

В. А. Тягунов

**РЕЖИМЫ ПРОКАТКИ
НА
РЕВЕРСИВНЫХ
СТАНАХ**

МЕТАЛЛУРГИЗДАТ

1 9 5 4

В. А. ТЯГУНОВ
доц., канд. техн. наук

РЕЖИМЫ ПРОКАТКИ НА РЕВЕРСИВНЫХ СТАНАХ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛИТЕРАТУРЫ ПО ЧЕРНОЙ И ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ
Свердловск 1954 Москва

АННОТАЦИЯ

В книге освещаются наивыгоднейшие режимы прокатки на реверсивных прокатных станах на основе анализа и обобщения передовых методов работы на блюмингах и слябингах. Дан анализ примеров обобщения передового опыта работы на блюмингах ряда отечественных металлургических заводов.

Книга предназначена для инженерно-технических работников цехов и отделов организации труда заводов; она может быть полезной студентам металлургических факультетов.

Редактор проф. доктор *Е. В. Пальмов*
Редактор издательства *В. П. Кельник*
Технический редактор *Н. И. Коваленко*

Подписано к набору 24/X 1953 г. Подписано к печати 25/III 1954 г.
Бумага 60×92 $\frac{1}{16}$ = 4,25 бум.л. = 8,5 печ. л. Уч. изд. л. 9
Зн. в 1 п. л. 42350 НС28157 Тираж 3000 Цена 4 р. 50 к. Заказ 1947

Типография Металлургиздата в г. Свердловске. Свердловск, Дом промышленности

ПРЕДИСЛОВИЕ

В выполнении директив XIX съезда КПСС о лучшем использовании мощности действующих агрегатов новаторы прокатных цехов добились значительных успехов. Благодаря отличному освоению техники и высокой культуре производства производительность некоторых прокатных станов близка к технически возможной.

Достижение отдельными передовыми прокатчиками на одном и том же стане различными методами высоких показателей свидетельствует о том, что на основе тщательного изучения лучших методов работы, их обобщения и разработки наиболее рациональных режимов работы производительность прокатных станов может быть значительно повышена.

Наиболее сложными являются режимы работы реверсивных станов; их изучению ученые и производственники уделяют в последнее время все больше и больше внимания. Большие исследования по изучению работы блюмингов проводятся Академией наук УССР под руководством академика А. П. Чекмарева, этим вопросом занимаются докт. техн. наук М. Л. Зарощинский, проф. А. А. Александров, канд. техн. наук П. А. Александров и др.

Особенно много исследований по обобщению передовых методов труда проводится заводскими работниками: исследования на КМК под руководством инж. Б. П. Зуева, на НТМЗ под руководством инж. В. Г. Варварова, на Запорожстали под руководством инж. Б. М. Цирлина, на ММК работниками отдела организации труда завода и др.

Развиваются в этом направлении и работы по содружеству науки с производством. Так, например, исследование блюминга на заводе им. Петровского проведено путем совместной работы бригады завода под руководством инж. С. П. Струкова и бригады Днепронетровского металлургического института имени Сталина под руководством проф., докт. А. П. Чекмарева и доц. М. М. Сафьян.

Исследование блюминга Сталинского металлургического завода проведено в содружестве работников завода под руководством инж. П. И. Егорькова и работников Донецкого индустриального института под руководством доц. Л. Г. Кацен.

Аналогичная работа проведена и Уральским политехническим институтом на НТМЗ (инж. В. Г. Варваров и доц. В. А. Тягунов) и Запорожстали (инж. Б. М. Цирлин и доц. В. А. Тягунов).

Анализ многочисленных материалов по обобщению передовых методов труда на блюмингах и слэбингах показывает, что приемы обобщения этого опыта иногда слишком примитивны и механистичны, не имеют достаточной теоретической базы, в результате чего обобщение и выводы не всегда достаточно обоснованы и реальны.

В ряде случаев при обобщении передовых приемов труда прокатчиков последнее производится путем механического сложения наилучших элементов времени в работе отдельных передовиков производства без научного анализа возможности такого сложения, без проверки расчетом этих элементов времени. Такой прием неизбежно приводит к фиктивным результатам. Рекомендации оказываются догматическими, не связанными с конкретными параметрами процесса для каждого отдельного пропуска; их реальность не подтверждается ни теоретически, ни практически.

Обобщая передовые приемы работы на реверсивных станах, необходимо учитывать, что каждый элемент технологического процесса неразрывно связан со всеми его остальными элементами и изменение одного из них влечет за собой изменение ряда других элементов.

Следовательно, для построения рационального, обобщенного режима прокатки нужно предварительно исследовать взаимосвязь отдельных элементов технологического процесса и для каждого конкретного стана установить количественные соотношения между основными параметрами его работы.

Так, например, если один оператор блюминга добивается минимального машинного времени в некоторых пропусках, а другой оператор в этих же пропусках имеет минимальные паузы, то обобщать их приемы путем простого суммирования машинного времени первого и паузы второго нельзя. Прокатка на высоких скоростях в реверсивных станах увеличивает паузы, а сведение до минимума пауз неизбежно увеличивает машинное время.

Следовательно, для установления обобщенного режима прокатки мало знать машинное время и паузы отдельных операторов, необходимо путем исследований и расчетов найти такие соотношения между ними, которые обеспечили бы максимальную производительность. При этом каждый выбранный параметр пропуска, будь то величина обжатия, скорость захвата или максимальная скорость прокатки, обязательно должен быть увязан с условиями захвата слитка и нагрузками на двигатель и детали стана.

Автор поставил своей задачей сделать теоретический анализ режимов работы реверсивных станов, проанализировать отдельные методы обобщения передовых приемов работы, выяснить их недостатки и дать более совершенный метод обобщения передового опыта и разработки наивыгоднейших режимов работы реверсивных обжимных станов.

Все выводы автора подтверждаются исследованиями, проведенными в содружестве с работниками НТМЗ и Запорожстали.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В КНИГЕ¹

Размеры деформируемого тела, мм

H	высота (толщина) перед пропуском.
h	» » после пропуска.
h_g	» » » » в горизонтальных валках.
h_v	» » » » в вертикальных валках.
Δh (Δh_z , Δh_g)	— абсолютное обжатие.
b (b_z , b_g)	— ширина полосы после пропуска.
Δb	— абсолютное уширение.
l_1 (l_z , l_g)	— длина полосы после пропуска.
l_c (l_{cz} , l_{cg})	— длина очага деформации.
λ (λ_1 ; λ_2 ; $\lambda_3...$)	— коэффициент вытяжки по пропускам.

Усилия и моменты

P	— вертикальное давление на валок, m .
$P_{доп}$	— давление, допускаемое прочностью валков, m .
p	— полное удельное давление, $кг/мм^2$.
p_0	— удельное давление без учета внешнего трения.
K_f	— коэффициент, учитывающий внешнее трение.
M_D	— момент на бочках двух валков, $тм$.
M_a	— » на шейках » » »
$M_{пр}$	— $M_D + M_a$ — момент прокатки »
M'_a	— момент прокатки с учетом к. п. д. стана, $тм$.
M''	— динамический момент при ускорении валков, $тм$.
M'''	— » » при замедлении валков »
M_0	— момент холостого хода стана » » »
M_n	— номинальный момент двигателя, $тм$.
M_{max}	— максимальный » » »
$M_{ср}$	— среднесquareльный » » »
$M_{доп}$	— момент, допускаемый двигателем.
$M_{пр}^{пр}$	— приведенный маховой момент стана, $тм^2$.

$$\delta = \frac{GD^2}{375},$$

$$\alpha^2 = \frac{M_a}{M_n} \cdot \frac{M_b}{M_n}.$$

¹ Индексы z и g — по всем случаям обозначают горизонтальные или вертикальные валки.

Относительные моменты (коэффициенты перегрузки),
допускаемые по нагреву двигателя

- $\lambda_{\kappa, I}$ — при скоростной схеме I типа ($t_n = 0$).
 $\lambda_{\kappa, II}$ — » » » II типа ($t_y = t_z = 0$, $t_n \neq 0$).
 $\lambda_{\kappa, III}$ — то же, но при $t_x = t_n = t_n$.
 $\lambda_{\kappa, III}$ — при скоростной схеме III типа ($t_n \neq 0$; $t_y \neq 0$; $t_z \neq 0$).

Скорости валков, об/мин

- n_y — скорость при входе слитка в валки в данном пропуске.
 n_y и n_{yy} — скорость при входе слитка в валки в последующем пропуске.
 n_z — скорость при выходе слитка из валков в данном пропуске.
 n_n — постоянная скорость.
 n_m — максимальная скорость.
 n_a — скорость в начале периода прокатки с верхним значением ускорений.
 n_b — скорость в конце периода прокатки с верхним значением ускорений.
 n_{y2} — скорость при входе слитка в горизонтальные валки.
 n_{y8} — » » » » в вертикальные »
 n_{z2} — » » выходе » из горизонтальных валков.
 n_{z8} — » » » » вертикальных валков.
 n_{m2} — максимальная скорость горизонтальных валков.
 n_{m8} — » » вертикальных »
 n_{y8} — число оборотов горизонтальных валков, при захвате слитка вертикальными валками.
 n'_{z8} — число оборотов горизонтальных валков при выходе слитка из вертикальных валков.
 n_x — наивыгоднейшая скорость входа и выхода слитка из условия минимального цикла.

Сокращенные обозначения:

$$\theta = \frac{n_m}{n_n}; \quad \varphi = \frac{n_x}{n_m}; \quad \theta_p = \frac{n_y}{n_n}; \quad \psi = \frac{n_y}{n_z};$$

$$\xi^2 = \frac{1}{3} (\theta^2 + \theta + 1);$$

$$\xi_p^2 = \frac{1}{3} (\theta_p^2 + \theta_p + 1) = \frac{1}{3} \theta^2 \left(\varphi^2 + \frac{\varphi}{\theta} + \frac{1}{\theta^2} \right);$$

$$\xi_y^2 = \frac{1}{3} (\theta^2 + \theta\theta_p + \theta_p^2) = \frac{1}{3} \theta^2 (\varphi^2 + \varphi + 1);$$

$$A = \frac{1}{3} \left(\theta^2 + \frac{2}{\theta} \right);$$

$$B = \frac{1}{3} \theta^2 (1 - \varphi^3).$$

Угловые ускорения, об/мин в секунду

- a — ускорение при разгоне валков.
 b — ускорение при замедлении скорости вращения валков.
 K — среднее ускорение

$$\left(K = \frac{2ab}{a+b} \right);$$

- $a_1; a_2 \dots K_1; K_2 \dots$ и т. д. — ускорения данного пропуска, отличающиеся величиной;
 $a_{усл}; b_{усл}; K_{усл}$ — условные ускорения, соответствующие их верхним значениям в данном пропуске.
 C — ускорение рабочего рольганга, приведенное к рабочим валкам.

Периоды пропуска, сек.

- τ — фактический цикл одного пропуска.
 $\tau_{усл}$ — условный » » » отнесенный к верхним значениям ускорений.
 t_m — машинное время пропуска.
 t_p — период раскручивания валков без слитка.
 t_0 — » остановки » » »
 t_y — » ускорения » со слитком.
 t_z — » замедления » » »
 t_n — » постоянной скорости.
 t_c — пауза между пропусками.
 T_0 — » » слитками (начальная).
 $t_{н.у}$ — время работы нажимного устройства.
 $t_{рев}$ — » реверсирования валков (без слитка).
 $t_{в.р}$ — пауза, определяемая рабочим рольгангом.
 T — цикл (период) прокатки слитка.

Путь вращающихся валков и длина полос и их частей в оборотах

- N_1 — длина полосы после пропуска (путь валков, соответствующий полной длине полосы).
 N_p, N_y, N_n, N_z, N_o — путь валков, соответствующий периодам пропуска: t_p, t_y, t_n, t_z, t_o .
 N_z — длина полосы (путь валков), прокатанная при верхних значениях ускорений.
 N' — расстояние между непрерывно связанными клетями.
 N_1 — длина полосы с учетом расстояния между клетями.
 N_{11} — длина полосы с учетом расстояния между клетями, прокатанная при верхних значениях ускорений.
 $N_{усл}$ — условный путь валков за полный цикл пропуска при верхних значениях ускорений.
 $N_{p, усл} = N_a$ — условный путь раскручивания валков без слитка при верхних значениях ускорений.
 $N_{o, усл} = N_b$ — условный путь остановки валков без слитка при верхних значениях ускорений.

ВВЕДЕНИЕ

Режим прокатки на реверсивном прокатном стане складывается из режима обжатий, режима скоростей и динамического режима.

Все три режима находятся в тесной взаимной связи. Изменение одного из них отражается на других, причем динамический режим, характеризующий нагрузку на детали стана и главный привод, является функцией режимов обжатий и скоростей и самостоятельно изменяться не может.

В практике работы реверсивных станов (блужингов, слябингов, листовых станов) операторам задается лишь режим обжатий (калибровка), да и тот изменяется каждым оператором в соответствии со своим методом работы. Режим же скоростей полностью предоставлен операторам и является главной отличительной чертой метода их работы.

Каждому сочетанию обжатий и скоростей соответствует определенный динамический режим двигателя и деталей стана. Следовательно, это сочетание должно быть таким, чтобы оно не вызвало опасных нагрузок деталей стана и двигателя.

При данной характеристике двигателя увеличение обжатий может ограничить применение скоростей, превышающих основную скорость двигателя. Наоборот, работа на скоростях выше основной (при полном использовании мощности двигателя) вызывает снижение обжатий и, следовательно, увеличение числа пропусков.

Уменьшение числа пропусков почти всегда дает больший эффект, чем повышение скорости прокатки, поэтому определяющим является режим обжатий, а режим скоростей должен быть наимыгоднейшим для данного режима обжатий.

Однако рациональный режим обжатий, помимо условий захвата, определяется мощностью двигателя и прочностью деталей стана (в листовых станах), т. е. может быть определен лишь на основе динамических расчетов.

После определения минимального числа пропусков обычно имеется возможность варьировать распределением обжатий между пропусками и это должно быть использовано в целях улучшения скоростного режима.

Прежними работами [1; 2] доказано, что чем больше минимально необходимая пауза между пропусками, тем выгоднее увеличивать скорость захвата слитка в пропуске после этой паузы. Но чем больше скорость захвата, тем меньше может быть обжатие. Отсюда

следует, что при распределении обжатий по пропускам их выгоднее уменьшить после больших пауз, увеличивая соответственно после малых пауз.

Паузы и машинное время также тесно связаны друг с другом. Уменьшение паузы обычно вызывает увеличение машинного времени, и наоборот.

Исследуя взаимосвязь основных параметров технологического процесса и изучая различные сочетания их, можно найти наивыгоднейшие режимы работы прокатных станов, способствующие повышению их производительности.

Ниже рассматривается метод комплексного решения вопроса о наивыгоднейшем режиме прокатки на реверсивных станах, позволяющий не только объяснить и проанализировать достижения передовиков, но и наметить пути повышения производительности станов.

Рассматривая производительность стана, нужно различать практически и технически возможную производительность.

Производительность стана, полученная по наилучшим хронометражным данным работающего агрегата, является его **п р а к т и ч е с к и** **в о з м о ж н о й** производительностью.

Производительность стана, полученная в результате расчета продолжительности прокатки при наивыгоднейших режимах работы стана, является для данного агрегата и технологического процесса теоретически или **т е х н и ч е с к и** **в о з м о ж н о й** производительностью.

Практически возможная производительность отражает степень овладения техникой агрегата на каждом данном этапе и по мере освоения этой техники приближается к технически возможной производительности.

Технически возможная производительность является тем пределом, на достижение которого должны быть направлены все силы и средства цеха, и тем критерием, на основе которого могут анализироваться и совершенствоваться режимы работы стана.

