text{ при } \omega < 0,167;$$

$$\varphi(\omega) = 0,7 + 0,44 \frac{1}{\omega} \text{ при } 0,167 \leq \omega \leq 0,455;$$

$$\varphi(\omega) = 1 + 1,04\omega \text{ при } \omega \geq 0,455.$$

И. Я. Тарновский и В. П. Котельников [7] при помощи вариационных принципов вывели формулу (для  $\omega \leq 1$ )

$$\varphi(\omega) = 1,1\omega^{-0.5},$$

М. Я. Бровман [8], используя метод построения поля линий скольжения, разработанный Хиллом, дал графическое выражение функции  $\varphi(\omega)$  для значений  $\omega$  от 0 до 1.

В работе В. М. Луговского и В. Ф. Потапкина [9] аналогич-

<sup>1</sup> Все формулы даны в наших обозначениях.

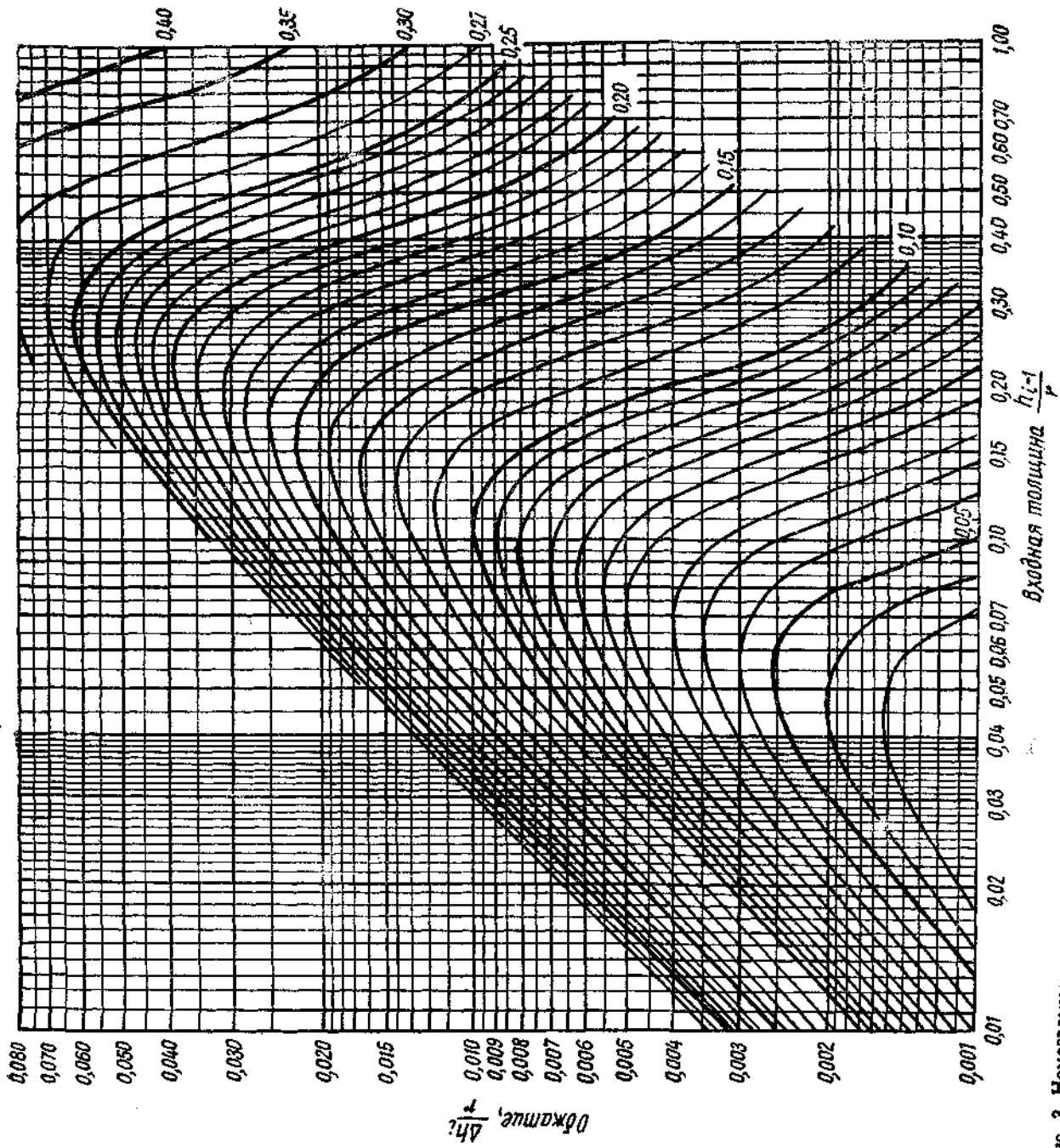


Рис. 3. Номограмма для определения величины обжатия из условия наибольшего допустимого момента прокатки