Таким образом для получения технически возможной производительности стана нужно учитывать наивыгоднейший режим его работы, который будет иметь место только в том случае, когда он будет наивыгоднейшим для каждого отдельно взятого пропуска и увязан с предыдущим и последующим пропусками. В зависимости от конкретных условий наивыгоднейшие режимы предыдущего и последующего пропусков могут значительно отличаться друг от друга и требуют особого расчета каждого пропуска. Поэтому методы расчета производительности, основанные на заранее заданном, постепенном изменении режимов работы стана в соответствии лишь с порядковым номером пропуска, независимо от особенностей каждого конкретного пропуска, не могут дать технически возможной производительности [3; 4; 5; 6].

При расчете наивыгоднейших режимов прокатки нужно прежде всего исходить из рациональной калибровки с наименьшим числом

пропусков, т. е. установить режим обжатий. Этот режим обжатий устанавливается, исходя из условий захвата, прочности деталей стана и мощности двигателя. Далее должны быть определены минимально необходимые паузы, которые зависят от скорости работы механизмов стана, обслуживающих перестановку валков и задачу штуки в валки (нажимное устройство, рольганги, манипуляторы). По известным обжатиям и паузам рассчитывается для каждого пропуска в отдельности наивыгоднейший режим скоростей с учетом числа оборотов и мощности двигателя. При этом для улучшения режима скоростей могут быть перераспределены обжатия между отдельными пропусками, если это допускается перегрузочной способностью двигателя и прочностью деталей стана.

После расчета продолжительности прокатки производится проверка двигателя на нагрев.

Если двигатель не удовлетворяет требованиям по нагреву, следует снизить максимальные скорости в пропусках до основной скорости двигателя. В случае, если это окажется недостаточным, следует увеличить число пропусков на два и произвести полный перерасчет. Искусственное завышение пауз вместо увеличения числа пропусков нецелесообразно, так как это нарушает ритм прокатки и дает большее снижение производительности.

Переходя к непосредственному изложению метода расчета наивыгоднейших режимов прокатки, необходимо отметить, что теоретические расчетные режимы являются и наиболее естественными для операторов, так как они построены на основе увязки работы механизмов стана.

Анализ передовых методов работы на реверсивных станах показал, что чем опытнее оператор стана, чем лучше он изучил и освоил механизм стана, тем выше его производительность и тем более режим его работы приближается к теоретически наивыгоднейшему, а производительность стана к технически возможной.

ГЛАВА I

РЕЖИМ ОБЖАТИЙ

Известно, что чем больше обжатие в каждом пропуске при прокатке, тем меньше число пропусков и тем, следовательно, выше производительность стана.

Однако величина обжатия ограничивается рядом факторов и для каждого конкретного пропуска имеет определенное максимальное значение, превышение которого может привести к нежелательным последствиям (буксовка валков по раскату, автоматическое отключение двигателя, поломка валка или других деталей стана).

К основным факторам, определяющим наибольшую допустимую величину обжатия, относятся: условия захвата слитка валками, мощность двигателя, прочность рабочих валков и др. деталей стана. Иногда к этим факторам относят величину относительной деформации, считая, что в зависимости от качества металла и его пластичности при определенной степени деформации прокатываемый металл разрушается [7].

Рассмотрим факторы, ограничивающие величину обжатий.

Условия захвата

В реверсивных станах в связи с возможностью захвата слитка при малых скоростях валков условия захвата редко ограничивают величину обжатий. Однако в ряде случаев, например при больших паузах, вызванных кантовкой или малой скоростью нажимного устройства, в целях повышения производительности целесообразно использовать эту паузу на разгон валков до более высокой скорости захвата. Последняя ограничивается уже, как правило, условиями захвата.

Для выяснения влияния скорости прокатки на условия захвата в цеховых условиях автором были проведены наблюдения за условиями захвата на нескольких реверсивных станах. Методика эксперимента была следующей: при постоянном обжатии в данном пропуске прокатывалось несколько слитков, скорость прокатки каждого последующего слитка увеличивалась (на 5 об/мин по тахометру) до тех пор, пока не начиналась пробуксовка, характеризующаяся ударами в стане.

После этого для проверки условий хорошего захвата повторяли прокатку на предыдущей скорости и переходили к следующему обжатию. Обжатия изменялись от 40 до 100 мм.

Результаты наблюдений, показывающие при каких скоростях и обжатиях обеспечивается надежный захват, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Допустимые обжатия при свободном уширении, мм

Наименование стана	n, об/мин при захвате					
	10	20	30	40	50	60
Блюминг 1150, $D_p = 1000$, $B_1 = 650$	90	80	75	55	35	—
» 1150, $D_p = 900$, $B_1 = 400$	90	80	70	55	—	—
» 900, $D_p = 825$, $B_1 = 250$	—	—	—	—	55	40
Слябинг 1100, $D_p = 1050$, $B_1 = 1000$	—	—	70	45	—	—

При прокатке на новых и на выработанных валках ощутительной разницы в условиях захвата не установлено. Это дает основание предположить, что на коэффициент трения влияет, главным образом, скорость прокатки, влияние же чистоты поверхности валков незначительно.

При прокатке на стане 900 со стеснением уширения ($B_1 = 250$) практически не удалось достигнуть обжатий, ограниченных условиями захвата. Буксования не было получено даже при обжатиях 110 мм при 100 об/мин и 100 мм при 120 об/мин ($D_p = 825$ мм).

Анализ опытов показал влияние ширины полосы на угол захвата.

При свободном уширении и ширине прокатываемого слитка $B_1 = 650$ мм (гладкая бочка блюминга 1150) выражение для допускаемого угла захвата в зависимости от скорости имеет вид [14]:

а) при $v \leq 1,6$ м/сек

$$\alpha^\circ = 25,5^\circ - 2v;$$

б) при $v = 1,6 - 3,0$ м/сек

$$\alpha^\circ = 16^\circ + 7(2,5 - v).$$

(1)

При $v > 3$ м/сек угол захвата принят постоянным независимо от скорости $\alpha = 12^\circ$ [15; ч. 1, стр. 27].

Для удобства расчета допускаемых оборотов валков при захвате слитков в зависимости от обжатия по формулам (1) построен график при $B_1 = 650$ мм (рис. 1). При иной ширине слитка поправка определяется по формуле

$$\Delta h_B = \Delta h' - \left(\frac{B}{50} - 13 \right), \quad (2)$$

где $\Delta h'$ — обжатие по графику (рис. 1), мм;

B — ширина слитка (блума, сляба), мм.

В диапазоне прокатки, не охваченном наблюдениями, кривые на графике (рис. 1), согласно формулам (1), проведены пунктиром.

Специальных опытов по захвату в калибрах со стесненным уширением и в валках с насечкой (наваркой) не проводилось. Допускаемые углы захвата с данными по захвату в калибрах, принятыми по литературным источникам и отдельным заводским наблюдениям, приведены в табл. 2.

В качестве примера возможных величин угла захвата в табл. 3 приведены фактические обжатия при работе передовых операторов на блюминге ММК (1936 г.). Как видно по данным, приведенным в таблице, при задаче слитка тонким концом обжатия

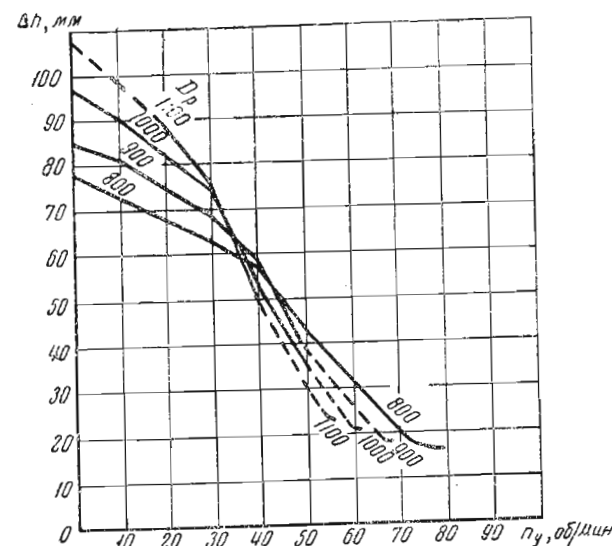


Рис. 1. Зависимость обжатий от скорости захвата и диаметра рабочих валков.

достигают 130—155 мм, что соответствует углам захвата $31-34^\circ$; в одном случае зафиксировано обжатие даже 180 мм (37°).

Таблица 2

Допускаемые углы захвата

Год калибра	Окружная скорость, м/сек							
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
Гладкая бочка	25,5	24,5	23,5	22,5	19,5	16	—	—
В стесненных калибрах	29	27,5	26	24,5	21	17	12	—
С насечкой	33	32	31	30	28	26	24	21

После обжатия после сглаживания конусности слитка достигают 125—130 мм, а углы захвата $29,5-30^\circ$.

Пример режима обжатий при прокатке 8-тонных слитков

Таблица 3

№ калибра	№ про- пуска	1-й оператор				2-й оператор				3-й оператор			
		h_1 , мм	b_1 , мм	Δh , мм	$\frac{\Delta h}{h_0}$, %	h_1 , мм	b_1 , мм	Δh , мм	$\frac{\Delta h}{h_0}$, %	h_1 , мм	b_1 , мм	Δh , мм	$\frac{\Delta h}{h_0}$, %
I	0	805	720	—	—	805	720	—	—	805	720	—	—
	1	655	725	150	18,6	685	725	120	14,9	650	725	155	19,3
	2	598	730	57	8,7	615	730	70	10,2	572	730	78	12,0
	3	595	603	135	18,5	617	620	113	15,5	600	580	130	17,8
	4	515	608	80	13,4	540	625	77	12,5	530	585	70	11,7
	5	450	615	65	12,6	450	630	90	16,6	445	590	85	16,0
	6	360	620	90	20,0	370	635	80	17,8	365	595	80	18,0
II	7	540	365	80	12,9	522	375	113	17,8	510	375	85	14,3
	8	460	370	80	14,8	437	380	75	14,4	430	380	80	15,7
	9	355	380	105	22,8	355	385	82	18,7	335	387	95	22,1
	10	275	390	80	22,5	285	392	70	19,7	265	392	70	20,9
III	11	280	300	110	28,2	281	300	111	28,3	275	290	117	29,9
	12	195	315	85	30,4	197	315	84	30,0	195	315	80	29,1
IV	13	235	235	80	25,4	238	237	77	24,4	230	235	80	25,4

Примечание. Общая вытяжка — 10,5. Средняя вытяжка — 1,20. Среднее обжатие — 90 мм.

Табл. 3 (продолжение)

Пример режима обжатий при прокатке 7-тонных слитков

№ калибра	№ про- пуска	1-й оператор				2-й оператор				3-й оператор			
		h_1 , мм	b_1 , мм	Δh , мм	$\frac{\Delta h}{h_0}$, %	h_1 , мм	b_1 , мм	Δh , мм	$\frac{\Delta h}{h_0}$, %	h_1 , мм	b_1 , мм	Δh , мм	$\frac{\Delta h}{h_0}$, %
I	0	730	650	—	—	730	650	—	—	730	650	—	—
	1	600	650	130	17,8	603	650	127	17,4	612	650	118	16,2
	2	515	650	85	14,2	525	650	78	12,9	525	650	87	14,2
	3	445	635	70	13,6	425	655	100	19,0	445	655	80	15,2
	4	365	660	80	18,0	360	660	65	15,3	360	660	85	19,1
II	5	512	375	148	22,4	515	370	145	22,0	517	370	143	22,3
	6	425	380	87	17,0	430	380	85	16,5	430	375	87	16,8
	7	340	385	95	22,3	340	385	90	20,9	340	385	90	20,9
	8	275	390	65	19,1	275	390	65	19,1	270	390	70	20,6
III	9	275	295	115	29,5	260	300	130	33,3	265	300	125	32,0
	10	195	315	80	29,1	195	319	65	25,0	197	315	68	25,6
IV	11	235	235	80	25,4	238	235	81	24,4	233	237	82	26,0

Примечание. Общая вытяжка — 8,6. Средняя вытяжка — 1,22. Среднее обжатие — 95 мм.

Табл. 3 (продолжение)

Пример режима обжатий при прокатке 5-тонных слитков

№ калибра	№ про-пуска	1-й оператор				2-й оператор				3-й оператор			
		h_1 , мм	b_1 , мм	Δh , мм	$\frac{\Delta h}{h_0}$, %	h_1 , мм	b_1 , мм	Δh , мм	$\frac{\Delta h}{h_0}$, %	h_1 , мм	b_1 , мм	Δh , мм	$\frac{\Delta h}{h_0}$, %
I	0	630	630	—	—	630	630	—	—	630	630	—	—
	1	480	635	150	23,8	482	635	148	23,5	450	635	180	28,6
	2	365	640	115	24,0	360	640	122	25,3	362	640	88	19,5
	3	505	375	135	21,1	505	370	135	21,1	515	372	125	19,4
II	4	430	380	75	14,8	419	380	86	17,0	430	377	85	16,5
	5	350	385	80	18,6	340	387	79	18,8	330	387	100	23,2
	6	265	390	85	24,3	278	392	62	18,2	265	392	65	19,7
	7	265	295	125	32,0	270	300	122	31,1	265	300	127	32,4
III	8	195	315	70	26,4	192	315	78	28,9	197	315	68	25,6
	9	235	235	80	25,4	239	232	76	24,1	235	234	80	25,4
IV													

Правда, такие режимы обжатий (130—150 мм) были отменены, так как при этом нарушалась нормальная работа оборудования, которое не было рассчитано на такие нагрузки, но они подтверждают возможность увеличения обжатий на гладких бочках валков как из условий захвата, так и из условий пластических свойств (качества) металла.

Интересный пример прокатки на блюминге слитка 720×590 мм обжатиями в первых 6 пропусках по 140 мм приводится П. Филипповым¹. Угол захвата при этом был равен 30° . Обжатия производились на гладкой бочке с рабочим диаметром 044 мм. Таким образом данные, приведенные в табл. 2, не являются преувеличенными, фактически углы захвата бывают больше.

При прокатке на гладкой бочке на реверсивных обжимных станах для определения обжатий следует пользоваться графиком (рис. 1) и формулами (1), (2).

Мощность двигателя

Мощность двигателя является важнейшим фактором, определяющим величины обжатий в большинстве пропусков при прокатке на реверсивных обжимных станах.

Для определения максимально возможного обжатия при данной мощности двигателя необходимо найти наибольший допустимый момент прокатки в каждом данном пропуске, исходя из максимального рабочего момента двигателя, т. е. из уравнения

$$M_{\text{доп}} = \frac{\varphi}{\theta} M_{\text{макс}} - M_a - M_x, \quad (3)$$

где $M_{\text{макс}}$ — максимальный рабочий момент двигателя, принимаемый равным $2,5 M_n$; для типового двигателя блюминга мощностью 7000 л. с. при $n = 50 \pm 120$ об/мин $M_{\text{макс}} = 250$ тм; для типового двигателя слябинга мощностью 10 000 л. с. при $n = 40 \pm 80$ об/мин $M_{\text{макс}} = 450$ тм;

φ — к. п. д. установки;

θ — коэффициент для учета снижения момента при числе оборотов, превышающем номинальное (n_n):

при $n > n_n$

$$\theta = \frac{n}{n_n},$$

при $n \leq n_n$

коэффициент $\theta = 1$;

(4)

M_a — момент холостого хода;

M_n — динамический момент при прокатке с ускорением.

¹ С. Н. Филиппов, Блюминг, его значение, конструкция и работа, Металлургиздат, 1933.

Наибольшие обжатия получаются при прокатке на постоянно скорости (или с небольшим ускорением валков), если скорость не превышает номинальную ($\theta = 1$).

На рис. 2 приведен график допускаемых моментов для типовых двигателей реверсивных станов в зависимости от θ (при $a = 2$ и 40 об/мин сек, $M_a = 30$ и 60 тм, $M_x = 5$ тм и $\varphi = 0,9$).

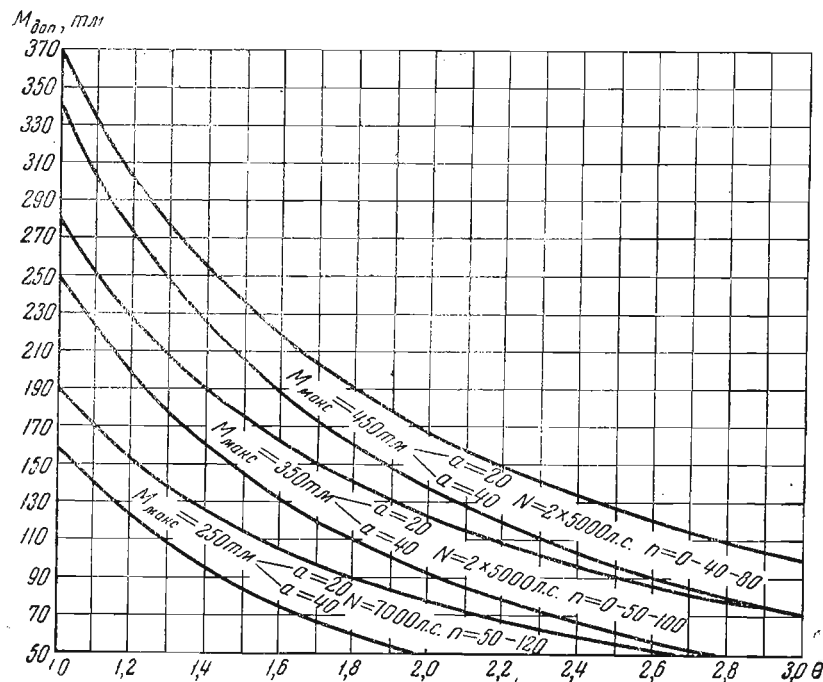


Рис. 2. Допускаемые моменты прокатки в зависимости от мощности двигателя, его скорости и ускорений.

Зная $M_{доп}$, можно определить наибольшее обжатие, приравняв $M_{доп}$ моменту прокатки ($M_{пр}$), тогда

$$M_{доп} = p \cdot b_c \sqrt{\Delta h \cdot R} (x \sqrt{\Delta h \cdot R} + f \cdot d), \quad (5)$$

где Δh — искомое обжатие (определяемое подбором или графически);

R — рабочий радиус валка;

b_c — средняя ширина раската;

p — полное удельное давление;

x — коэффициент для учета точки приложения равнодействующей вертикального давления на валок;

d — диаметр шейки вала;

f — коэффициент трения в шейках.

Коэффициент x найдем из равенства крутящих моментов от вертикальных усилий моментам от окружных усилий на прокатных валках

$$2P_x \cdot \frac{\sqrt{\Delta h R}}{2} = P_x \sqrt{\Delta h \cdot R} = 2P_D R = A_D \cdot \frac{R}{L_1},$$

где P — вертикальное усилие на валке;

P_D — окружное усилие на валке;

A_D — работа деформации прокатываемой полосы;

L_1 — длина полосы.

Примем по общеизвестной формуле

$$A_D = p v \ln \frac{1}{\eta},$$

где v — деформируемый объем;

$\eta = \frac{h_0}{h_1}$ — коэффициент обжатия.

Тогда после несложных преобразований;

$$x = 2,3 \frac{\lg \frac{1}{\eta}}{\frac{1}{\eta} - 1} \quad (6)$$

Значения x в зависимости от коэффициента обжатия приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения x в зависимости от коэффициента обжатий

$\frac{1}{\eta}$	x	$\frac{1}{\eta}$	x	$\frac{1}{\eta}$	x	$\frac{1}{\eta}$	x	$\frac{1}{\eta}$	x
1,01	0,990	1,11	0,948	1,21	0,906	1,31	0,872	1,41	0,838
1,02	0,988	1,12	0,944	1,22	0,904	1,32	0,867	1,42	0,835
1,03	0,983	1,13	0,938	1,23	0,900	1,33	0,864	1,43	0,831
1,04	0,978	1,14	0,935	1,24	0,895	1,34	0,862	1,44	0,829
1,05	0,976	1,15	0,932	1,25	0,892	1,35	0,858	1,45	0,825
1,06	0,970	1,16	0,927	1,26	0,887	1,36	0,854	1,46	0,822
1,07	0,967	1,17	0,922	1,27	0,885	1,37	0,850	1,47	0,820
1,08	0,963	1,18	0,919	1,28	0,880	1,38	0,846	1,48	0,816
1,09	0,957	1,19	0,914	1,29	0,877	1,39	0,844	1,49	0,813
1,10	0,952	1,20	0,909	1,30	0,874	1,40	0,840	1,50	0,810

Для блюмингов и слябингов, где вытяжки невелики, можно приближенно принять $x = 1$.

Учитывая громоздкость расчета обжатия по заданному $M_{доп}$ аналитически, приводим графическое решение этой задачи.

На рис. 3 дан график для определения средней длины пояса деформации $L_c = \sqrt{\Delta h \cdot R}$ по заданным $M_{доп}$, p и b_c (средняя ширина полосы $\frac{b_0 + b_1}{2}$) при $f = 0,05$ и $d = 660$ мм.

По полученному l_c находим обжатие

$$\Delta h = \frac{l_c^2}{R}, \quad (7)$$

что также можно взять из графика (рис. 4).

Данный графический метод в отличие от метода М. Л. Зароцкого [7] позволяет определить обжатие при любых рабочих диаметрах валков и для двигателя любой мощности.

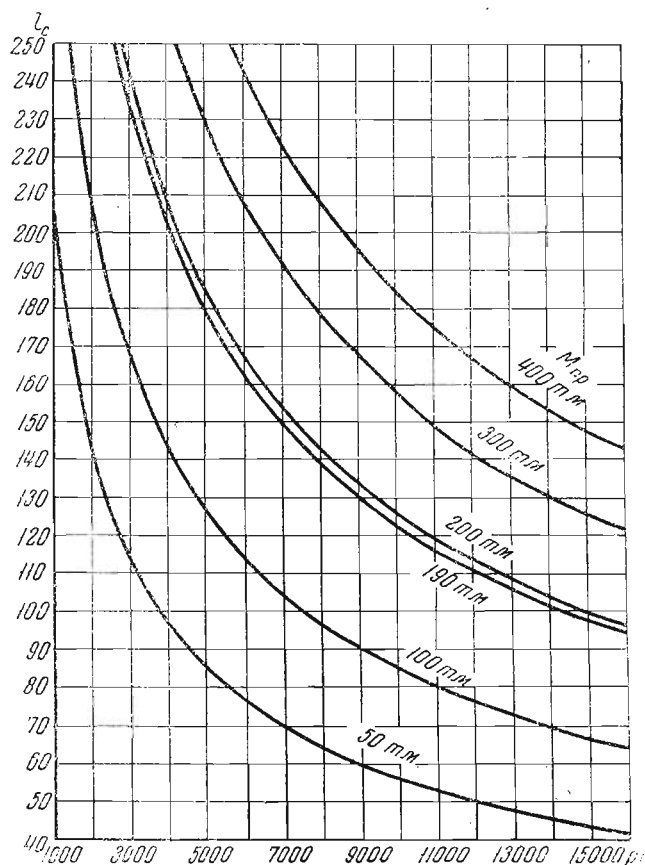


Рис. 3. Длина пояса деформации в зависимости от момента прокатки, ширины прокатываемой полосы и удельного давления.

Прочность рабочих валков

Допускаемое прочностью валков изгибающее усилие (пренебрегая кручением) может быть определено по известной формуле

$$P_{доп} = 0,1 D^3 [\sigma]_u \frac{L + l}{c(L + l - c)}, \quad (8)$$

где D , L и l — соответственно рабочий диаметр, длина бочки и длина шейки валка;

c — расстояние от середины шейки валков до середины рассчитываемого калибра.

$[\sigma]_u$ — допускаемое напряжение изгиба.

$$l_c = \frac{P}{p \delta_c}$$

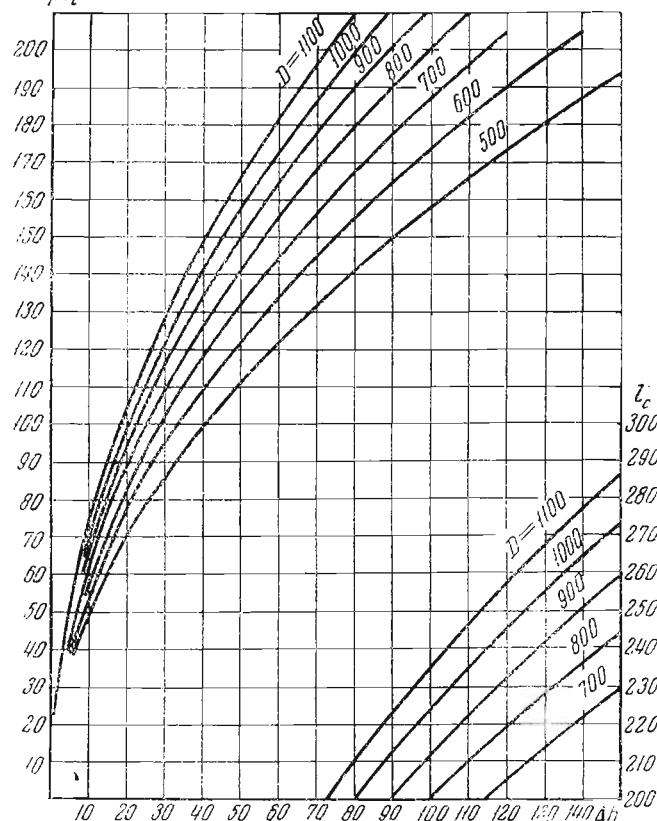


Рис. 4. Связь между длиной пояса деформации, диаметром валков и обжатием.

На рис. 5 приведен график для определения допускаемого давления на валок $P'_{доп}$ при $D_p = 1000$ мм и $[\sigma]_u = 10$ кг/мм².

Для других значений D_p и $[\sigma]_u$ нужно $P'_{доп}$, найденное по графику, умножить на коэффициент K_D . Значения K_D приведены на рис. 6.

$$K_D = \left(\frac{D}{1000} \right)^3 \frac{[\sigma]_u}{10}. \quad (8')$$

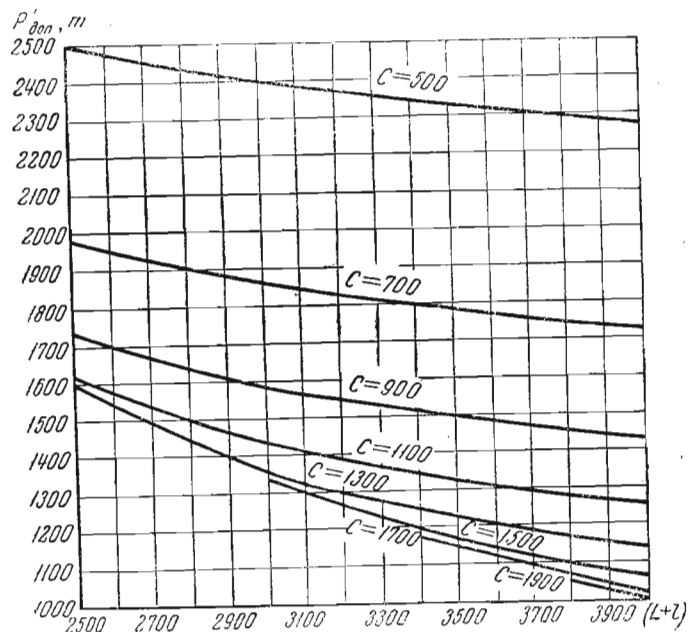


Рис. 5. Допускаемое давление на валок из условий прочности при $D_p = 1000$ мм и $\sigma_b = 10$ кг/мм².

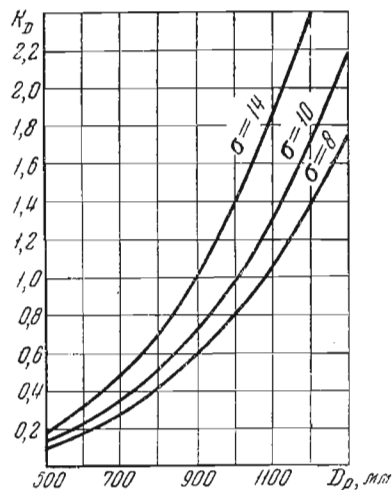


Рис. 6. Поправочный коэффициент к графику на рис. 5.

Тогда полное давление

$$P_{доп} = K_D \cdot P'_{доп}. \quad (9)$$

При прокатке на листовых станах и слябинге

$$P_{доп} = \frac{0,4 D^3 [\sigma]_{\alpha}}{L + l - 0,5B}, \quad (10)$$

где B — ширина раската.

(Определив $P_{доп}$ и приравняв его давлению раската на валок

$$P_{доп} = p b_c \sqrt{\Delta h R}, \quad (11)$$

можно найти обжатие

$$\Delta h = \frac{1}{R} \left(\frac{P_{доп}}{p b_c} \right)^2. \quad (12)$$

Значение полного удельного давления (p), входящего в предшествующие формулы (11) и (12), определяется выражением

$$p = k_f \cdot p_0,$$

где p_0 — удельное давление на контактной поверхности без учета внешнего трения;

k_f — коэффициент для учета влияния внешнего трения, зависящий от обжатия (Δh) и размера пояса деформации.

Пример графического расчета обжатий для листового стана 950 дан на рис. 7.

Здесь

$$l_y = \frac{P_{доп}}{p_0 b_c}.$$

Удельное давление нагретого металла (p_0) определено по формулам [2; 8; 16]:

а) при $t > (t_{пл} - 575)$

$$p_0 = \frac{0,95 t_{пл} - t}{1500} \sigma_b \approx \frac{t_{пл} - 75 - t}{1500} \sigma_b; \quad (13)$$

б) при $t < (t_{пл} - 575)$

$$p_0 = \left(\frac{t_{пл} - t}{100} \right)^2 \frac{\sigma_b}{100}; \quad (13')$$

где $t_{пл}$ — температура плавления стали, °C;

σ_b — предел прочности стали при 20° C, кг/мм².

Значения $t_{пл}$ и σ_b для углеродистых сталей приведены на рис. 8.

На рис. 9 приведены значения p_0 (кг/мм²) для трех марок сталей.

Коэффициент k_f принят по А. Ф. Головину [13]

$$k_f = 1 + f \left(\frac{\sqrt{\Delta h R}}{h_0 - \frac{\Delta h}{2}} - 1 \right), \quad (14)$$

где f — коэффициент трения на бочке валка ($f \approx 0,33$).

При расчете удельных давлений нужно знать понижение температуры полосы по пропускам, что особенно важно для листовых станов, где имеет место наибольшее понижение температуры полосы в процессе прокатки.