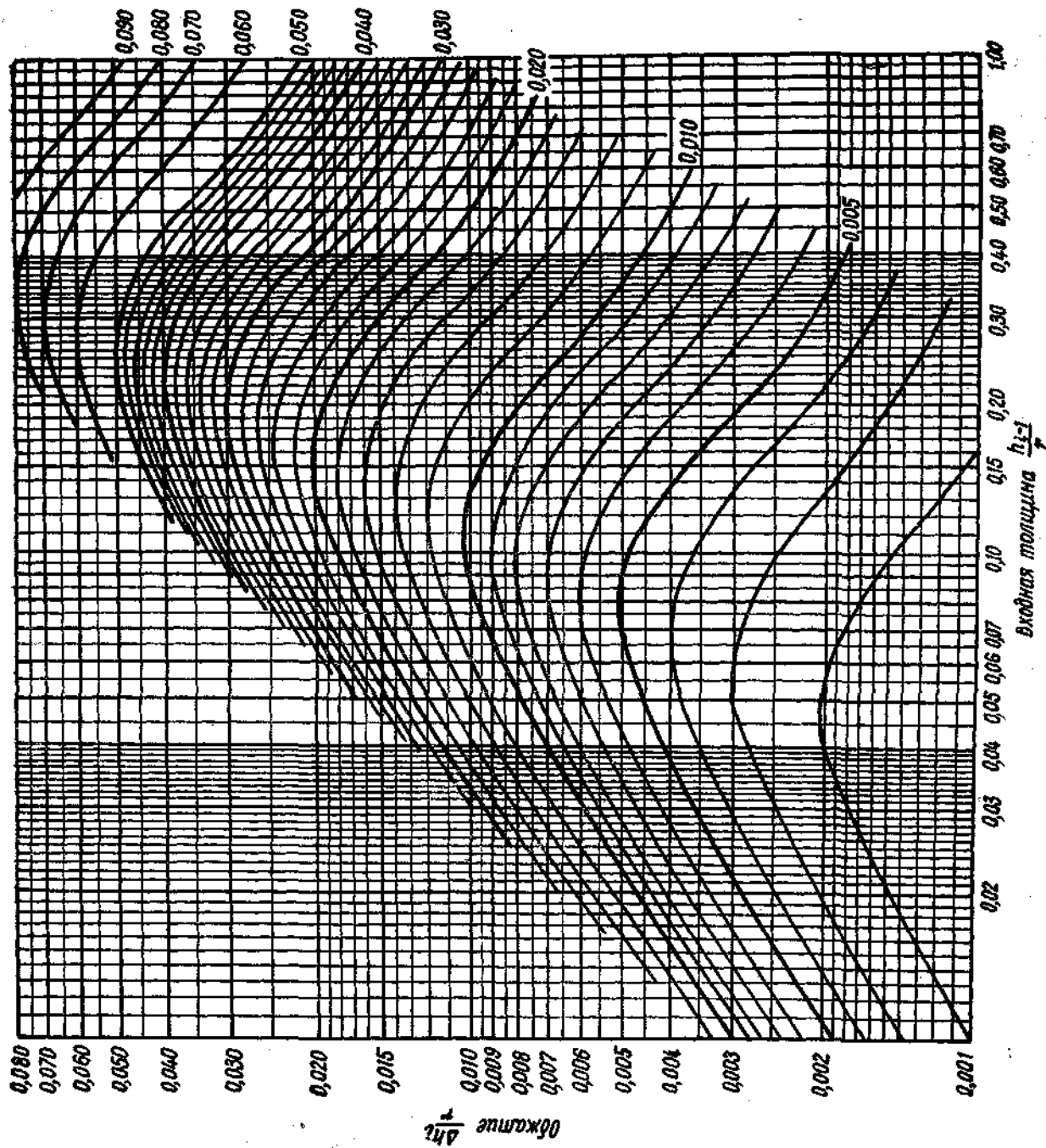


Рис. 4. Номограмма для определения величины обжатия из условия наибольшего допустимого усадки проката

ный расчет выполнен для более широкого диапазона  $\omega$  — от 0,1 до 2,6.

Р. Б. Симс [10], используя теорию Орована, рассчитал значения функции  $\varphi(\omega)$  для  $\omega > 1$  при разных отношениях  $r/h$ .

Как показано на рис. 1, все предложения, касающиеся функции  $\varphi(\omega)$ , за исключением формул Д. И. Пирязева, изображаются сходными графиками.

При факторе формы  $\omega < 1$  графики М. Я. Бровмана и В. М. Луговского полностью совпадают. Довольно близко к ним расположена кривая, выражающая формулу А. И. Целикова. При  $\omega > 1$  близко расположены графики А. Ф. Головина, В. М. Луговского и Р. Б. Симса (для  $r/h > 10$ ).

Исходя из приведенных данных, функцию влияния зоны деформации для интервала от 0,1 до 2,5 можно выразить в виде простой эмпирической формулы

$$\varphi(\omega) = 0,32 \left( 1 + \frac{1}{\omega} + 1,25\omega \right). \quad (1)$$

Усилие при прокатке толстых листов, когда допустимо пренебречь уширением заготовки и наличием упругого сплющивания валков, равно

$$P = bp \sqrt{r \Delta h}, \quad (2)$$

где  $b$  — ширина листа;

$r$  — радиус валка;

$\Delta h$  — обжатие;

$p$  — удельное давление.

Момент прокатки, без учета потерь на трение в подшипниках,

$$M = 2rb \psi p \Delta h \quad (3)$$

выражается через те же величины, что и усилие прокатки. Кроме того, в выражение момента входит коэффициент  $\psi$ , определяющий точку приложения усилия прокатки на дуге захвата.

По исследованиям Е. С. Рокотяна [11] коэффициент  $\psi$ , так же как и удельное давление, зависит от геометрического фактора  $\omega$ . Результаты исследований Е. С. Рокотяна, а также Эмике и Лукаш [12] показаны в виде графика (рис. 2). Для интервала  $\omega$  от 0,1 до 2,5, который встречается при прокатке толстых листов, коэффициент  $\psi$  меняется от 0,60 до

0,40, а в среднем его принимают обычно равным 0,5. Если такое допущение считают слишком грубым, то поступают следующим образом. Определив величину обжатия при  $\psi = 0,5$ , находят гео-

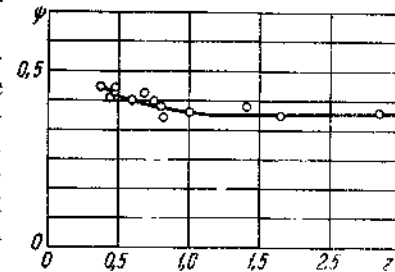


Рис. 2. Зависимость  $\psi(Z)$  по данным Е. С. Рокотяна [11]

метрический фактор  $\psi$ , по которому, согласно графику (см. рис. 2), отыскивают значение  $\varphi(\psi)$ . Это значение и принимают для окончательного вычисления величины обжатия.

Уравнения (1), (2) и (3) используем для расчета оптимального режима обжатий. Уравнение (2) для некоторого  $i$ -того пропуска

$$P_i = b_i \cdot 1,15 \bar{\sigma}_i \cdot 0,32 \left[ 1 + \sqrt{\frac{h_{i-1} (h_{i-1} - \Delta h_i)}{r \Delta h_i}} + 1,25 \sqrt{\frac{r \Delta h_i}{h_{i-1} (h_{i-1} - \Delta h_i)}} \right] \sqrt{r \Delta h_i}$$

преобразуем так, чтобы правая часть его стала функцией только геометрических размеров зоны деформации, причем в качестве единицы измерения этих размеров примем радиус вала, т. е.

$$Q_{P_i} = \frac{P_i}{1,15 \bar{\sigma}_i b r} = 0,32 \left[ 1 + \sqrt{\frac{h_{i-1} (h_{i-1} - \frac{\Delta h_i}{r})}{\frac{\Delta h_i}{r}}} + 1,25 \sqrt{\frac{\frac{\Delta h_i}{r}}{h_{i-1} (h_{i-1} - \frac{\Delta h_i}{r})}} \right] \sqrt{\frac{\Delta h_i}{r}} \quad (4)$$

Решение уравнения (4) в форме зависимости  $\frac{\Delta h_i}{r} = f_1 \left( \frac{h_{i-1}}{r} \right)$

для разных значений  $Q_{P_i}$  изображено на рис. 3 семейством кривых, построенных в логарифмической системе координат. Графики рассчитаны для области значений  $\psi$  от 0,1 до 2,5 при условии, что вытяжка за один пропуск  $\lambda_i = h_{i-1} : h_i \leq 1,5$ .

Левая часть уравнения (4) представляет собой безразмерный параметр. В случае равенства усилия прокатки предельно допустимому усилию  $P_i = P_{дп}$  этот параметр является критерием, определяющим наибольшее обжатие из условия прочности валков.

Подставляя значение  $\varphi(\psi)$ , согласно (1), в уравнение (3) и выполняя преобразования, аналогичные тем, которые применялись при выводе уравнения (4), находим

$$Q_{M_i} = \frac{M_i}{1,15 \bar{\sigma}_i 2 \psi_i b_i r^2} = 0,32 \left[ 1 + \sqrt{\frac{h_{i-1} (h_{i-1} - \frac{\Delta h_i}{r})}{\frac{\Delta h_i}{r}}} + 1,25 \sqrt{\frac{\frac{\Delta h_i}{r}}{h_{i-1} (h_{i-1} - \frac{\Delta h_i}{r})}} \right] \sqrt{\frac{\Delta h_i}{r}}$$

$$+ 1,25 \sqrt{\frac{\frac{\Delta h_i}{r}}{h_{i-1} (h_{i-1} - \frac{\Delta h_i}{r})}} \left] \frac{\Delta h_i}{r} \quad (5)$$

Решение уравнения (5) в форме зависимости  $\frac{\Delta h_i}{r} = f_2 \left( \frac{h_{i-1}}{r} \right)$  изображено на рис. 4 также в виде семейства кривых в логарифмической системе координат. Эти кривые отличаются друг от друга величиной  $Q_{M_i}$ . Графики рассчитаны для значений области  $\psi$ , ограниченной теми же условиями, что и для уравнения (4).