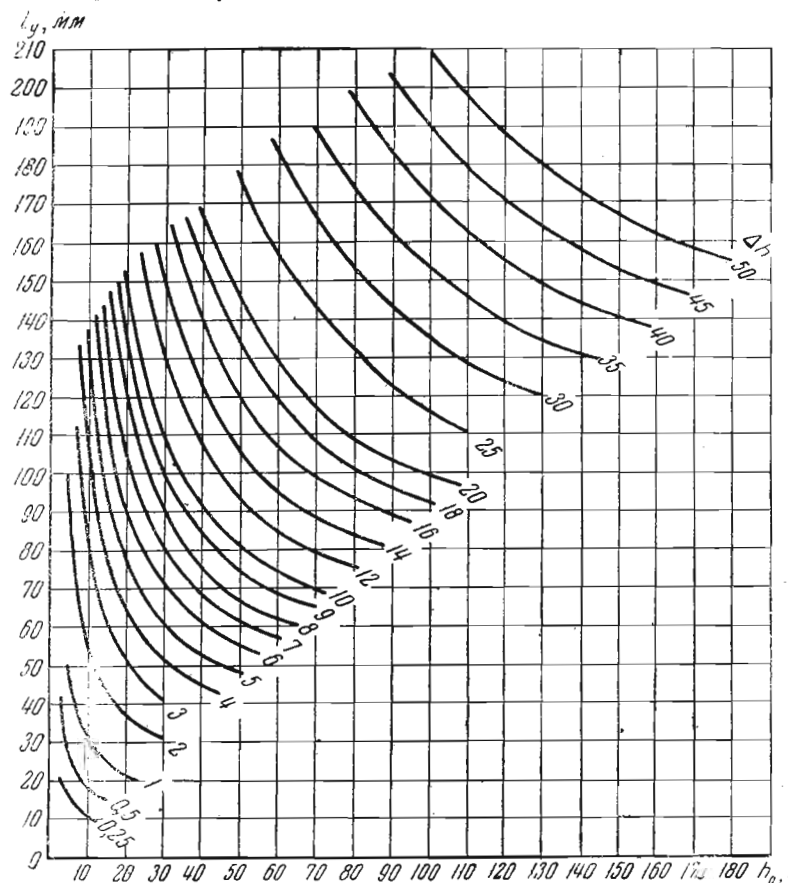


Рис. 7. Допускаемые обжатия из условий прочности для листового стана и слэббланда при $D_p = 1000$ мм.

Температура любого пропуска при прокатке листа

$$t_i = t_0 - \frac{K}{h_{i-1}},$$

где h_{i-1} — толщина полосы после $(i-1)$ пропуска;
 K и t_0 — константы, значение которых разъяснено ниже.

При известных температурах начала и конца прокатки

$$K = \frac{t_1 - t_k}{h_0 - h_{k-1}} \cdot h_0 \cdot h_{k-1}.$$

Если известна только начальная температура t_1 , то

$$K = \frac{t_1 - 400}{16} \cdot \frac{\lambda_c}{\lambda_c - 1} \cdot Z, \quad (17)$$

где λ_c — средняя вытяжка за пропуск;
 Z — среднее время пропуска с паузой, сек.;

$$t_0 = t_1 + \frac{K}{h_0}. \quad (18)$$

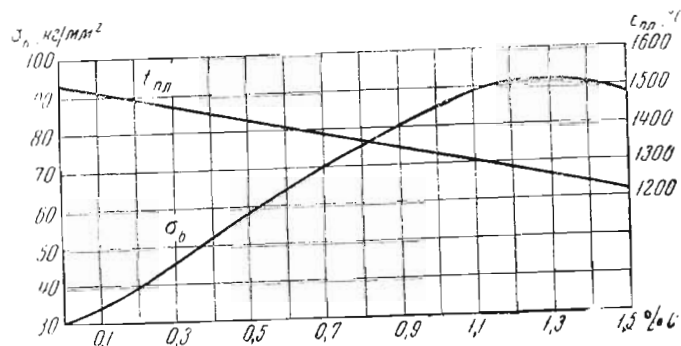


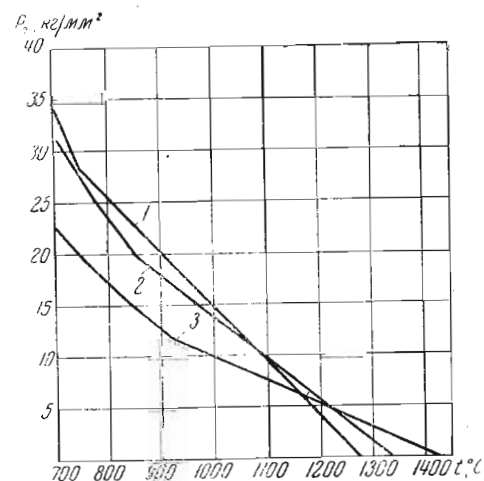
Рис. 8. Температура плавления $t_{пл}$ и пределы прочности (σ_b) углеродистых сталей.

Рис. 9. Полезные удельные давления (пределы упрочнения) для углеродистых сталей:

$C = 0,9\%$; $t_{пл} = 1350^\circ$; $\sigma_b = 80$ кг/мм²;

$C = 0,5\%$; $t_{пл} = 1425^\circ$; $\sigma_b = 60$ кг/мм²;

$C = 0,1\%$; $t_{пл} = 1500^\circ$; $\sigma_b = 35$ кг/мм².



Понижение температуры последовательно в каждом пропуске при прокатке листов можно определить по формуле [2]

$$\Delta t = \frac{t_1 - 400}{16} \cdot \frac{Z}{n}. \quad (19)$$

Для расчета падения температуры при прокатке блюмсов и слябов можно пользоваться формулой

$$\Delta t = \frac{t_1 - 400}{3} \left(\frac{Z}{H} + \frac{Z}{B} \right), \quad (20)$$

где H и B — размеры сечения остывающего блюмса или сляба.

Пример 1. Определить по мощности двигателя наибольшее обжатие на блюминге для углеродистой стали с содержанием 0,5% С ($t_{пл} = 1425^\circ$; $\sigma_b = 60 \text{ кг/мм}^2$): если дано: $D_p = 800 \text{ мм}$; сечение слитка $600 \times 600 \text{ мм}$; $n = 70 \text{ об/мин}$. Двигатель типовой МП-24-7000 (7000 л. с.; $M_{\max} = 250 \text{ тм}$) $n_n = 50 \text{ об/мин}$, $a = 20 \text{ об/мин. сек}$. Температура пропуска 1150°C .

Так как по методу Головина в крупных сечениях $k_f = 1$, то $p = p_0$. Находим p_0 по графику на рис. 9 или по формуле (13):

$$p_0 = \frac{t_{пл} - 75 - t}{1500} \sigma_b = \frac{1425 - 75 - 1150}{1500} \cdot 60 = 8 \text{ кг/мм}^2;$$

$$pb_c \approx p_0 b_0 = 8 \cdot 600 = 4800 \text{ кг/мм};$$

$$\theta = \frac{n}{n_n} = \frac{70}{50} = 1,4.$$

Тогда по графику на рис. 2 по заданным $M_{\max} = 250 \text{ тм}$, $a = 20 \text{ об/мин. сек}$ и $\theta = 1,4$ находим $M_{доп} = 126 \text{ тм}$.

Интерполируя по графику, приведенному на рис. 3, находим $l_c = 144 \text{ мм}$ и, наконец, по графику, приведенному на рис. 4, при $D_p = 800 \text{ мм}$, определяем $\Delta h = 52 \text{ мм}$.

Если число оборотов не превышает номинального ($\theta = 1$), то $M_{доп} = 190 \text{ тм}$ (рис. 2); $l_c = 182 \text{ мм}$ (рис. 3) и обжатие из условий мощности двигателя могло бы составить

$$\Delta h = \frac{l_c^2}{R} = \frac{182^2}{400} = 83 \text{ мм}.$$

Пример 2. По условиям предыдущего примера найти обжатие по прочности валка при $L = 2800 \text{ мм}$, $l = 630 \text{ мм}$ и $c = 700 \text{ мм}$. Находим по графику, приведенному на рис. 5, $P'_{доп} = 1800 \text{ т}$.

Принимая $[\sigma]_u = 12 \text{ кг/мм}^2$ по графику, приведенному на рис. 6 определяем $K_D = 0,61$.

$$\text{Тогда } P_{доп} = K_D \cdot P'_{доп} = 0,61 \div 1800 = 1100 \text{ т}.$$

Рассчитываем длину пояса деформации

$$l_c = \frac{P_{доп}}{pb_c} = \frac{1100000}{8 \cdot 600} = 230 \text{ мм}.$$

По графику, приведенному на рис. 4, получим $\Delta h = 132 \text{ мм}$.

Если усилие будет приложено по середине бочки ($c = 1715 \text{ мм}$) тогда соответственно получим:

$$P'_{доп} = 1170 \text{ т}, P_{доп} = 715 \text{ т}; l_c = 149 \text{ мм} \text{ и } \Delta h = 55 \text{ мм}.$$

Качество металла

Выше указывалось, что наряду с рассмотренными основными факторами (условия захвата, мощность двигателя, прочность деталей стана), лимитирующими величину обжатий, к ним относят также качество металла. Обосновывается это тем, что металл имеет ограниченную пластичность и, следовательно, может выдерживать ограниченные деформации (обжатие), особенно в литом состоянии (слитки).

Безусловно, стальной слиток не может выдержать чрезмерно большие деформации. Но, с другой стороны, нельзя преуменьшать пластичность стали и задаваться произвольной деформацией.

В большинстве случаев предельное обжатие определяется не качеством металла, а тремя основными факторами, рассмотренными выше.

Попытки ограничивать относительную деформацию пластичностью металла не дают каких-либо определенных результатов, наоборот, приводят к противоречиям и к снижению производительности стана.

Сторонники ограничения относительной деформации обосновывают необходимость осторожных и небольших обжатий при прокатке на блюминге, особенно в первых пропусках, неравномерностью деформации, свойственной прокатке на блюминге. Большую неравномерность деформации они объясняют малыми обжатиями при больших сечениях слитка. «Степень неравномерности деформации зависит от отношения величины обжатия к высоте слитка до прокатки (т. е. от относительной деформации $\frac{\Delta h}{h_0}$ — В. Т.): чем меньше это отношение, тем выше неравномерность деформации» [7].

Показав, что чем меньше относительная деформация, тем больше неравномерность деформации, делают малоубедительный вывод, что в первых пропусках обжатия должны быть в пределах 8—12%.

На рис. 10 приведена схема относительных обжатий по Зарошницкому [7] для мягкой и крепкой стали¹ (последняя пунктиром) и по данным блюминга ММК (калибровка 1938 г.). Из сопоставления кривых видно, что фактические обжатия значительно выше рекомендуемых. При этом фактические обжатия для крепких сталей мало отличаются от фактических обжатий для мягких сталей и значительно превосходят теоретические обжатия для мягких сталей.

Так, например, фактические обжатия в первых пропусках достигают 18% и более как для мягких, так и для твердых сталей против рекомендуемых 12% для мягких и 10% для твердых сталей.

Фактические обжатия в последующих пропусках для твердых сталей достигают свыше 32%, а рекомендуемые не более 20%.

¹ Деление сталей на «мягкие» и «крепкие» довольно неопределенно. По данным ММК к мягким сталям относим марки ст. 1—ст. 5 и соответствующие им (В. Т.).

Иногда считают, что абсолютными обжатиями нельзя задавать так как они для разных слитков разные, поэтому правильнее задаваться относительными обжатиями. В фактических же калибровках именно относительные обжатия получаются слишком разными, а если присмотреться к абсолютным обжатиям, то они как раз мало изменяются по пропускам. В калибровке ММК 1938 г. все обжатия находились в пределах 85—90 мм, а в калибровке 1951 г. в пределах 75—85 мм.

Если пользоваться относительными обжатиями, то получается, что чем меньше слиток, тем меньше должно быть абсолютное обжа-

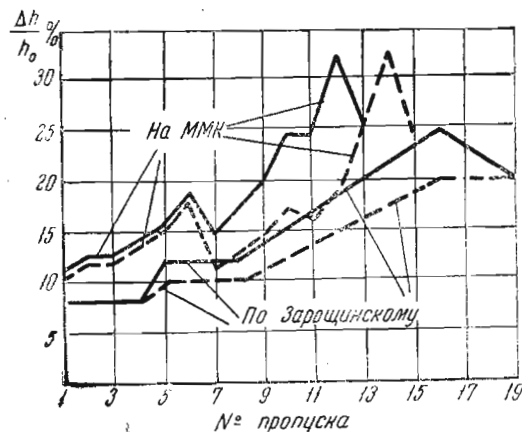


Рис. 10. Сравнение обжатий по Зарошинскому с фактическими (ММК).

качеством металла, а более конкретными факторами (захват, мощность, прочность деталей стана).

Так, например, для слитка мягкой стали ($p = 6 \text{ кг/мм}^2$) сечением $800 \times 800 \text{ мм}$, исходя из относительной деформации, можно допустить обжатие $800 \times (0,1-0,12) = 80-96 \text{ мм}$.

Условия захвата в валках $D_p = 900 \text{ мм}$ без насечки позволяют обжать при малых скоростях также 85—95 мм, но мощность двигателя (в типовом блюминге 7000 л. с.) допускает обжатия в этом случае лишь 75 мм.

Следовательно, величина обжатия в данном случае будет определяться мощностью двигателя, а не относительной деформацией, которая составит здесь лишь 9,4%.

Для слитка меньших размеров, например, $600 \times 600 \text{ мм}$ предельное обжатие по относительной деформации составит 60—72 мм, а по мощности двигателя 90 мм (условия захвата остаются те же — 85—95 мм). Здесь необходимо принять обжатие, исходя из мощности двигателя и условий захвата — 90 мм (15%), а не 60—70 мм (10—12%).

Если предположить, что слитки $800 \times 800 \text{ мм}$ из условий качества металла могут выдержать обжатие 85—95 мм, то слиток $600 \times 600 \text{ мм}$ тем более выдержит это обжатие. Поэтому снижать обжатие для меньшего слитка нецелесообразно. В практике применяются гораздо большие обжатия, чем это получается, исходя из относительной деформации, например по Зарошинскому. По данным, приведенным в табл. 3, видно, что слитки сечением 800×720 и $630 \times 630 \text{ мм}$ могут выдерживать значительно большие обжатия — до 130—150 мм и более.

При прокатке слитков иногда могут образовываться трещины и рванины в результате плохого качества металла, низкого и неравномерного нагрева слитка, неправильного чередования кантовок, но эти исключения нельзя возводить в правило. У подавляющего большинства слитков трещины не образуются; эти слитки могут выдерживать большие обжатия, чем допускается условиями захвата, мощности, прочности деталей стана.

В случае появления трещин необходимо отыскать и устранить их действительные причины, а не занижать общий режим обжатий. В этом отношении крайне полезно первую кантовку слитка делать после второго пропуска, а не позднее.

Кантовка после первого пропуска на типовых обжимных реверсивных станах невозможна, так как кантователь находится с передней стороны стана.

Число пропусков и схема обжатий при прокатке блюмсов

Окончательное и притом минимальное число пропусков может быть определено лишь после тщательного расчета обжатий для каждого пропуска в отдельности. Без этого число пропусков можно определить лишь ориентировочно.

М. Л. Зарошинский [7, стр. 105—106] за основу выбора числа пропусков берет среднюю вытяжку, принимая ее для мягких сталей 1,12—1,16, а для крепких 1,10—1,14 — и полученное число пропусков считает оптимальным. В дальнейшем он делает проверку только на выявление перегрузки по мощности двигателя и прочности валков. Такой метод расчета обжатий и числа пропусков не рационален и сводится к получению числа пропусков, которое является средним из существующих.

Фактически колебание средних вытяжек на блюмингах встречается в более широких пределах — от 1,10 до 1,19, причем для крепких сталей (например, рельсовых) средние вытяжки мало отличаются от таковых для мягких сталей.

При широком диапазоне изменения средних вытяжек трудно правильно задаться ими и получить оптимальное число пропусков. Последнее зависит от мощности двигателя, конечного сечения блюмса, температуры нагрева слитка и других факторов. «Крепость» же различных углеродистых сталей при температурах прокатки 1200—1250° мало отличается и, следовательно, мало влияет на среднюю вытяжку.

Так как для расчета наивыгоднейших режимов обжатий на блюминге необходимо наметить предварительную схему обжатий, которая в процессе расчета подвергается значительным изменениям, то естественно стремление, чтобы построение этой схемы было наиболее простым и быстрым.

Для построения предварительной схемы обжатия при заданных стане и слитке можно рекомендовать следующий способ.

Предварительно число пропусков определяется по известному выражению

$$n = \frac{\Sigma \Delta h}{\Delta h_{cp}} = \frac{1,15 [(H - h_k) + (B - b_k)]}{\Delta h_{cp}}, \quad (21)$$

где 1,15 — коэффициент для учета среднего уширения;

H и B — толщина и ширина слитка по наибольшему сечению;

h_k и b_k — размеры блюмса;

Δh_{cp} — среднее абсолютное обжатие за пропуск.

Формула (21) построена из условия, что число пропусков равно суммарному обжатию, деленному на среднее обжатие.

На типовом блюминге при хорошо работающих калибровках абсолютное обжатие мало изменяется по пропускam и среднее его значение составляет 65—80 мм.

Если слиток прямоугольного сечения (например, 760 × 680 мм, 805 × 720 мм и т. п.), т. е. сечения, наиболее выгодного при прокатке на квадратный блюмс, то обжатием можно задаваться по верхнему пределу.

Полученное по формуле (21) число n округляется до ближайшего большего нечетного целого числа. Суммарное обжатие делят на полученное число пропусков и получают расчетное среднее обжатие.

Если слиток квадратного сечения и прокатывается на квадратный блюмс, то обжатия по пропускam будут неравномерными, так как одна половина суммарного обжатия будет производиться за $\left(\frac{n+1}{2}\right)$ пропусков, а другая за $\left(\frac{n-1}{2}\right)$ пропусков. В этом случае нужно задаваться Δh_{cp} по нижнему пределу. Получив число пропусков (ближайшее большее, целое и нечетное), определяют среднее обжатие с каждой стороны слитка.

Со стороны с меньшим числом пропусков среднее обжатие будет

$$\Delta h_{cp} = \frac{1,15 [(H - h_k) + (B - b_k)]}{n - 1} \quad (21')$$

и со стороны с большим числом пропусков

$$\Delta h'_{cp} = \frac{1,15 [(H - h_k) + (B - b_k)]}{n + 1} \quad (21'')$$

Распределить обжатия по соответствующим пропускam можно лишь при составлении схемы обжатий в виде таблицы (табл. 5) и определении числа и порядка кантовок.

На схему должны быть нанесены ориентировочные уширения, возрастающие от первого пропуска к последнему приблизительно

от 0,1Δh до 0,2Δh. Затем по заданным начальной и конечной температуре находят удельные давления в первом и последнем пропуске, распределяют их по пропускam и вычисляют моменты прокатки — M_k (рис. 2, 3, 4).

После вычисления момента прокатки, допускаемого перегрузочной способностью двигателя, обжатия корректируются по пропускam. Если все же получается перегрузка двигателя, нужно число пропусков увеличить на два и составить новую схему. При

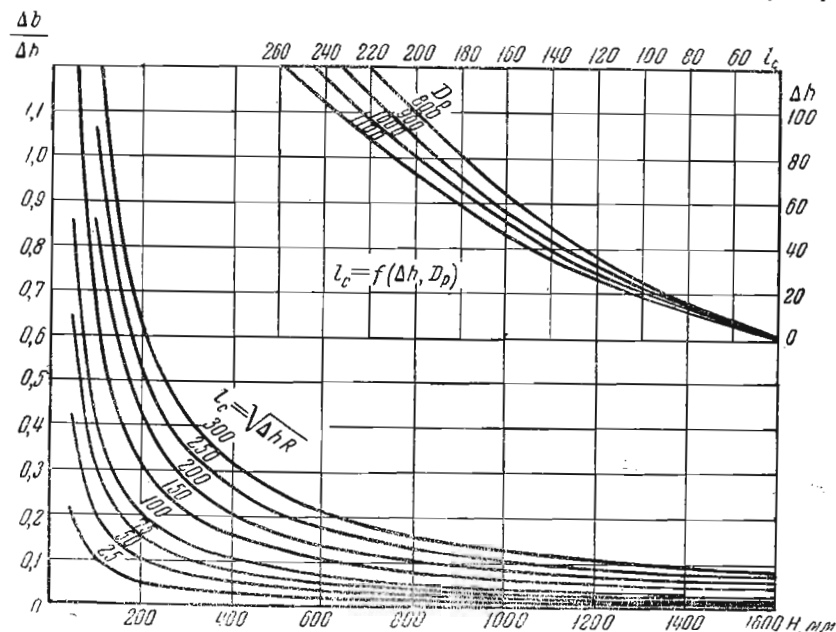


Рис. 11. Уширение по С. Н. Петрову [14, стр. 169].

этом надо учитывать, что условия нагрева двигателя могут ограничивать величину обжатий в большей степени, чем его перегрузочная способность (рис. 25; 30; 35; 36).

Если получается значительная недогрузка двигателя, нужно сократить два пропуска.

Вместо схемы можно использовать любую существующую калибровку и путем анализа скорректировать ее.

После корректирования схемы обжатий по мощности, проверяют уширение (например, по формуле С. Н. Петрова [14], рис. 11) и окончательно устанавливают размеры полосы по пропускam. Затем по рис. 1 и 2 определяют допустимые скорости при захвате и максимальные для каждого пропуска. Для наиболее тяжелого пропуска производится проверка валков на прочность (рис. 5 и 6).

При прокатке слябов, где обжатие зависит еще и от прочности валков, составить ориентировочную схему обжатий затруднительно.

но, в этом случае следует сразу вести полный расчет, начиная с первого пропуска.

Пример составления схемы обжатий для блюминга приводится ниже.

Пример расчета схемы обжатий

Для сопоставления результатов расчета примем пример, приведенный М. Л. Зарошинским [7, стр. 119—126].

Размеры слитка $\frac{630 \times 630}{570 \times 570} \times 2100$ мм; вес его 4600 кг; сечение блюмса 200×200 мм; сталь углеродистая с содержанием 0,6% С; ($t_{пл} = 1400^\circ\text{C}$; $\sigma_b = 70$ кг/мм²) привод блюминга осуществляется типовым двигателем 7000 л. с. ($M_{\max} = 250$ тм) с числом оборотов $n = 0-50-120$ об/мин.

Определим предварительно число пропусков по формуле (21). Среднее обжатие за пропуск, как было указано выше, достигает 65—80 мм. Примем $\Delta h_{cp} = 70$ мм, тогда

$$n = \frac{1,15 [(H - h_k) + (B - b_k)]}{\Delta h_{cp}} = \frac{1,15 (630 - 200 + 630 - 200)}{70} = \frac{990}{70} \approx 15.$$

Так как слиток и блюмс квадратные, то обжатия будут неравномерными.

Для стороны с меньшим числом пропусков обжатие составит:

$$\Delta h_{cp} = \frac{\Sigma \Delta h}{n - 1} = \frac{990}{15 - 1} = 71 \text{ мм};$$

для стороны с большим числом пропусков

$$\Delta h_{cp} = \frac{\Sigma \Delta h}{n + 1} = \frac{990}{15 + 1} = 62 \text{ мм}.$$

Составим схему обжатий в виде таблицы (табл. 5), кантовки наметим после 2, 6, 10 и 14 пропусков. Делать кантовки после каждых двух пропусков нецелесообразно, так как это снизит производительность; в практике прокатки рельсовых сталей (крепких) полосу кантуют через 4 и даже 6 пропусков.

Значения $\Delta h = \Delta h_{cp}$ заносим в графы 1—2, 7—10 и 15 пропусков; а $\Delta h'_{cp}$ в графы 3—6 и 11—14 пропусков. Первоначально в 1—2 и 7—10 пропусках были намечены обжатия по 70 мм и в 15 пропуске — 75 мм. Но дальнейший расчет показал, что в 1 и 2 пропусках получилась перегрузка двигателя по $M_{доп}$ и обжатие в них пришлось снизить. Кроме того, получилась ошибка в уширении на 10 мм в сторону занижения, вследствие чего необходимо было прибавить по 5 мм в 7, 8 и 9 пропусках (в табл. 5 приведены уже исправленные обжатия).

В оставшихся пропусках сначала были намечены обжатия по 62 мм, но условия кантовки вынудили перераспределить обжатия.

После записи обжатий следует запись уширений. В 1 и 3 пропусках, в которых идет сглаживание конусности слитка, уширением пренебрегаем.

На схеме приведены округленные уширения.

Таблица 5

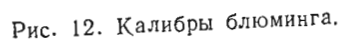
Схема обжатий слитка стали с 0,6% С в 15 пропусков ($t^\circ = 1200-1150^\circ$)

№ про- пуска	№ кан- тибра	D_p , мм	h_1 , мм	b_1 , мм	Δh , мм	Δb , мм	p кг/мм ²	l_c , мм	pb_c кг.мм	P , т	M_c , т.м	$n_{загв}$ об/мин	$n_{в}$ об/мин	L_1 , м
1	I	950	565	630	65/5	0	5,8	(129)	3660	640	(104)	—	67	2,1
2		950	505	635	60	5	5,9	169	3750	630	127	38	69,5	2,1
3		950	560	505	75/15	0	6,0	(146)	3030	(573)	(114)	—	69,5	2,1
4		950	485	514	75	9	6,1	189	3110	588	131	25	67,5	2,35
5		950	415	523	70	9	6,2	182	3220	586	126	30	70	2,7
6	I	950	350	530	65	7	6,4	175	3370	590	124	35	71	3,15
7		800	455	360	75	10	6,6	173	2340	405	84	5	95	3,6
8		800	380	370	75	10	6,8	173	2480	429	90	5	90	4,16
9		800	305	380	75	10	7,0	173	2630	455	95	5	86,5	5,05
10		800	235	390	70	10	7,2	168	2770	465	94	17	87,5	6,4
11	II	800	335	245	55	10	7,4	148	1780	264	48	41	120	7,13
12		800	280	255	55	10	7,6	148	1900	282	51	41	120	8,2
13		800	230	265	50	10	7,8	141	2030	286	50	45	120	9,6
14		800	183	275	47	10	8,0	137	2160	296	50	48	120	11,6
15		800	200	200	75	17	8,2	173	1570	272	56	5	120	14,6

Примечания: 1. В числителе — обжатия по толстому концу слитка, в знаменателе — по тонкому.
2. В скобках — средние значения по толстому и тонкому концу слитка.
3. X — кантовка.

Получив заданные размеры блюмса, распределяют пропуски по калибрам. Размеры валков примем как и у М. Л. Зарошинского (рис. 12). На гладкой бочке дадим первые 6 пропусков. В первом ка-

Получив заданные размеры блюмса, распределяют пропуски по калибрам. Размеры валков примем как и у М. Л. Зарошинского (рис. 12). На гладкой бочке дадим первые 6 пропусков. В первом ка-



Удельные давления вычисляем по формуле (1) при температуре прокатки 1200°C :

$$p = \frac{t_{пл} - 75 - 1200}{1500} \cdot \sigma_b = \frac{1400 - 75 - 1200}{1500} 70 = 5,8 \text{ кг/мм}^2;$$

при конечной температуре прокатки 1150°C

$$p = \frac{1400 - 75 - 1150}{1500} \cdot 70 = 8,2 \text{ кг/мм}^2.$$

В остальных пропусках удельное давление p распределяем равномерно. В примере М. Л. Зарощинского удельные давления получены по формуле Экелунда $8,4 \div 11,3 \text{ кг/мм}^2$, но при температурах на 100° ниже. При температуре $1200\text{—}1150^\circ$ они составили бы $5,6 \div 7 \text{ кг/мм}^2$. Формула Экелунда, как правило, дает заниженные удельные давления. Интервалы температур $1100\text{—}1050^\circ$ при прокатке на блюминге для стали с содержанием $0,6\% \text{C}$ не применяются.

Далее вычисляется

$$pb_c = p(b_0 + 0,5\Delta b),$$

где b_0 — ширина перед пропуском;

$$l_c = \sqrt{0,5 \Delta h \cdot D_p}.$$

Полученные данные позволяют найти момент прокатки $M_{пр}$ по рис. 3. Полученное значение $M_{пр}$ сравнивается с $M_{доп}$ (рис. 2). Если $M_{пр} < M_{доп}$, то при $\alpha = 1$ $M_{пр}$ получится больше $M_{доп}$, нужно

В случае, если при $\theta = 1$ M_{np} получится больше $M_{доп}$, нужно уменьшить обжатие в данном пропуске.

Прочность валков при прокатке на блюминге блюмсов обычно не лимитирует, однако проверку валков нужно произвести.

Определив усилие по пропускам $P = pb_c I_c$, а также расстояния от середины калибров до середины шейки s и $P_{доп}$ по рис. 5 и 6, находим, что при $[\sigma]_u = 12 \text{ кг/мм}^2$ валки по прочности значительно недогружены.

Наибольшая нагрузка на валок, равная 640 т, имеет место в первом пропуске при допускаемой 1400 т, т. е. напряжение в валке составляет: $\frac{640}{1400} \cdot 12 = 5,5 \text{ кг/мм}^2$.

Окончательный результат определяется из условий нагрева двигателя, т. е. в конце всего расчета. Однако удачно составленная предварительная схема обжати́й ускоряет расчет, так как при этом потребуется меньше перерасчетов.

Число пропусков и схема обжати́й при прокатке слябов

Составление схемы обжатий для прокатки узких слябов на блюминге производится аналогично схеме для блюмсов. Прокатка же широких слябов как на блюминге, так и на слябинге имеет свои особенности. Так, например, при большой ширине слябов вследствие необходимости больших моментов двигателя обжатия к концу прокатки приходится значительно снижать.

Так как при прокатке широких слябов величина обжатия может изменяться в значительных пределах, то при ориентировочном определении числа пропусков нельзя ориентироваться ни на средние вытяжки, ни на средние обжатия.

Учитывая, что обычно запас прочности валков достаточен, определение числа пропусков можно сделать лишь исходя из мощности двигателя. При этом решающее значение имеет не максимальный допускаемый момент двигателя, а среднеквадратичный момент, т. е. условия прохождения по нагреву. Поскольку среднеквадратичный момент определяется лишь в окончательной стадии всех расчетов скоростных и динамических режимов прокатки, то любая предварительная схема обжатий не может быть надежной. Тем не менее составление предварительной схемы, как основы для дальнейших расчетов и корректировок, необходимо производить, если нет существующих приемлемых схем обжатий (практических).

Для предварительной схемы обжати́й при прокатке широких слябков как на блюминге, так и на слябинге можно рекомендовать

метод М. Л. Зарощинского [7]. По этому методу обжатия в первом и последнем пропуске рассчитывают по допускаемому моменту двигателя и их полусумму принимают за среднее обжатие, по которому и определяют число пропусков (за исключением ребровых).

Для обжатия слитка по его ширине, а также для лучшего удаления окалины, помимо основных (пластовых) пропусков, в начале прокатки дают от двух до четырех ребровых пропусков. В связи с этим ширину слитка выбирают на 50—200 мм больше ширины сляба. Кроме того, после каждых 2—6 пластовых пропусков необходимо снятие уширения и проглаживание боковой кромки сляба. Последнее на блюмингах производится также в ребровых пропусках, а на слябингах при помощи вертикальных валков.

На слябинге отечественной конструкции часто вообще не дают ребровых пропусков и ширину слитка принимают лишь на 30—100 мм более ширины сляба. Для удаления окалины после 4 или 6 пропусков производится кантовка слитка на 180°.

Последний пропуск иногда дается почти без обжатия, что благоприятствует получению плоской боковой кромки сляба, так как сляб в этом случае выдается непосредственно из вертикальных валков. Выпуклая боковая кромка слябов, полученная в результате больших обжатий в последнем пропуске через горизонтальные валки, может привести к «выпучиванию» при перемещении их в методических нагревательных печах.

При прокатке широких слябов на блюминге получается значительная потеря времени при ребровых пропусках, так как при этом приходится делать значительные перемещения верхнего вала перед и после ребровых пропусков. Время перемещения вала в зависимости от соотношения ширины и толщины сляба, а также в зависимости от скорости нажимного устройства стана может составить 4÷12 сек.

При наличии у блюминга одного кантователя каждый ребровый пропуск приходится сдвигать, что также вызывает излишнюю затрату времени.