Левая часть уравнения (5) представляет собой безразмерный параметр. Задавая  $M_i = M_{дп}$ , превращаем этот параметр в критерий, определяющий наибольшее обжатие из условия прочности шпинделей, редуктора и мощности двигателя.

Величина обжатия в первых пропусках ограничивается иногда не усилиями и моментами прокатки, а условиями захвата металла валками. При этом решающее значение имеет «удар», который возникает в шпинделе и редукторе в результате мгновенного появления нагрузки при входе металла в валки. На основании практических данных наибольшее обжатие на номограммах (см. рис. 3 и 4) принято равным  $\frac{\Delta h_i}{r} = 0,080$ , что соответствует углу захвата  $\pi/12$  рад. В зависимости от способа прокатки и конструкции стана, наибольшее обжатие может быть другим, меньшей величины. Поэтому безразмерный параметр

$$Q_{a_i} = \frac{\Delta h_a}{r},$$

характеризующий величину наибольшего допустимого обжатия по условиям захвата, следует рассматривать в качестве еще одного, третьего критерия, влияющего на выбор оптимального режима обжатий.

Режим обжатий, рассчитанный по приведенной выше методике, является оптимальным, так как соответствует процессу прокатки при полном использовании энергосиловых возможностей стана с учетом условий захвата. Прокатка по такому режиму осуществляется в наименьшее число пропусков.

Для того чтобы рассчитать оптимальный режим обжатий, требуется знать паспортные данные стана, размеры заготовки и готового листа и величину сопротивления металла деформации в каждом пропуске. Порядок проведения расчета показан на следующем примере.

**Пример.** Рассчитать оптимальный режим обжатий прокатки листа  $20 \times 2100$  мм (до обрезки кромок) из слитка массой 5,5 Мг стали марки 09Г2 на стане 3500 с диаметром рабочих валков

980 мм. Слиток имеет форму прямоугольной усеченной пирамиды с размерами  $(410 \times 1000) : (450 \times 1115) \times 1380$  мм.

Наибольшее усилие прокатки из условия прочности валков и деталей клетки  $P_{дп} = 24,50$  Мн, наибольший момент прокатки из условия мощности двигателя, прочности редуктора и шпинделей  $M'_{дп} = 2,16$  Мн·м. Допустимый момент деформации (момент на валках)

$$M_{дп} = M'_{дп} - M_{тр},$$

где  $M_{тр} = P \mu d_{шк}$ ;

$\mu$  — коэффициент трения в подшипниках;

$d_{шк}$  — диаметр шейки валка.

Примем  $M_{тр}$  из условия  $P = P_{дп}$ , т. е.  $M_{тр} = P_{дп} \mu d_{шк}$ .

При  $d_{шк} = 680$  мм и, если принять  $\mu = 0,01$ ,  $M_{дп} = 2,16 - 24,50 \cdot 0,01 \cdot 0,680 = 1,99$  Мн·м. В этом случае допустимый момент деформации получается с некоторым запасом.

Коэффициент жесткости клетки  $c = 2,94$  Мн/мм.

Сопrotивление деформации прокатываемого металла изменяется в процессе прокатки по графику, приведенному на рис. 5.

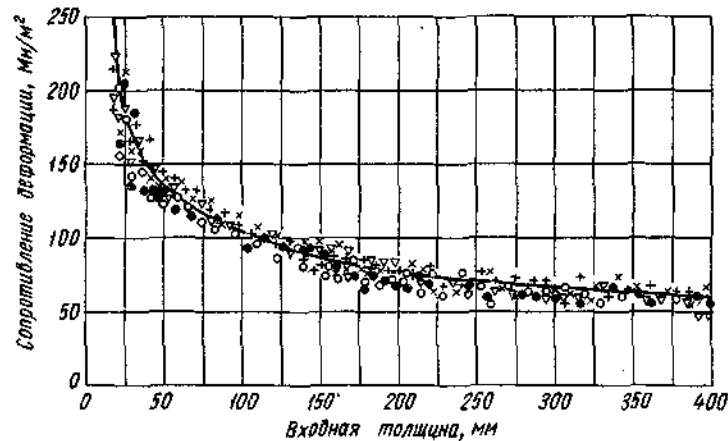


Рис. 5. Изменение сопротивления деформации стали марки 09Г2 в процессе прокатки листа толщиной 20 мм из слитка массой 5,3 Мг (по данным прокатки пяти слитков)

В первом пропуске имеем  $h_0 = 450$  мм,  $b_1 = 1115$  мм (для толстого конца слитка),  $\sigma_1 = 55,8$  Мн/м<sup>2</sup> (см. рис. 5). Для этих данных по уравнению (4) находим

$$Q_{P_i} = \frac{24,50}{1,15 \cdot 55,8 \cdot 1,115 \cdot 0,490} = 0,7,$$

откуда допустимое обжатие по условию прокатки, согласно номограмме на рис. 3 (при  $\frac{h_0}{r} = \frac{450}{490} = 0,92$ ), составляет  $\left(\frac{\Delta h_1}{r}\right)_{P_i} > 0,08$  или  $\Delta h_{P_i} > 39$  мм.

Для тех же данных, полагая  $\psi = 0,5$ , по уравнению (5) находим

$$Q_{M_i} = \frac{1,99}{2 \cdot 1,15 \cdot 0,5 \cdot 55,8 \cdot 1,115 \cdot 0,490^2} = 0,113,$$

откуда допустимое обжатие по моменту прокатки, согласно номограмме на рис. 4 (при  $\frac{h_0}{r} = \frac{450}{490} = 0,92$ ), составляет  $\left(\frac{\Delta h_1}{r}\right)_{M_i} = 0,067$  или  $\Delta h_{M_i} = 33$  мм. Фактор формы при  $\Delta h = 33$  мм имеет величину, равную

$$\omega = \sqrt{\frac{r \Delta h_1}{h_0 h_1}} = \sqrt{\frac{490 \cdot 33}{450 \cdot 427}} = 0,29,$$

которой на кривой рис. 2 соответствует  $\psi = 0,58$ , вместо  $\psi = 0,5$ , принятого первоначально.

При  $\psi = 0,58$  по уравнению (5) находим

$$Q_{M_i} = \frac{1,99}{2 \cdot 1,15 \cdot 0,58 \cdot 55,8 \cdot 1,115 \cdot 0,490^2} = 0,097,$$

откуда допустимое обжатие по моменту прокатки (при более точном значении  $\psi$ ), согласно номограмме на рис. 4 (при  $\frac{h_0}{r} = \frac{450}{490} = 0,92$ ), составляет  $\left(\frac{\Delta h_1}{r}\right)_{M_i} = 0,057$  или  $\Delta h_{M_i} = 28$  мм. Эта величина обжатия, как показывают дополнительные расчеты, является уже достаточно точной.

Безразмерный параметр, характеризующий величину наибольшего возможного обжатия по условиям захвата, для рассматриваемого стана, по данным производственного опыта, равен 0,043. В соответствии с уравнением (6)  $\Delta h_a = Q_a \cdot r = 0,043 \times 490 = 21$  мм (для всех пропусков).

В результате расчетов для первого пропусков получены следующие обжатия:  $\Delta h_{P_i} = 39$  мм по условию прокатки;  $\Delta h_{M_i} = 28$  мм по моменту прокатки;  $\Delta h_a = 21$  мм по условию захвата. Из этих обжатий возможным обжатием является наименьшее, т. е.  $\Delta h_a = 21$  мм. Однако практика производства на рассматриваемом стане показала, что величина обжатия для первых пропусков должна быть значительно меньше, чтобы избежать «вкатывания» окалины, так как на стане отсутствует гидросбыв. Поэтому выберем для первого пропусков обжатие  $\Delta h_1 = 10$  мм. При таком обжатии энергопрочностные возможности стана используются, конечно, неполностью, так как возникающие в этом случае усилие и момент прокатки меньше допустимых.

Найдем величину усилия прокатки при обжатии  $\Delta h = 10$  мм, так как она требуется для определения раствора валков с учетом упругой деформации клетки. Имеем следующие исходные данные:  $\frac{h_0}{r} = \frac{450}{490} = 0,92$ ;  $\frac{\Delta h_1}{r} = \frac{10}{490} = 0,02$ ;  $\sigma_1 = 55,8$  Мн/м<sup>2</sup>;

28 Рациональный режим обжатий для прокатки листа 20×2100 (на слитка весом 5,5 т марки стали 09Г2 на стане 3500 НТМК)

Порядок пропуск <i>l</i>	Способ прокатки	Ширина <i>b<sub>l</sub></i> , мм	Входная толщина, мм		Средняя длина деформации <i>l<sub>д</sub></i> , мм/м <sup>2</sup>	Заданное обжатие, мм		Возможное обжатие <sup>1</sup>		Выбранное обжатие, мм		Выходная толщина, мм		Расход валков, мм <i>S<sub>l</sub></i>	<i>a</i> Усилие прокатки Мн	
			<i>h<sub>l-1</sub></i>	$\frac{h_{l-1}}{r}$		$\Delta h_l$	$\frac{\Delta h_l}{r}$	$\left(\frac{\Delta h_l}{r}\right)_p$	$\left(\frac{\Delta h_l}{r}\right)_M$	$\frac{\Delta h_l}{r}$	$\Delta h_l$	<i>h<sub>l</sub></i>	$\frac{h_l}{r}$			
1	Вдоль	1115	460	0,92	55,8	10	0,02	0,08	0,057	0,02	10	440	0,90	436	12,25	
2			440	0,90	55,8	10	0,02	0,08	0,057	0,02	10	430	0,88	426	12,25	
3			430	0,88	56,8	10	0,02	0,08	0,057	0,02	10	420	0,86	416	12,25	
4*			420	0,86	57,8	10	0,02	0,08	0,057	0,02	10	410	0,84	406	12,25	
5	На угол	1790	410	0,84	58,8	—	—	0,08	0,030	0,030	14,7	395,3	0,81	388,3	20,60	
6			395,3	0,81	58,8	—	—	0,08	0,031	0,031	15,2	380,1	0,78	373,3	20,10	
7			380,1	0,78	59,8	—	—	0,08	0,031	0,031	15,2	364,9	0,75	358,5	18,60	
8			364,9	0,75	59,8	—	—	0,08	0,032	0,032	15,7	349,2	0,71	342,7	19,10	
9			349,2	0,71	60,8	—	—	0,03	0,033	0,033	15,2	333,0	0,68	326,3	19,60	
10			333,0	0,68	61,7	—	—	0,03	0,033	0,033	16,2	313,8	0,65	310,3	19,10	
11			316,8	0,65	62,7	12	0,025	0,03	0,034	0,025	12,0	304,8	0,62	298,8	17,65	
12			304,8	0,62	63,7	11,8	0,024	0,03	0,034	0,024	11,8	293,0	0,60	287,0	17,65	
13			2420	293	0,60	64,7	—	—	0,026	0,022	0,022	10,8	282,2	0,58	274,4	23,00
14				282,2	0,58	65,7	—	—	0,027	0,022	0,022	10,8	271,4	0,55	263,6	23,00
15				271,4	0,55	65,7	—	—	0,034	0,023	0,023	11,3	260,1	0,53	252,3	23,00
16				260,1	0,53	66,6	—	—	0,036	0,024	0,024	11,7	248,4	0,51	240,7	22,50
17	248,4	0,51		67,6	—	—	0,037	0,026	0,026	12,7	235,7	0,48	228,0	22,50		
18	235,7	0,48		68,6	9,0	0,0184	0,040	0,026	0,0184	9,0	226,7	0,46	219,5	21,10		
19	226,7	0,46		69,6	9,0	0,0184	0,040	0,027	0,0184	9,0	217,7	0,44	210,7	20,60		
20*	217,7	0,44		71,5	8,7	0,0177	0,041	0,028	0,0177	8,7	209,0	0,43	202,0	20,60		
21	209,0	0,43		72,5	7,0	0,0144	0,041	0,029	0,0290	14,2	194,8	0,40	187,4	21,60		
22	194,8	0,40		74,5	7,0	0,0144	0,043	0,028	0,0144	7,0	187,8	0,38	181,1	19,60		
23	187,8	0,38		76,5	7,0	0,0144	0,042	0,030	0,0144	7,0	180,8	0,37	174,1	19,10		
24*	180,8	0,37		77,4	6,8	0,0139	0,041	0,031	0,0139	6,8	174,0	0,35	167,3	19,10		

(Продолжение)

Порядок про- пуска <i>l</i>	Способ прокатки	Ширина <i>b<sub>l</sub></i> , мм	Выходная толщина, мм		Средняя длина деформации <i>l<sub>д</sub></i> , мм/м <sup>2</sup>	Заданное обжатие, мм		Возможное обжатие <sup>1</sup>		Выбранное обжатие, мм		Выходная толщина, мм		Расход валков, мм <i>S<sub>l</sub></i>	<i>a</i> Усилие прокатки Мн
			<i>h<sub>l-1</sub></i>	$\frac{h_{l-1}}{r}$		$\Delta h_l$	$\frac{\Delta h_l}{r}$	$\left(\frac{\Delta h_l}{r}\right)_p$	$\left(\frac{\Delta h_l}{r}\right)_M$	$\frac{\Delta h_l}{r}$	$\Delta h_l$	<i>h<sub>l</sub></i>	$\frac{h_l}{r}$		
25	На угол	2780	174,0	0,35	79,4	8,0	0,0162	0,026	0,023	0,0162	8,0	166,0	0,24	158,3	22,50
26			166,0	0,34	81,4	7,0	0,0144	0,027	0,024	0,0144	7,0	159,0	0,32	151,5	22,00
27			159,0	0,32	82,3	7,0	0,0144	0,027	0,024	0,0144	7,0	152,0	0,31	144,7	21,60
28*			152,0	0,31	84,3	7,0	0,0144	0,028	0,025	0,0144	7,0	145,0	0,30	137,8	21,10
29	Вдоль	2100	145,0	0,30	85,3	—	—	0,046	0,040	0,040	18,0	127,0	0,26	120,0	20,60
30			127,0	0,26	91,1	—	—	0,050	0,037	0,037	17,6	109,4	0,22	102,4	20,60
31			109,4	0,22	97,0	—	—	0,044	0,037	0,037	17,6	91,8	0,187	84,5	21,60
32			91,8	0,187	105	—	—	0,036	0,032	0,032	15,6	76,2	0,155	68,7	22,00
33			76,2	0,155	114	—	—	0,030	0,030	0,030	14,7	61,5	0,126	54,2	24,50
34			61,5	0,126	123	—	—	0,024	0,024	0,024	11,7	49,8	0,100	41,5	24,50
35			49,8	0,100	132	—	—	0,019	0,019	0,019	9,3	40,5	0,083	32,2	24,50
36			40,5	0,083	143	—	—	0,015	0,015	0,015	7,3	33,2	0,068	24,9	24,50
37			33,2	0,068	154	—	—	0,012	0,012	0,012	5,9	27,3	0,056	19,0	24,50
38			27,3	0,056	167	—	—	0,009	0,016	0,009	4,6	22,7	0,046	14,4	24,50
39			22,7	0,046	177	—	—	0,008	0,016	0,008	2,7	20,0	0,041	14,3	16,65