При прокатке слябов на слябинге также имеется дополнительная затрата времени, необходимая для прохождения слитком расстояния между горизонтальными и вертикальными валками в обоих направлениях. Однако в большинстве пропусков это время перекрывается одновременной прокаткой в горизонтальных и вертикальных валках. Общее время пауз на слябинге значительно меньше, чем на блюминге.

Благодаря короткой бочке валков слябинга и значительному рабочему диаметру их, запас прочности валков у слябинга значительно больше, чем у блюминга. Это позволяет устанавливать при слябингах более мощные приводы, а следовательно, вести прокатку в меньшее число пропусков, чем на блюминге. В результате слябинг дает более высокую производительность, чем блюминг при одинаковом сортаменте прокатываемых слябов.

ГЛАВА II

РЕЖИМ СКОРОСТЕЙ

Выше мы показали, что рациональным является режим прокатки, при котором достигается наибольшая производительность, допускаемая реальными лимитирующими факторами (условиями захвата, мощностью двигателя, прочностью деталей стана) для каждого конкретного стана, каждого отдельного прокатываемого профиля с учетом размеров слитка, марки стали, температуры прокатки и других конкретных условий.

Рациональный режим прокатки может быть получен лишь при оптимальном соотношении обжатия, скоростей и моментов двигателя. Поскольку важнейшее значение для производительности при данном слитке имеет число пропусков, в основу расчета должна быть принята рациональная калибровка с минимальным числом пропусков с учетом максимального момента при заданном двигателе и прочности валков. При наличии такой калибровки в зависимости от обжатий и пауз устанавливается для каждого пропуска в отдельности наивыгоднейший режим скоростей.

Если двигатель не задан, то по режиму обжатий и скоростей рассчитывают потребный двигатель. Если двигатель задан, то определяется его загрузка. В случае перегрузки двигателя по нагреву ($M_{кв} > M_n$) сначала корректируют скоростной режим путем снижения максимальных скоростей и, если этого недостаточно, увеличивают число пропусков на два, и весь расчет делают заново.

Случай значительной недогрузки двигателя при рациональной калибровке мало вероятен, так как режим обжатий обычно обуславливается допускаемыми крутящими моментами двигателя.

При заданных валках, режиме обжатий и числе пропусков (выбор оптимального слитка — самостоятельная задача) определение рационального режима прокатки сводится к рациональному режиму скоростей с учетом мощности двигателя, который и дает минимально возможный период прокатки, следовательно, и максимальную производительность.

Расчет схемы обжатий выше был уже рассмотрен. Расчет минимального периода нужно рассматривать как расчет минимальной суммы пауз и машинных времен, что символически можно записать в следующем виде [1; 2]:

$$T_{мин} = [\Sigma t_{x}]_{мин} + [\Sigma t_{м}]_{рац},$$

где $T_{мин}$ — минимальный период прокатки;

$[\Sigma t_x]_{\min}$ — сумма минимально необходимых пауз между пропусками, включая начальную паузу — T_0 ;
 $[\Sigma t_m]_{\text{рац}}$ — сумма рациональных машинных времен по пропускам.

Под рациональным машинным временем понимается не минимально возможное машинное время, а такое, которое, являясь функцией минимальных пауз, дает в сумме с ними минимальный период. Лишь при перегреве двигателя можно допустить сокращение машинного времени за счет увеличения пауз.

Таким образом машинное время должно определяться не самостоятельно как $[\Sigma t_m]_{\min}$ и не в первую очередь, а как функция пауз и после них. Стремление свести расчет лишь к расчету $[\Sigma t_m]_{\min}$ является принципиально ошибочным. Ниже будет доказано, что в ряде случаев сокращение машинного времени увеличивает продолжительность прокатки и именно потому, что расчет машинного времени не базируется на соответствующих паузах.

Таким образом, практический расчет должен начинаться с пауз. Выведем выражения для машинного времени, подтверждающие это.

Схемы скоростей прокатки в одноклетневых станах

В практике работы реверсивных станов существует несколько типовых схем изменения скоростей в процессе одного цикла вращения валков — τ (от начала вращения валков до их остановки). Наиболее общей является схема, состоящая из 5 (при постоянном ускорении a и постоянном замедлении b) участков (рис. 13, а):

- t_p — период раскручивания валков без слитка;
- t_y — период ускорения со слитком;
- t_n — период постоянной скорости;
- t_z — период замедления со слитком;
- t_o — период остановки без слитка.

При переменном ускорении каждому изменению ускорения будет соответствовать добавочный период ускорения или замедления (рис. 13, б).

При дальнейшем рассмотрении режимов скоростей реверсивных станов условимся характеризовать угловые скорости прокатных валков в определенные периоды цикла их вращения число оборотов в минуту, а длину соответствующих участков прокатываемой полосы (или пути фиксированной точки на поверхности валков) — полным числом оборотов валков за тот же период. Используя этот прием, будем иметь следующие обозначения, например для периода ускорения:

- а) скорость вращения валков в момент захвата полосы — n_y об/мин (соответствует $\omega_y \cong 0,105 n_y \text{ сек}^{-1}$),
- б) длина полосы, прокатанной за период ускорения — N_y метров валка (соответствует $L_y = \pi D_p N_y$ метров).

Если в общих схемах известны скорости входа — n_y , выхода — n_z и постоянная скорость — n_n , то расчет машинного времени

не представляет затруднений. Так, например, для схемы, показанной на рис. 13 б, машинное время

$$t_m = t_{y1} + t_{y2} + t_n + t_{z2} + t_{z1}.$$

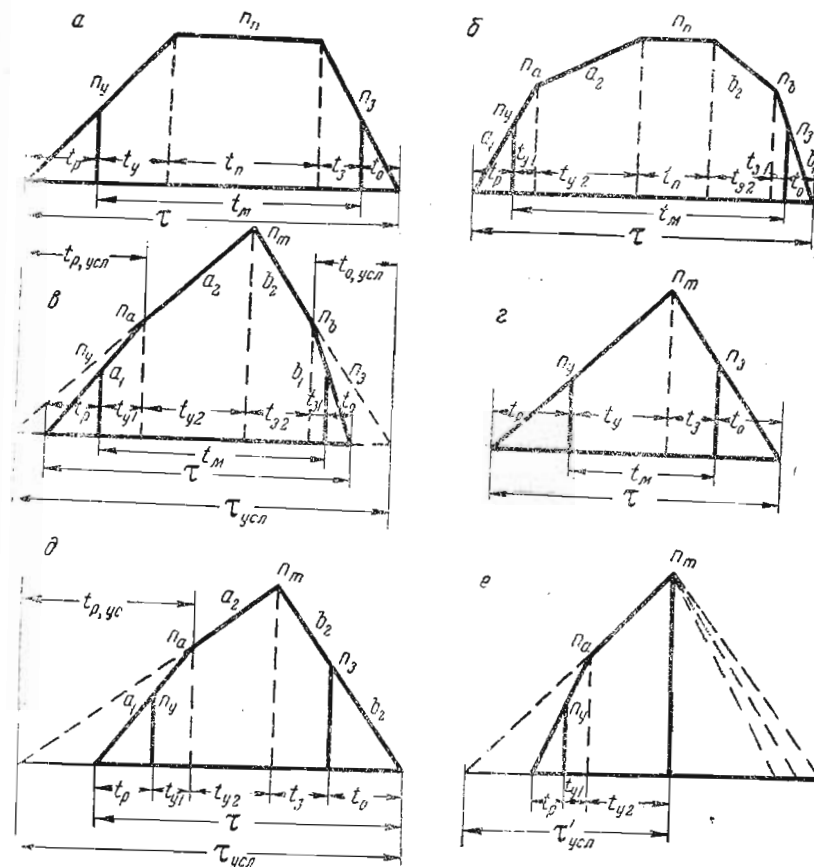


Рис. 13. Схемы скоростей в реверсивных станах:
а — трапециoidalная (тип III) при постоянных ускорениях: а — об/мин. сек. и б — об/мин. сек.; б — трапециoidalная при двух ступенях ускорений (a_1 и a_2) и замедлений (b_1 и b_2); в — треугольная (тип I) при двух ступенях а и б; г — треугольная при постоянных а и б; д — треугольная при двух ступенях а и одной ступени б; е — треугольная (тип I) односторонняя.

Выразим период прокатки с постоянной скоростью — t_n через длину полосы

$$t_n = \frac{N_n}{n_n} \cdot 60 = \frac{N_1 - N_{y1} - N_{y2} - N_{z2} - N_{z1}}{n_n} \cdot 60, \quad (22)$$

где N_1 ; N_{y1} ; N_y и т. д. соответственно полная длина полосы и длины, полученные в отдельные периоды, выраженные в оборотах валков ($N_1 = L_1 : \pi D_p$ и т. д.).

Длина, прокатанная в каждом периоде, может быть выражена через скорости

$$N_{y1} = n_c \cdot t_{y1} = \frac{n_y + n_a}{2 \cdot 60} \cdot \frac{n_a - n_y}{a_1} = \frac{n_a^2 - n_y^2}{120a_1} \text{ и т. д.}, \quad (23)$$

тогда выражение для длины полосы, прокатанной в период t_n ,

$$N_n = N_1 - \frac{n_a^2 - n_y^2}{120a_1} - \frac{n_n^2 - n_a^2}{120a_2} - \frac{n_n^2 - n_b^2}{120b_2} - \frac{n_b^2 - n_3^2}{120b_1}. \quad (24)$$

Делая подстановку в формулу (22), получим

$$t_n = \frac{N_1 - \frac{n_a^2 - n_y^2}{120a_1} - \frac{n_n^2 - n_a^2}{120a_2} - \frac{n_n^2 - n_b^2}{120b_2} - \frac{n_b^2 - n_3^2}{120b_1}}{n_n} \cdot 60. \quad (25)$$

Окончательно выражение машинного времени примет вид

$$t_m = \frac{n_a - n_y}{a_1} + \frac{n_n - n_a}{a_2} + \frac{n_n - n_b}{b_2} + \frac{n_b - n_3}{b_1} + \\ + \frac{N_1 - \frac{n_a^2 - n_y^2}{120a_1} - \frac{n_n^2 - n_a^2}{120a_2} - \frac{n_n^2 - n_b^2}{120b_2} - \frac{n_b^2 - n_3^2}{120b_1}}{n_n} \cdot 60. \quad (26)$$

Так как значения n_y и n_3 для каждого пропуска определяются из конкретных условий прокатки (см. ниже), а n_a и n_b (рис. 13) зависят от схемы управления главным приводом, то, принимая их за постоянные, найдем при каком значении n_n будет иметь $(t_m)_{\min}$.

Для этого возьмем первую производную от выражения (26) по n_n ,

$$[t_m]_{n_n} = \frac{1}{a_2} + \frac{1}{b_2} + 60 \left(-\frac{N_1}{n_n^2} + \frac{n_a^2 - n_y^2}{120a_1 n_n^2} - \frac{1}{120a_2} - \frac{n_a^2}{120a_2 n_n^2} - \right. \\ \left. - \frac{1}{120b_2} - \frac{n_b^2}{120b_2 n_n^2} + \frac{n_b^2 - n_3^2}{120b_1 \cdot n_n^2} \right).$$

Обозначая среднее ускорение через $K = \frac{2ab}{a+b}$ и принимая во внимание формулу (23), получим:

$$[t_m]_{n_n} = \frac{1}{K_2} - \frac{60}{n_n^3} (N_1 - N_{y1} - N_{31} + N_a + N_b).$$

Приравняв первую производную нулю, получим:

$$n_n = \sqrt{60 K_2 (N_1 - N_{y1} - N_{31} + N_a + N_b)}. \quad (27)$$

Возьмем вторую производную от t_m по n_n

$$[t_m]_{n_n}'' = \frac{120}{n_n^3} (N_1 - N_{y1} - N_{31} + N_a + N_b).$$

Так как $N_a > N_{y1}$, а $N_b > N_{31}$, то

$$[t_m]_{n_n}'' > 0,$$

следовательно, при значении n_n по формуле (27), действительно получим $(t_m)_{\min}$.

Подставляя в формулу (27) значения N_{y1} , N_{31} и т. д., получим:

$$n_n = \sqrt{60 K_2 \left(N_1 - \frac{n_a^2 - n_y^2}{120a_1} - \frac{n_b^2 - n_3^2}{120b_1} + \frac{n_a^2}{120a_2} + \frac{n_b^2}{120b_2} \right)}. \quad (28)$$

Найдем значение N_n и t_n при $(t_m)_{\min}$.

Перепишем уравнение (24) следующим образом:

$$N_n = \left(N_1 - \frac{n_a^2 - n_y^2}{120a_1} - \frac{n_b^2 - n_3^2}{120b_1} + \frac{n_a^2}{120a_2} + \frac{n_b^2}{120b_2} \right) - \\ - \frac{n_n^2}{120a_2} - \frac{n_n^2}{120b_2}.$$

Тогда на основании формулы (28)

$$N_n = \frac{n_n^2}{60 K_2} - \frac{n_n^2}{120a_2} - \frac{n_n^2}{120b_2} = \frac{n_n^2}{60 K_2} - \frac{n_n^2}{60 K_2} = 0,$$

т. е. длина полосы, прокатанная в периоде постоянной скорости, равна нулю, следовательно, и период постоянной скорости

$$t_n = 0.$$

В этом случае диаграмма скоростей примет вид по рис. 13,б, а при постоянных a и b по рис. 13,г.

Обозначим максимальную скорость при $(t_m)_{\min}$ через n_m , тогда выражение для машинного времени будет

$$t_m = t_{y1} + t_{y2} + t_{32} + t_{31} = \frac{n_a - n_y}{a_1} + \frac{n_m - n_a}{a_2} + \frac{n_m - n_b}{b_2} + \\ + \frac{n_b - n_3}{b_1} \quad (29)$$

и при постоянных a и b

$$t_m = t_y + t_3 = \frac{n_m - n_y}{a} + \frac{n_m - n_3}{b}. \quad (29')$$

Рассмотрим физический смысл равенств (27) и (28).

Выражение

$$N_1 - N_{y1} - N_{31} = N_{y2} + N_{32} = N_2$$

представляет собой длину полосы (в периметрах валков), прокатанную в верхнем (втором) периоде ускорения (интервал скоростей n_n : n_m : n_b об/мин). Численно эта длина равна полному числу оборотов валков (N_2) за указанный период.

Выражение

$$N_a + N_b = \frac{n_a^2}{120a_2} + \frac{n^2}{120b_2} = N_{p2} + N_{02} \quad (30)$$

представляет собой полное число оборотов валков, необходимое для раскручивания валков до числа оборотов в момент перехода к верхнему (второму) периоду ускорения (N_{p_2}) и для соответствующих остановок при отрицательном ускорении этого периода (N_{0_2}).

При нескольких интервалах ускорений выражение (30) будет соответствовать условному циклу вращения валков (рис. 13, в), при постоянных значениях a и b фактическому (рис. 13, г), когда

$$N_{p_2} + N_{0_2} = N_p + N_0 = \frac{n_y^2}{120a} + \frac{n_z^2}{120b}. \quad (30)$$

Используя формулу (30), формулы (28) и (27) можно записать в более простом виде

$$n_m = \sqrt{60K_2(N_2 + N_{p_2} + N_{0_2})} = \sqrt{60K_2N_{усл}}, \quad (31)$$

где $N_{усл}$ — полное условное число оборотов валков за цикл вращения;

K_2 — среднее ускорение в верхнем (втором) периоде ускорения (интервал $n_a \div n_m \div n_b$ об/мин.)

Полное условное число оборотов равно

$$N_{усл} = \frac{n_m}{2 \cdot 60} \cdot \frac{2n_m}{K_2} = \frac{n_m^2}{60K_2}, \quad (31)$$

где $\frac{n_m}{2 \cdot 60}$ — средняя скорость за цикл вращения;

$\frac{2n_m}{K_2} = \tau_{усл}$ — цикл вращения валков при верхнем значении ускорений (рис. 13, в).