\* После пропусков, отмеченных звездочкой, выполняется поворот раската в горизонтальной плоскости.

<sup>1</sup> Во всех пропусках возможное обжатие  $\left(\frac{\Delta h_l}{r}\right)_d = 0,043$ .



$b_1 = 1115$  мм. По номограмме рис. 3 для  $\frac{h_0}{r} = 0,92$  и  $\frac{\Delta h_1}{r} = 0,02$  находим  $Q_{P_1} = 0,34$ . Уравнение (4) дает

$$Q_{P_1} = \frac{P_1}{1,15 \cdot 55,8 \cdot 1,115 \cdot 0,490} = 0,34,$$

откуда  $P_1 = 11,95$  Мн. При таком усилии прокатки начальный раствор валков по уравнению Головина—Симса [см. 13] равен

$$S_1 = 440 - \frac{11,95}{2,94} = 436 \text{ мм.}$$

Во втором, третьем и четвертом пропусках получаются примерно те же усилия и моменты прокатки, что и в первом пропуске. Начальные растворы валков для этих пропусков равны соответственно  $S_2 = 426$  мм,  $S_3 = 416$  мм,  $S_4 = 406$  мм (см. таблицу).

После четвертого пропуска получается раскат с размерами  $410 \times 1120 \times 1440$  мм, дальнейшую прокатку которого ведут «на угол». Для этого раскат поворачивают в горизонтальной плоскости на некоторый угол и в этом положении производят ряд пропусков, в результате чего раскат приобретает форму параллелограмма. Затем раскат вновь поворачивают на некоторый угол и в новом положении прокатывают до тех пор, пока он не станет прямоугольником требуемой ширины, в данном случае 2100 мм. Учитывая, что в процессе прокатки возможны случайные дополнительные повороты раската, прокатку «на угол» выполняют обычно не в один прием, как описано выше, а в два или три приема, чтобы иметь возможность внести коррективы по ходу прокатки.

Длина участка соприкосновения раската с валками в каждом пропуске при прокатке «на угол» сперва возрастает, сохраняет некоторое время наибольшее значение, затем снова уменьшается. Расчет обжатий нужно вести по участку соприкосновения раската с валками наибольшей длины, когда усилие и момент прокатки также достигают наибольших значений. В соответствии с имеющимися исследованиями [13—17], наибольшая длина участка соприкосновения одинакова для всех пропусков при прокатке по первой диагонали и равна

$$b' = \frac{b}{\cos \varphi}, \text{ если } \frac{b}{l} \geq \operatorname{tg} \varphi \quad (7a)$$

и

$$b' = \frac{l}{\sin \varphi}, \text{ если } \frac{b}{l} < \operatorname{tg} \varphi, \quad (7b)$$

при прокатке по второй диагонали она также одинакова для всех пропусков.

$$b'' = \frac{\eta^2}{\beta} \cdot \frac{l}{\cos \varphi}, \text{ если } \frac{b\beta^2}{l\eta^2} \geq \operatorname{tg} \varphi; \quad (8a)$$

$$b'' = \beta \frac{b}{\sin \varphi}, \text{ если } \frac{b\beta^2}{l\eta^2} < \operatorname{tg} \varphi. \quad (8b)$$

где  $l$  и  $b$  — длина и ширина раската перед прокаткой «на угол»;

$\eta$  — коэффициент обжатия при прокатке по одной диагонали;

$\beta$  — коэффициент уширения, получаемый в результате прокатки «на угол»;

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{\eta^4 - \beta^2}{\beta^2 - 1}},$$

$\varphi$  — угол задачи заготовки перед прокаткой по первой диагонали.

Для вычисления длины участка соприкосновения раската с валками по формулам (7) и (8) необходимо знать коэффициент обжатия  $\eta$  и коэффициент уширения  $\beta$ . Структура формулы для вычисления  $\operatorname{tg} \varphi$  показывает, что для получения заданного уширения  $\beta$  необходимо выполнить условие  $\eta^4 - \beta^2 > 0$ . При  $\eta^4 - \beta^2 = 0$  угол  $\varphi$  равен нулю, т. е. заданное уширение можно получить только при прокатке «на ребро». При  $\eta^4 - \beta^2 < 0$  получить заданное уширение вообще невозможно. Из этих соображений, с учетом производственного опыта, можно выбирать значения коэффициента обжатия при заданном значении уширения.

После выбора коэффициентов  $\eta$  и  $\beta$  выполняют проверку их по условию уместения раската на длине бочки валков. В одной из работ авторов [17] показано, что это условие выражается уравнением<sup>1</sup>

$$B \geq \frac{1}{\beta} \cdot \frac{l\eta^2 \sqrt{\beta^2 - 1} + b\beta^2 \sqrt{\eta^4 - \beta^2}}{\sqrt{(\beta^2 + \eta^2)(\eta^2 - 1)}}, \quad (9)$$

где  $B$  — длина бочки валков за вычетом некоторого запаса (200—300 мм), учитывающего возможность смещения заготовки в сторону.

Пусть в рассматриваемом примере прокатку ведут в два приема. Коэффициент уширения в первом приеме  $\beta_1 = 0,8\beta$ , а во втором —  $\beta_2 = 0,2\beta$ , где полное требуемое уширение раската  $\beta = 2100 : 1120 = 1,88$ . Следовательно,  $\beta_1 = 0,8 \cdot 1,88 = 1,5$  и  $\beta_2 = 0,2 \cdot 1,88 = 1,25$  (могут быть приняты и другие соотношения между  $\beta_1$  и  $\beta_2$ ).

Коэффициент обжатия для первого приема выберем из условия  $\eta_1^4 - 1,5^2 > 0$ . Примем  $\eta_1 = 1,40$ , при этом  $1,40^4 - 1,50^2 > 0$ . Для второго приема примем  $\eta = 1,2$ , при этом  $1,2^4 - 1,25^2 > 0$ .

Для первого приема находим

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{1}{\eta_1} \sqrt{\frac{\eta_1^4 - \beta_1^2}{\beta_1^2 - 1}} = \frac{1}{1,4} \sqrt{\frac{1,4^4 - 1,5^2}{1,5^2 - 1}} = 0,805,$$

<sup>1</sup> При выводе формулы (9) предположено, что коэффициенты обжатия при прокатке по первой и второй диагоналям одинаковые, так же как и при выводе формулы для определения  $\operatorname{tg} \varphi$ .