Итак, из уравнения (31) очевидно, что квадрат максимальной скорости при $(t_m)_{мин}$ пропорционален среднему ускорению за верхний (второй) период ускорения, которое называется условным $K_{усл}$, и полному условному числу оборотов за цикл $N_{усл}$

$$n_m = \sqrt{60K_{усл} \cdot N_{усл}} = \sqrt{60K_{усл}(N_2 + N_{p_{усл}} + N_{0_{усл}})}. \quad (32)$$

Формула (32) справедлива для любого числа периодов с различными ускорениями, так как для общего случая имеем

$$N_2 = N_1 - (N_{y1} + N_{y2} + \dots + N_{y_{n-1}} + N_{z1} + N_{z2} + \dots + N_{z_{n-1}}), \quad (33)$$

причем $N_{p_{усл}}$; $N_{0_{усл}}$; $K_{усл}$ — вычисляются по формуле (30) по верхнему периоду ускорений.

По общим формулам (32) (33) и (30) легко найти выражение для n_m в любом частном случае.

Так, например, для случая с двумя интервалами ускорений (рис. 13, в) мы имели формулу (28). При трех ступенях ускорений формула получит вид

$$n_m = \sqrt{60K_3 \left(N_1 - \frac{n_{y2}^2 - n_{y1}^2}{120a_1} - \frac{n_{a2}^2 - n_{y2}^2}{120a_2} - \frac{n_b^2 - n_{z2}^2}{120b_2} - \dots - \frac{n_{z2}^2 - n_{z1}^2}{120b_1} + \frac{n_a^2}{120a_3} + \frac{n_b^2}{120b_3} \right)}. \quad (34)$$

Формула справедлива и для случая, когда изменение ускорения происходит при иных оборотах, чем изменение замедления и когда число изменений ускорений не равно числу изменений замедлений.

Так, для двух ускорений (a_1 и a_2) и одного замедления (b) по рис. 13, д

$$n_m = \sqrt{60K_{усл}(N_1 - N_{y1} + N_{p_{усл}} + N_0)}$$

или после подстановки значений N

$$n_m = \sqrt{60K_{усл} \left(N_1 - \frac{n_a^2 - n_y^2}{120a_1} + \frac{n_a^2}{120a_2} + \frac{n_z^2}{120b} \right)}. \quad (35)$$

Если $n_y > n_a$ и $n_z > n_b$, т. е. захват и выдача полосы происходит в верхнем периоде ускорений, то общая формула (32) получит вид

$$n_m = \sqrt{60K_{усл} \left(N_1 + \frac{n_y^2}{120a_{усл}} + \frac{n_z^2}{120b_{усл}} \right)}. \quad (36)$$

При прокатке слитка только в периоде ускорения, когда скорость выхода $n_z = n_m$, правая часть диаграммы скоростей (b) не влияет на n_m и условный цикл вращения $\tau'_{усл}$ закончится при n_m (рис. 13, е), тогда

$$N'_{усл} = \frac{n_m}{2 \cdot 60} \cdot \tau'_{усл} = \frac{n_m}{2 \cdot 60} \cdot \frac{n_m}{a_{усл}} = \frac{n_m^2}{120a_{усл}},$$

откуда

$$n_m = \sqrt{120a_{усл} \cdot N'_{усл}}, \quad (37)$$

где

$$N'_{усл} = N_1 - N_{y1} + N_{p_{усл}}.$$

Подставляя последнее в формулу (37), получим

$$n_m = \sqrt{120a_{усл} \left(N_1 - \frac{n_a^2 - n_y^2}{120a_1} + \frac{n_a^2}{120a_{усл}} \right)}. \quad (38)$$

Если $n_y > n_a$, то

$$n_m = \sqrt{120a_{усл} \left(N_1 + \frac{n_y^2}{120a_{усл}} \right)}. \quad (39)$$

При отсутствии какого-либо периода полного цикла вращения валков соответствующее N_i в общих уравнениях (32) (33) приравнивается нулю. Так, например, для схемы 13,2 при постоянных v и b уравнение для n_m получится [1] [2]

$$n_m = \sqrt{60K \left(N_1 + \frac{n_y^2}{120a} + \frac{n_3^2}{120b} \right)}. \quad (40)$$

Если положим $n_y = 0$, то $t_p = 0$, $N_p = 0$

$$n_m = \sqrt{60K \left(N_1 + \frac{n_3^2}{120b} \right)}, \quad (40')$$

если к тому же принять и $n_3 = 0$, то

$$n_m = \sqrt{60KN_1}. \quad (40'')$$

Схемы прокатки в реверсивных станах, имеющих непрерывно связанные клетки

К реверсивным с непрерывно связанными клетями станам относятся: слябинги, универсальные широкополосные станы, станы для холодной прокатки и т. д.

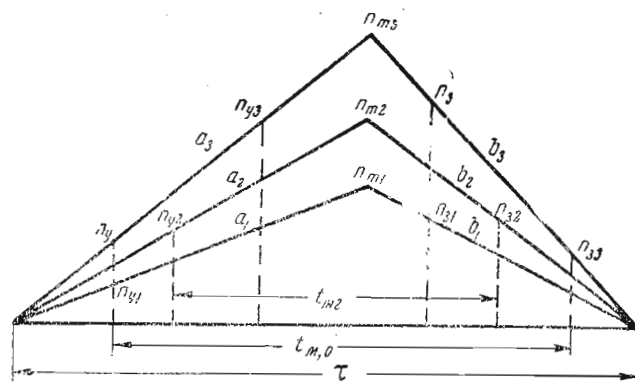


Рис. 14. Схема изменения скоростей трехклетьевого непрерывного реверсивного стана.

На рис. 14 показана схема изменения скоростей в трехклетье-вом непрерывном реверсивном стане. Здесь

n_{y1} , n_{y2} и n_{y3} — скорости при входе соответственно в I, II и III клетки.

n_{m1} , n_{m2} , n_{m3} — соответственно максимальные скорости;

n_{31} , n_{32} , n_{33} — скорости при выходе полосы из I, II и III клетки;

n_y — скорость в III клетке, соответствующая моменту входа полосы в I клетку;

n_3 — скорость в III клетке, соответствующая выходу полосы из I клетки.

Пренебрегая опережением, получим следующую связь между скоростями I и III клетки при одинаковых диаметрах валков во всех клетях

$$\frac{n_y}{n_{y1}} = \frac{n_{m3}}{n_{m1}} = \frac{n_3}{n_{31}} = \frac{L_3}{L_1} = \lambda_2 \cdot \lambda_3,$$

где λ_2 и λ_3 — вытяжки во II и III клетях.

Для удобства расчет скоростей прокатки приведем к одной III клетке. Переход к скоростям прокатки на других клетях можно всегда сделать, используя коэффициенты вытяжки. Наивыгоднейшую максимальную скорость в III клетке можно определить из формулы (32):

$$n_m = \sqrt{60K_3 \left(N_{III} + \frac{n_y^2}{120a_3} + \frac{n_{33}^2}{120b_3} \right)}, \quad (41)$$

где a_3 , b_3 , K_3 — постоянные: ускорение, замедление и среднее ускорение в III клетке;

N_{III} — длина прокатываемой в III клетке полосы с учетом расстояния между клетями

$$N_{III} = \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot N_1 + N' + N'', \quad (42)$$

N' и N'' — соответственно расстояния между клетями в оборотах.

Общее машинное время

$$t_{m,0} = \frac{n_{m3} - n_y}{a_3} + \frac{n_{m3} - n_{33}}{b_3}. \quad (43)$$

Машинное время по клетям:

$$\left. \begin{aligned} t_{m1} &= \frac{n_{m3} - n_y}{a_3} + \frac{n_{m3} - n_3}{b_3} = \frac{n_{m1} - n_{y1}}{a_1} + \frac{n_{m1} - n_{31}}{b_1} \\ t_{m2} &= \frac{n_{m3} - \lambda_3 n_{y2}}{a_3} + \frac{n_{m3} - \lambda_3 n_{32}}{b_3} = \frac{n_{m2} - n_{y2}}{a_2} + \frac{n_{m2} - n_{32}}{b_2} \\ t_{m3} &= \frac{n_{m3} - n_{y3}}{a_3} + \frac{n_{m3} - n_{33}}{b_3} \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

При наличии переменных ускорений и в различных частных случаях вычисления n_m и t_m производятся аналогично вышеизложенному для одной клетки с учетом расстояния между клетями и приведенных скоростей. При трапециевидных схемах скоростей ($t_n \neq 0$) расчет n_m отпадает.

Схемы скоростей слябинга

На рис. 15,а приведена схема изменения скоростей при прокатке на слябинге; вертикальные валки расположены с передней стороны стана на расстоянии от горизонтальных, приблизительно, равном начальной длине слитка.

Слева показан нечетный пропуск, справа — четный. Для сохранения равенства секундного объема при одновременном про-

хождении полосы в горизонтальных и вертикальных валках должны быть соблюдены условия:

для нечетного пропуска

$$n_8 = \frac{D_2}{D_8} \cdot \frac{n_2}{\lambda_2}; \quad (45)$$

для четного пропуска

$$n_8 = \frac{D_2}{D_8} \cdot \lambda_8 \cdot n_2. \quad (45')$$

Примем условно, что $D_8' = D_2$ и длина полосы, выходящей из вертикальных валков, равна длине полосы, выходящей из горизонтальных валков в данном пропуске

$$L_8 = L_2.$$

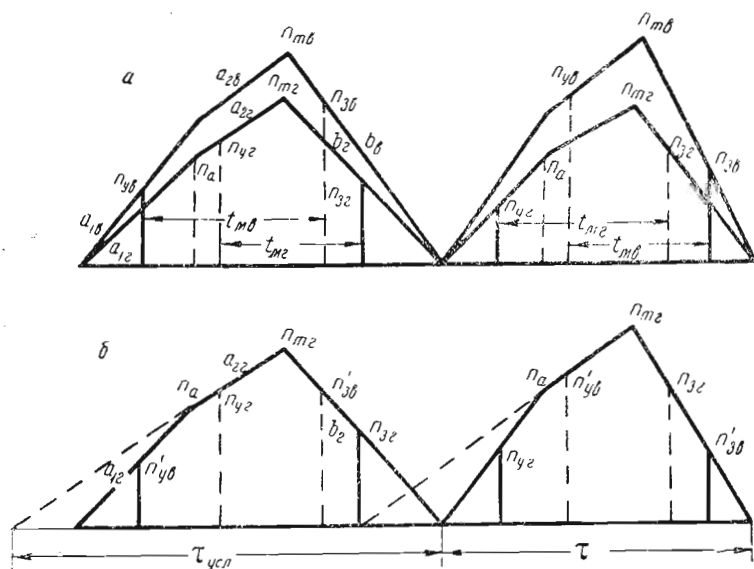


Рис. 15. Схемы скоростей слябинга:
а — натуральные; б — приведенные к горизонтальным валкам.

Тогда время пропуска в тех и других валках будет одинаковым при

$$n_8 = n_2.$$

На рис. 15,б дана схема, где скорости вертикальных валков приведены к скорости горизонтальных валков. Расчетное машинное время будет по приведенной схеме то же, однако все формулы упрощаются. Для определения фактических оборотов вертикальных валков и моментов на вертикальных валках, в конце расчета машинного времени нужно воспользоваться формулами (45) и (45').

Общая формула для расчета n_m будет иметь ту же структуру, что и формула (32) применительно к горизонтальным валкам

$$n_{m2} = \sqrt{60K_{усл}(N_{11} + N_{p\ усл} + N_{o\ усл})}, \quad (46)$$

где N_{11} — длина полосы, прокатываемая во втором периоде ускорения в горизонтальных валках (N_{22}) с учетом расстояния между вертикальными и горизонтальными валками (N'), тогда

$$N_{11} = N_{22} + N'.$$

Для конкретной схемы скоростей слябинга по рис. 15,б для случая $n_a > n'_{y8}$ и $n_a > n_{y2}$ будем иметь:

$$n_{m2} = \sqrt{120 \frac{a_{22}b_2}{a_{22} + b_2} \left(N_1 - \frac{n_a^2 - n_{y8}'^2}{120a_{12}} + \frac{n_a^2}{120a_{22}} + \frac{n_{32}^2}{120b_2} \right)}; \quad (47)$$

для четного пропуска

$$n_{m2} = \sqrt{120 \frac{a_{22}b_2}{a_{22} + b_2} \left(N_1 - \frac{n_a^2 - n_{y2}^2}{120a_{12}} + \frac{n_a^2}{120a_{22}} + \frac{n_{32}'^2}{120b_2} \right)}; \quad (47')$$

где n'_{y8} — число оборотов горизонтальных валков при захвате слитка вертикальными валками;

n'_{32} — число оборотов горизонтальных валков при выходе слитка из вертикальных валков; $N_1 = N_{1,2} + N'$.

Общее машинное время пропуска через вертикальные и горизонтальные валки:

для нечетного пропуска

$$t_{mo} = \frac{n_a - n'_{y8}}{a_{12}} + \frac{n_{m2} - n_a}{a_{22}} + \frac{n_{m2} - n_{32}}{b_2}; \quad (48)$$

для четного пропуска

$$t_{mo} = \frac{n_a - n_{y2}}{a_{12}} + \frac{n_{m2} - n_a}{a_{22}} + \frac{n_{m2} - n_{32}'}{b_2}. \quad (48')$$

Формулы для расчета n_{m2} в случае

$$n_a < n'_{y8} \quad n_a < n_{y2}$$

для нечетного пропуска

$$n_{m2} = \sqrt{120 \frac{a_{22}b_2}{a_{22} + b_2} \left(N_1 + \frac{n_{y8}'^2}{120a_{22}} + \frac{n_{32}^2}{120b_2} \right)}; \quad (49)$$

для четного пропуска

$$n_{m2} = \sqrt{120 \frac{a_{22} \cdot b_2}{a_{22} + b_2} \left(N_1 + \frac{n_{y2}^2}{120a_{22}} + \frac{n_{32}'^2}{120b_2} \right)}. \quad (49')$$

Общее машинное время пропуска через вертикальные и горизонтальные валки:
для нечетного пропуска

$$t_{м.о} = \frac{n_{мз} - n'_{ys}}{a_{2z}} + \frac{n_{мз} - n_{3z}}{b_z} \quad (50)$$

для четного пропуска

$$t_{м.о} = \frac{n_{мз} - n_{ys}}{a_{2z}} + \frac{n_{мз} - n_{3z}}{b_z} \quad (50')$$

Аналогично пишутся выражения для n_m и $t_{м.о}$ и в других частных случаях, которые за недостатком места здесь не приводятся.

Расчет скорости выхода слитка из вертикальных валков при выходе слитка из вертикальных валков и наоборот (если это происходит в периоде ускорения), производится по формулам (37—39), где вместо длины полосы N_1 должно быть подставлено расстояние между вертикальными и горизонтальными валками — N' .

Так, например, для схемы, приведенной на рис. 15, для нечетного пропуска при $n_a > n'_{ys}$:

$$n_{yz} = \sqrt{120a_{2z} \left(N' - \frac{n_a^2 - n_{ys}^2}{120a_{1z}} + \frac{n_a^2}{120a_{2z}} \right)}; \quad (51)$$

при $n_a < n'_{ys}$:

$$n_{yz} = \sqrt{120a_{2z} \left(N' + \frac{n_{ys}^2}{120a_{2z}} \right)}. \quad (51')$$

Аналогично составляется равенство и для четного пропуска. Расчет скорости выхода слитка из вертикальных валков в нечетных пропусках и из горизонтальных валков в четных пропусках производится также по формулам (37—39) с соответствующей заменой индексов.