откуда  $\varphi_1 = 0,676 \text{ рад}$ ;  $\sin \varphi_1 = 0,627$ ;  $\cos \varphi_1 = 0,779$ .

При

$$\frac{b}{l} = \frac{1120}{1440} = 0,78 < \operatorname{tg} \varphi_1 = 0,805,$$

согласно (7б),

$$b'_1 = \frac{b}{\sin \varphi_1} = \frac{1120}{0,627} = 1790 \text{ мм},$$

а при

$$\frac{b}{l} \cdot \frac{\beta_1^2}{\eta_1^2} = \frac{1120}{1440} \cdot \frac{1,5^2}{1,4^2} = 0,893 > \operatorname{tg} \varphi_1 = 0,805,$$

согласно (8а),

$$b''_1 = \frac{\eta_1^2}{\beta_1} \cdot \frac{l}{\cos \varphi_1} = \frac{1,4^2}{1,5} \cdot \frac{1440}{0,779} = 2420 \text{ мм}.$$

Длина бочки валков за вычетом 300 мм составляет  $B = 3500 - 300 = 3200 \text{ мм}$ . Подстановка  $\beta_1 = 1,5$ ,  $l = 1440 \text{ мм}$ ,  $b = 1120 \text{ мм}$ ,  $\eta_1 = 1,4$  в уравнение (9) даст

$$\frac{1}{1,5} \cdot \frac{1440 \cdot 1,4^2 \cdot \sqrt{1,5^2 - 1} + 1120 \cdot 1,5^2 \sqrt{1,4^2 - 1,5^2}}{\sqrt{(1,5^2 + 1,4^2)(1,4^2 - 1)}} = 2520 < 3200,$$

т. е. выбранные значения  $\eta_1$  и  $\beta_1$  являются приемлемыми.

После первого приема раскат превращается в прямоугольник толщиной  $410 : 1,96 = 209 \text{ мм}$ , ширина которого составляет  $1120 \cdot 1,5 = 1680 \text{ мм}$ , а длина из условия постоянства объема  $410 \cdot 1120 \cdot 1440 : 209 \cdot 1680 = 1890 \text{ мм}$ . Для второго приема находим

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{l}{\eta_2} \sqrt{\frac{\eta_2^4 - \beta_2^2}{\beta_2^2 - 1}} = \frac{1}{1,2} \sqrt{\frac{1,2^4 - 1,25^2}{1,25^2 - 1}} = 0,795,$$

откуда  $\varphi_2 = 0,670 \text{ рад}$ ,  $\sin \varphi_2 = 0,623$ ,  $\cos \varphi_2 = 0,782$ .

При

$$\frac{b}{l} = \frac{1680}{1890} = 0,89 > \operatorname{tg} \varphi_2 = 0,795,$$

согласно (7а),

$$b'_2 = \frac{l}{\cos \varphi_2} = \frac{1890}{0,782} = 2420 \text{ мм},$$

а при

$$\frac{b}{l} \cdot \frac{\beta_2^2}{\eta_2^2} = \frac{1680}{1890} \cdot \frac{1,25^2}{1,2^2} = 0,966 > \operatorname{tg} \varphi_2 = 0,795,$$

согласно (8а),

$$b''_2 = \frac{\eta_2^2}{\beta_2} \cdot \frac{l}{\cos \varphi_2} = \frac{1,2^2}{1,25} \cdot \frac{1890}{0,782} = 2780 \text{ мм}.$$

Подстановка  $\beta_2 = 1,25$ ,  $l = 1890$ ,  $b = 1680$ ,  $\eta_2 = 1,2$  в уравнение (9) даст

$$\frac{1}{1,25} \cdot \frac{1890 \cdot 1,2^2 \sqrt{1,25^2 - 1} + 1680 \cdot 1,25^2 \sqrt{1,2^4 - 1,25^2}}{\sqrt{(1,25^2 + 1,2^2)(1,2^2 - 1)}} = 3020 < 3200,$$

т. е. выбранные значения  $\eta_2$  и  $\beta_2$  являются приемлемыми.

Мы получили следующие исходные данные для расчета величины обжатий при прокатке «на угол».

Раскат толщиной 410 мм прокатывают по первой диагонали, пока толщина его не станет равна  $410 : 1,4 = 293 \text{ мм}$ . Наибольшая длина участка соприкосновения раската с валками во всех этих пропусках одинаковая и составляет 1790 мм.

Прокатку по второй диагонали ведут до толщины  $293 : 1,4 = 209 \text{ мм}$ . Наибольшая длина соприкосновения в этих пропусках составляет 2420 мм.

После этого вновь начинают прокатку раската по первой диагонали до тех пор, пока его толщина не станет равна  $209 : 1,2 = 174 \text{ мм}$ . Длина участка соприкосновения при этом составляет 2420 мм.

Прокатку по второй диагонали ведут до толщины  $174 : 1,2 = 145 \text{ мм}$ , а длина участка соприкосновения при этом равна 2780 мм.

В пятом пропуске имеем:

$$h_4 = 410 \text{ мм}; \quad \bar{\sigma}_5 = 58,8 \text{ Мн/м}^2; \quad b_5 = 1790 \text{ мм}; \quad \frac{h_4}{r} = \frac{410}{490} = 0,84.$$

Для этих данных по уравнению (4) находим

$$Q_{P_5} = \frac{24,5}{1,15 \cdot 58,8 \cdot 1,790 \cdot 0,490} = 0,413,$$

откуда допустимое обжатие по усилию прокатки, согласно номограмме (см. рис. 3), равно  $\left(\frac{\Delta h}{r}\right)_{P_5} = 0,08$ .

Для тех же исходных данных, полагая в первом приближении  $\psi_5 = 0,5$ , находим

$$Q_{M_5} = \frac{1,99}{1,15 \cdot 58,8 \cdot 1,790 \cdot 0,490^2} = 0,068,$$

откуда допустимое обжатие по моменту прокатки, согласно номограмме на рис. 4, равно  $\left(\frac{\Delta h}{r}\right)_{M_5} = 0,036$  и  $\Delta h_{M_5} = 17,6 \text{ мм}$ .

При таком обжатии геометрический фактор в пятом пропуске

$$\omega_5 = \sqrt{\frac{r \Delta h_5}{h_4 \cdot h_5}} = \sqrt{\frac{490 \cdot 17,6}{410 \cdot 392,4}} = 0,23.$$

По кривой на рис. 2 этому значению геометрического фактора соответствует  $\psi_5=0,59$ , вместо  $\psi_5=0,5$ , принятого первоначально. Подстановка  $\psi=0,59$  в уравнение (5), дает  $Q_{M_5}=0,058$ ; по номограмме (см. рис. 4) находим  $\left(\frac{\Delta h}{r}\right)_{M_5}=0,030$ .

Из трех возможных обжатий:  $\left(\frac{\Delta h}{r}\right)_{P_5}=0,080$ ,  $\left(\frac{\Delta h}{r}\right)_{M_5}=0,030$  и  $\left(\frac{\Delta h}{r}\right)_{M_5}=0,043$ , выбираем наименьшее, а именно  $\left(\frac{\Delta h}{r}\right)_{M_5}=0,03$ , для которого ограничивающим фактором является момент прокатки. Абсолютная величина обжатия составляет  $\Delta h_5=0,03 \times 490=14,7$  мм. Следовательно, толщина раската после пятого пропуса

$$h_5 = 410 - 14,7 = 395,3 \text{ мм.}$$

По номограмме на рис. 3 для  $\frac{\Delta h_5}{r}=0,03$  и  $\frac{h_4}{r}=0,84$  находим

$$Q_{P_5} = \frac{P_5}{1,15 \cdot 58,8 \cdot 1,790 \cdot 0,490} = 0,35,$$

откуда фактически возникающее в пятом пропуске усилие прокатки  $P_5=20,60$  Мн.

Начальный раствор валков для пятого пропуса

$$S_5 = h_5 - \frac{P_5}{C} = 395,3 - \frac{20,6}{2,94} = 388,3 \text{ мм.}$$

Аналогично проводим расчет и для других пропусков по первой диагонали. Результаты расчетов приведены в таблице.

После 11-го пропуса получаем раскат толщиной  $h_{11}=300,2$  мм. После прокатки по первой диагонали толщина должна быть 293 мм, откуда обжатие для 12-го пропуса будет равно

$$h_{11} - h_{12} = 300,2 - 293 = 7,2 \text{ мм.}$$

С целью более равномерного распределения нагрузки в 11-м и 12-м пропусках распределим общее обжатие за эти пропуски:  $316,8 - 293 = 23,8$ , таким образом,  $\Delta h_{11}=12$  мм,  $\Delta h_{12}=11,8$  мм.

При помощи номограммы (рис. 3) находим  $P_{11}=17,65$  Мн и  $P_{12}=17,65$  Мн, откуда  $S_{11}=298,8$  мм и  $S_{12}=287$  мм.

После 12-го пропуса выполняют поворот раската для прокатки его по второй диагонали до толщины 209 мм.

Двенадцатый пропуск четный, следовательно, раскат находится на передней стороне клетки — там, где имеется поворотное устройство. Это условие необходимо выполнять при прокатке по первой и второй диагоналям в обоих приемах — перед 20, 24 и 28-м пропусками (см. таблицу). Во всех этих пропусках величина обжатий ограничивается условием прокатки раската на заданную толщину, поэтому энергосиловые возможности

стана используются неполностью. Это обстоятельство, наряду с потерей времени на поворот раската, является недостатком, присущим процессу прокатки «на угол».

Начиная с 29-го пропуса, прокатку ведут вдоль, причем фактором, ограничивающим величину обжатий, является сначала момент, а затем, начиная с 33-го пропуса, усилие прокатки (см. таблицу). После 37-го пропуса раскат имеет толщину  $h_{37}=27,3$  мм, а лист должен иметь толщину 20 мм. Оставшееся обжатие  $27,3 - 20,0 = 7,3$  мм нужно распределить на два пропуса таким образом, чтобы последний из них был проглаживающим, т. е. выполнялся при том же растворе валков, что и предыдущий. Следовательно, нужно выполнить два условия:

$$a) \Delta h_{38} + \Delta h_{39} = 7,3 \text{ мм;}$$

$$b) S_{38} = S_{39}.$$

Как показывают исследования авторов и имеющиеся в литературе данные [18], эти два условия удовлетворяются обычно при соотношении обжатий  $\Delta h_{n-1} = (0,6 + 0,65) (\Delta h_{n-1} + \Delta h_n)$ . В рассматриваемом примере  $\Delta h_{38} = 0,63 \cdot 7,3 = 4,6$  мм и  $\Delta h_{39} = 7,3 - 4,6 = 2,7$  мм. Тогда для 38-го пропуса при  $h_{37}=27,3$  мм,  $\sigma_{38}=167$  Мн/м<sup>2</sup>,  $b_{38}=2100$  мм имеем  $Q_{P_{38}}=0,124$ , откуда  $P_{38}=24,50$  Мн и  $S_{38}=22,7 - \frac{24,50}{2,94} = 14,4$  мм.

Для 39-го пропуса при  $h_{38}=22,7$ ,  $\sigma_{39}=177$  Мн/м<sup>2</sup> и  $b_{39}=2100$  мм имеем  $Q_{P_{39}}=0,080$ , откуда  $P_{39}=16,65$  кн и  $S_{39}=20 - \frac{16,65}{2,94} = 14,3$  мм.

Приведенный пример рассчитали применительно к условиям прокатки на стане 3500 Нижне-Тагильского металлургического комбината. По существующему режиму обжатий прокатка такого листа осуществляется не в 39, а в 44—45 пропусков. Использовать имеющиеся на этом стане резервы производительности практически оказалось затруднительным вследствие недостаточной производительности нагревательных печей. Поэтому промышленную апробацию предложенных номограмм для расчета оптимальных режимов осуществляли на стане Лаута 2850 Ашинского металлургического завода, где имеются мощные нагревательные печи методического типа. Прирост производства толстых листов в результате применения режимов обжатий на этом стане оценивается равным 12000 Мг в год, в результате чего получается экономический эффект около 80 тыс. руб.

Предложенные для расчета оптимальных режимов номограммы полностью применимы и для толстолистовых станов современного типа, на которых прокатка «на угол», как правило, уже не применяется. Расчет при этом значительно проще, так как исчезает необходимость вычислять геометрические соотно-

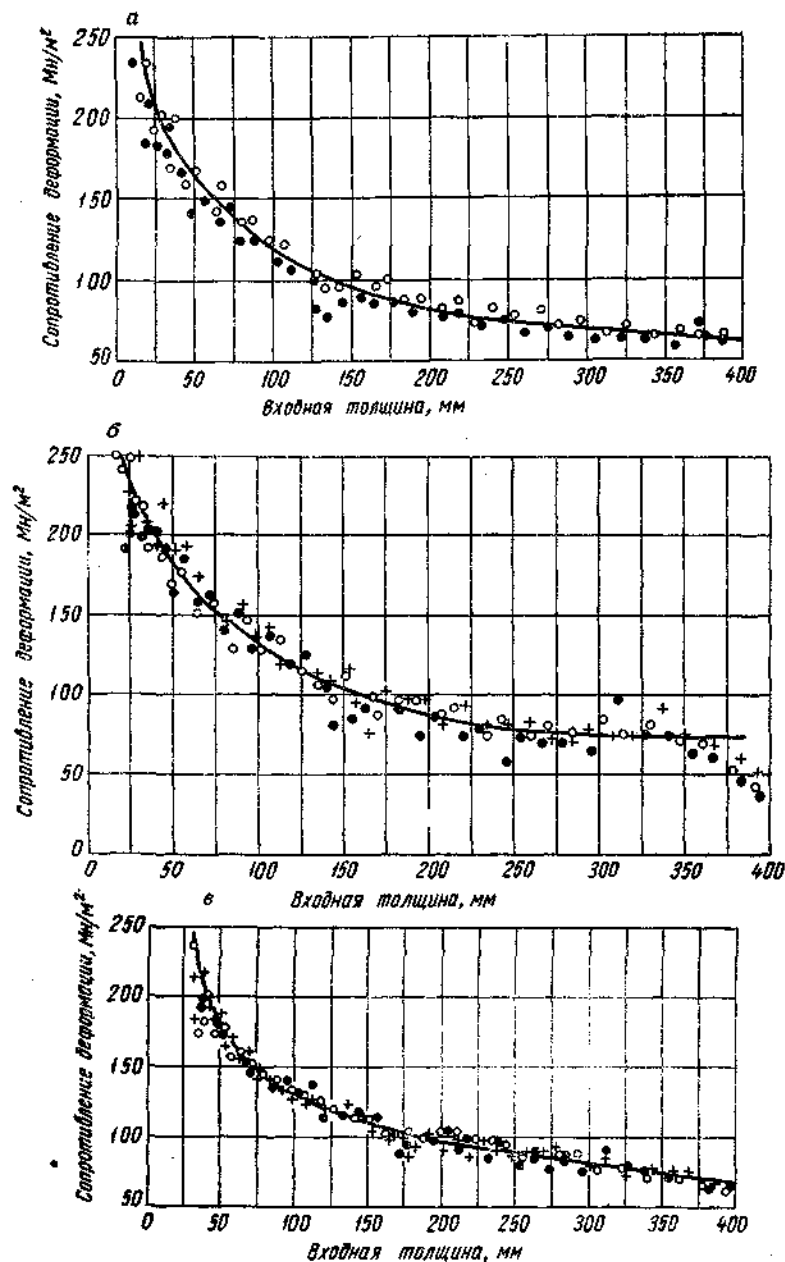


Рис. 6. Изменение сопротивления деформации в процессе прокатки толстых листов:

а — сталь 3кп (по данным прокатки двух слитков); б — сталь 45 (по данным прокатки трех слитков); в — сталь СХЛ4 (по данным прокатки трех слитков)

шения по формулам (7), (8) и (9). Однако в любом случае расчет оптимального режима возможен только при условии, что известны значения сопротивления деформации в каждом пропуске. Надежные способы расчета сопротивления деформации в каждом пропуске пока отсутствуют. Поэтому рекомендуется находить кривые изменения сопротивления деформации в процессе прокатки по результатам исследования энергосиловых параметров на действующих прокатных станах, подобные кривой, показанной на рис. 5.

Несколько кривых, полученных указанным способом, приведено на рис. 6. Точки, по которым построены эти кривые, найдены по результатам осциллографирования, при помощи тех же номограмм (рис. 3 и 4), по которым рассчитывают оптимальный режим обжатий. В этом случае для получения величины сопротивления деформации поступают следующим образом.

По известным для каждого пропуска величинам  $\frac{h_{i-1}}{r}$  и  $\frac{\Delta h_i}{r}$  находят при помощи номограмм значения

$$Q_{P_i} = \frac{P_i}{1,15\sigma_i b_i r} \text{ или } Q_{M_i} = \frac{M_i}{1,15\sigma_i 2\psi_i b_i r},$$

в которых  $b_i$ ,  $P_i$ ,  $M_i$ ,  $\psi_i$  также известны, что позволяет вычислить сопротивление деформации  $\sigma_i$ . Если измерялись одновременно усилия и моменты прокатки, то значения  $\sigma_i$ , вычисленные по условиям и моментам прокатки, должны совпадать или различаться на величину, которая характеризует собой точность выполненных измерений. При расчете оптимального режима обжатий с использованием кривой сопротивления деформации, построенной по описанному выше способу, ошибки, вызванные применением эмпирической формулы (1), компенсируются в значительной степени, что является еще одним обстоятельством, заставляющим отдать предпочтение экспериментальному способу определения  $\sigma_i$ .

Изучение серии экспериментальных кривых изменения сопротивления деформации в процессе прокатки, аналогичных показанным на рис. 6, позволило сделать следующие выводы:

1. По мере уменьшения толщины раската сопротивление деформации увеличивается с возрастающей скоростью. Такой характер зависимости объясняется воздействием на свойства металла температурных и скоростных условий деформирования. К концу проката скорость деформирования вследствие уменьшения толщины раската возрастает, а температура металла снижается.

2. Возрастание сопротивления деформации по мере уменьшения толщины раската происходит монотонно. Неодинаковая величина обжатий в смежных пропусках и неодинаковая длительность пауз между этими пропусками вносят в эту монотонную зависимость незначительные возмущения.

3. Прокатке одинаково нагретых слитков (слябов) одного и того же размера по разным режимам обжатий, не слишком сильно отличающихся числом пропусков, соответствуют сходные кривые изменения сопротивления деформации. Поэтому допустимо выполнять расчет оптимального режима обжатий по кривой сопротивления деформации, соответствующей применяемому на данном стане (неоптимальному) режиму обжатий. Возникающие при таком расчете неточности оказываются ошибками не первого, а второго порядка малости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Тягунов. Рациональная калибровка листовых станов. Металлургия, 1944.
2. А. Ф. Головин. Прокатка. Металлургия, 1934.
3. В. А. Тягунов. Режимы прокатки на реверсивных станах. Металлургия, Свердловск, 1954.
4. Б. Н. Бухвалов. О выборе обжатий по прочности листовых валков. Сб. «Прокатное производство», Металлургия, Свердловск, 1958.
5. А. И. Целиков, В. В. Смирнов. Влияние внешних зон на сопротивление деформации при прокатке. Сталь, 1952, № 7.
6. Д. И. Пирязев, П. А. Александров. Удельное давление при горячей прокатке и анализ формул и методов для их расчета. Труды Украинского научно-исследовательского ин-та металлов, вып. 6, Харьков, 1960.
7. И. Я. Тарновский, В. П. Котельников. Исследование удельного давления при прокатке на алюминге с использованием вариационных принципов. Сб. трудов конференции «Технический прогресс в технологии прокатного производства», Металлургия, 1960.
8. М. Я. Бровман. Исследование деформации металла при прокатке на непрерывнозаготовочных станах. Труды АН Груз.ССР, т. XXVI, 1961, № 1.
9. В. М. Луговской, В. Ф. Потапкин. Приближенный расчет напряжений по линиям скольжения. Кузнечно-штамповочное производство, 1962, № 4.
10. R. B. Sims. The Calculation of Roll Force and Torque in Hot Rolling mills, Proc. Inst. Mech. Engrs., 1954, v. 168, 6.
11. Е. С. Рокотян. Силовые воздействия в обжимных и листовых станах. Сб. «Вопросы обработки металлов давлением». Изд-во АН СССР, 1958.
12. O. Emicke und K.—H. Lucas. Ergebnissen von Walzversuchen an einem Grobblechwalzwerk mit Twin-Drive-Antrieb, Neue Hütte, 1959, 2.
13. O. Emicke und K.—H. Lucas. Berechnungsgrundlagen zum Walzen in Winkel bei der Grobblechherstellung, Neue Hütte, 1959, 2.
14. М. Л. Зарошинский. Прокатка стали, Металлургия, 1948.
15. А. Г. Стукач. Прокатка на угол. Сб. «Обработка металлов давлением», Металлургия, 1953, № 2.
16. Б. Н. Бухвалов. Прокатка листов с косою задачей в валки. Труды Уральского политехнического института им. С. М. Кирова, вып. 78. Сб. «Расчет и конструирование заводского оборудования», Свердловск, 1960.
17. Д. И. Суяров, М. И. Сиротин, Л. Г. Чубриков. Основы расчета прокатки на угол. Труды Ин-та металлургии УФАН СССР, вып. 9. Сб. «Исследование процессов листовой и ленточной прокатки», Свердловск, 1962.
18. Г. М. Кацнельсон, М. М. Сафьян, А. П. Чекмарев, Г. И. Малыш. Прокатка толстых листов с повышенной точностью. Металлургия, 1957.