Для схемы, приведенной на рис. 15, при $b = \text{const}$:
для нечетного пропуска

$$n'_{3z} = \sqrt{120b_z \left(N' + \frac{n_{3z}^2}{120b_z} \right)}; \quad (52)$$

для четного пропуска

$$n_{3z} = \sqrt{120b_z \left(N' + \frac{n_{3z}^2}{120b_z} \right)}. \quad (52')$$

В случае двух замедлений b_{1z} и b_{2z} для нечетного пропуска:
при $n_b > n_{3z}$

$$n_{3z} = \sqrt{120b_{2z} \left(N' - \frac{n_b^2 - n_{3z}^2}{120b_{1z}} + \frac{n_b^2}{120b_{2z}} \right)}; \quad (53)$$

при $n_b < n_{3z}$

$$n'_{3z} = \sqrt{120b_{2z} \left(N' + \frac{n_{3z}^2}{120b_{2z}} \right)}. \quad (53')$$

Расчет машинного времени для горизонтальных и вертикальных валков в отдельности затруднений не представляет.

Если в нечетных пропусках слиток выходит из вертикальных валков (или в четных пропусках из горизонтальных валков) раньше достижения n_m , то для расчета n'_{3z} (или n_{3z}) также нужно воспользоваться формулами (37—39).

Так, например, если на рис. 15, б в нечетном пропуске n'_{3z} будет лежать левее n_m , то при $n_a > n_{ys}$

$$n_{3z} = \sqrt{120a_{2z} \left(N_1 - \frac{n_a^2 - n_{ys}^2}{120a_{1z}} + \frac{n_a^2}{120a_{2z}} \right)}, \quad (54)$$

где N_1 — длина полосы, выходящей из горизонтальных валков.

Аналогично составляется расчетная формула и в других случаях.

Когда наивыгоднейшая максимальная скорость n_m ограничивается мощностью двигателя (например, в случае перегрузки двигателя при $n_m > n_n$), то появляется период t_n (рис. 13, а и б), который вычисляется по формулам (22—25). Для расчета общего машинного времени пропуска через вертикальные и горизонтальные валки при наличии t_n нужно вместо N_1 подставить $N_1 = N_1 + N'$.

В остальном расчеты те же.

Взаимосвязь пауз и машинного времени

Паузы между пропусками и машинное время при рациональном режиме прокатки тесно связаны друг с другом. Изменение паузы, как правило, вызывает изменение машинного времени, и наоборот.

Исследуем эту связь для различных случаев прокатки. Для простоты ускорение (а) и замедление (б) валков будем считать постоянными. При изменении ускорения будет соответственно изменяться число периодов цикла вращения валка, что усложняет рассмотрение вопроса, но не изменяет качественного результата, если n_a и n_b (рис. 13) не зависят от n_y и n_z .

Возьмем наиболее общую схему изменения скоростей (рис. 16). Паузу обозначим t_x . Допустим, что в данном случае пауза ничем не лимитируется и, следовательно, зависит только от скорости выхода слитка из предыдущего пропуска и скорости задачи в последующий пропуск

$$t_x = \frac{n_z}{b} + \frac{n'_y}{a}. \quad (55)$$

Примем

$$n_z = n'_y = n_x,$$

Как увидим в дальнейшем (64), это соотношение является наиболее выгодным, тогда

$$t_x = \frac{n_x}{b} + \frac{n_x}{a} = \frac{2n_x}{K}. \quad (56)$$

Если будем увеличивать n_x , пауза будет расти, но одновременно будет расти средняя скорость прокатки и, следовательно, будет уменьшаться машинное время в обоих пропусках.

Если n_x будем уменьшать, то пауза будет уменьшаться, а машинное время увеличиваться.

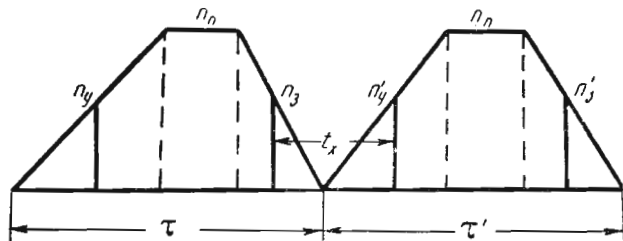


Рис. 16. Схема к выводу $\tau_{\min}$.

Так как производительность зависит от суммы машинного времени и пауз, т. е. от полных циклов вращения валков, то найдем, при каком значении паузы или, что то же — n_x будет $(\tau + \tau')_{\min}$.

Напишем выражение для двух циклов вращения [1] [2]

$$\tau + \tau' = t_p + t_y + t_n + t_z + t_0 + t'_p + t'_y + t'_n + t'_z + t'_0. \quad (57)$$

Выражение для периода прокатки с постоянной скоростью, как известно, имеет вид

$$t_n = \frac{120N_1 - \frac{n_n^2 - n_y^2}{a} - \frac{n_n^2 - n_z^2}{b}}{2n_n}.$$

При принятом значении $n_z = n'_y = n_x$

$$t_n = \frac{60KN_1 - (n_n^2 - n_x^2)}{Kn_n}. \quad (58)$$

Подставляя в формулу (57) выражения времени через соответствующие скорости и ускорения, получим

$$\begin{aligned} \tau + \tau' = & \frac{n_y}{a} + \frac{n_n - n_y}{a} + \frac{120N_1}{2n_n} - \frac{n_n^2 - n_x^2}{Kn_n} + \frac{n_n - n_x}{b} + \frac{n_x}{b} + \\ & + \frac{n_x}{a} + \frac{n'_n - n_x}{a} + \frac{120N'_1}{2n'_n} - \frac{n_n'^2 - n_x^2}{Kn'_n} + \frac{n'_n - n_x}{b} + \frac{n'_x}{b}. \end{aligned}$$

Найдем $(\tau + \tau')_{\min}$, учитывая, что переменной величиной является только n_x

$$[\tau + \tau']'_{n_x} = \left[\frac{n_x^2}{Kn_n} + \frac{n_x^2}{Kn'_n} \right]'_{n_x} = 0; \quad \frac{2n_x}{Kn_n} + \frac{2n_x}{Kn'_n} = 0; \quad n_x = 0.$$

Так как вторая производная от $[\tau + \tau']$ по n_x положительна, то, следовательно, при $n_x = 0$ или, что то же, при $t_x = 0$, будем иметь действительно $(\tau + \tau')_{\min}$.

Так как при $n_x = 0$ будет наименьшая средняя скорость, то машинное время получится максимальным.

Итак, чем меньше пауза, тем меньше продолжительность прокатки, несмотря на увеличение машинного времени.

Однако, как правило, минимально необходимая пауза определяется не временем реверсирования, а другими конкретными условиями (время работы нажимного устройства, кантовка и т. д.).

В этом случае пауза должна быть использована для снижения машинного времени, исходя из равенства (56)

$$n_x = n_z = n'_y = K \cdot \frac{t_x}{2}. \quad (59)$$

Если взять $n_x > K \cdot \frac{t_x}{2}$, то пауза увеличится и, следовательно, продолжительность прокатки увеличится.

Если взять $n_x < K \cdot \frac{t_x}{2}$, то пауза не уменьшится, а машинное время будет больше, и продолжительность прокатки увеличится.

Следовательно, наиболее выгодные скорости выдачи и захвата сляка определяются равенством (59).

Если условия захвата не позволяют принять $n_z = n'_y$, то n'_y устанавливается по условиям захвата, а n_z определяется из формулы (55)

$$n_z = b \left(t_x - \frac{n_y}{a} \right). \quad (60)$$

В этом случае продолжительность прокатки будет больше.

Докажем, что при $n_z = n'_y = n_x$ продолжительность прокатки будет минимальной (рис. 17).

Напишем выражения для продолжительности каждого цикла, считая, что изменяются только обороты n_z и n'_y в соответствии с равенством (60), а остальные обороты заданы и неизменны (при данной ступени регулировки главного привода $n_n = n'_n$):

$$\begin{aligned} \tau + \tau' = & \frac{n_y}{a_1} + \frac{n_a - n_y}{a_1} + \frac{n_n - n_a}{a_2} + \frac{N_1 - N_{y1} - N_{y2} - N_{z2} - \frac{n_b^2 - n_z^2}{120b_1}}{n_n} \cdot 60 + \\ & + \frac{n_n - n_b}{b_2} + \frac{n_b - n_z}{b_1} + \frac{n_z}{b_1}; \end{aligned} \quad (61)$$

$$\tau' = \frac{n_y}{a_1} + \frac{n_a - n_y}{a_1} + \frac{n_n - n_a}{a_2} + \frac{N_1 - \frac{n_a^2 - n_y^2}{120a_1} - N_{y2} - N_{s2} - N_{s1}}{120a_1} \cdot 60 +$$

$$+ \frac{n_n - n_b}{b_2} + \frac{n_b - n_s}{b_1} + \frac{n_s}{b_1}. \quad (62)$$

Из рассмотрения равенств (61) и (62) видно, что при $n_n = n'_n$ после сокращений и отбрасывания членов, не содержащих n_s и n'_y , минимальная сумма $(\tau + \tau')_{\min}$ будет при условии

$$\left[\frac{n_s^2}{b_1} + \frac{n_y'^2}{a_1} \right]_{\min} = 0. \quad (63)$$

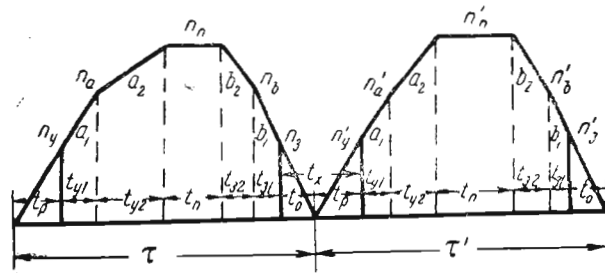


Рис. 17. Схема к выводу $n_s = n'_y$.

Подставляя в формулу (63) значение n_s из формулы (60), находим первую производную из формулы (63) по n_y и приравниваем ее нулю

$$\left[b_1 \left(t_x - \frac{n_y}{a_1} \right)^2 + \frac{n_y'^2}{a_1} \right]'_{n_y} = 0,$$

откуда

$$n_y' = \frac{b_1}{1 + \frac{b_1}{a_1}} \cdot t_x \quad \text{или} \quad n_y' = K_1 \cdot \frac{t_x}{2}.$$

Так как вторая производная из формулы (63) положительна, то $n_y' = K_1 \cdot \frac{t_x}{2}$ является условием минимума $(\tau + \tau')$. С другой стороны, из формулы (60) получим также

$$n_s = K_1 \cdot \frac{t_x}{2}.$$

Следовательно, наименьшая продолжительность прокатки будет при условии равенства числа оборотов выхода слитка и предыдущего пропуска числу оборотов входа в последующий пропуск

$$n_s = n_y = K_1 \cdot \frac{t_x}{2}. \quad (64)$$

Тот же вывод получится, когда период прокатки с постоянной скоростью отсутствует ($t_n = 0$) при любых значениях n_{m1} и n_{m2} (рис. 18).

Отступлением от условия (64) являются лишь редкие случаи, когда при прокатке с периодом постоянной скорости переходят с

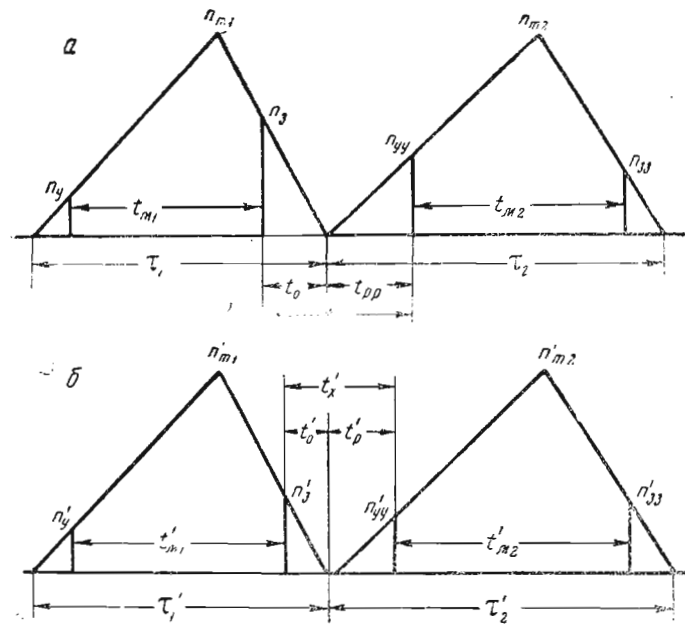


Рис. 18. Схема к анализу паузы реверсирования.

одной ступени регулирования главного привода на другую, т. е. когда $n_n \neq n'_n$.

Тогда на основании формул (61) и (62) условие $(\tau + \tau')_{\min}$ примет вид

$$\left[\frac{b}{n_n} \left(t_x - \frac{n_y}{a} \right)^2 + \frac{n_y'^2}{an_n} \right]' = 0. \quad (63')$$

После несложных преобразований получим

$$\left. \begin{aligned} n_y' &= \frac{b}{\frac{n_n}{n'_n} + \frac{b}{a}} \cdot t_x; \\ n_s &= \left(1 - \frac{\frac{b}{a}}{\frac{n_n}{n'_n} + \frac{b}{a}} \right) \cdot b \cdot t_x; \\ \frac{n_y}{n_s} &= \frac{n'_n}{n_n}. \end{aligned} \right\} \quad (64')$$

Рациональные n_3 и n_y в зависимости от t_x ($a=20$; $b=40$ об/мин. сек.)

t_x , сек.	0	1	1,5	2,0	2,25	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
n_y	0	13	20	26,7	30	30	30	30	30	30	30
n_3	0	13	20	25,7	30	40	60	80	100	120	140

эти обороты, нужно исходить из условия наиболее полного использования минимальной технически возможной паузы (t_x) на реверсирование валков от n_3 предыдущего пропуска до n_y последующего пропуска.

Необходимо стремиться к равенству (рис. 18)

$$t_0 + t_p = t_x,$$

причем всегда должно быть $(t_0 + t_p) = f(t_x)$, а не наоборот. Увеличение t_x с целью увеличения $(t_0 + t_p)$, а следовательно, и с целью увеличения n_3 и n_y всегда приведет к увеличению продолжительности прокатки. Пауза t_x должна определяться лишь скоростью работы механизмов при манипуляции со слитком между пропусками (кантовка, опускание верхнего валка и т. п.), и там, где пауза велика (например, при кантовке) нужно n_3 и n_y выбирать большими, а где пауза мала (например, с задней стороны стана) — n_3 и n_y , необходимо брать соответственно малыми. Пренебрежение промежутком времени, «когда в валках нет слитка, от 0 до n_y » [7, стр. 40], является ошибкой. Как раз этот промежуток времени имеет весьма важное значение и именно с этого промежутка надо начинать расчет.

Поэтому нужно сперва рассчитать паузы, а затем машинное время, как функцию пауз. Увеличение машинного времени при очень малых расчетных паузах (будем иметь малые n_3 и n_y) никогда не будет способствовать увеличению продолжительности прокатки, так как t_m увеличивается за счет t_x . Увеличение же паузы благодаря уменьшению машинного времени (будем иметь большие n_3 и n_y), а следовательно и большие $(t_0 + t_p)$ всегда приведет к увеличению продолжительности прокатки. Это наглядно видно из рис. 18. При

$$n_{m1} = n'_{m1}; \quad n_{m2} = n'_{m2}; \quad n_y = n'_y; \quad n_{33} = n'_{33}$$

и при $t'_x < t_x$ будем иметь

$$\tau_1 + \tau_2 = \tau'_1 + \tau'_2,$$

но длины прокатанных полос в этих случаях будут не равны $L_1 + L_2 < L'_1 + L'_2$, так как время пребывания в валках в случае (а) и

Принимая во внимание, что $n'_n > n_n$, получим $n'_y > n_3$ вместо основного условия (64), когда $n'_y = n_3$.

При интенсивной прокатке (калибровке) обычно почти во всех пропусках принимается $n_n = n_k$. Лишь в «отделочных» пропусках, где обжатия иногда бывают малы, возможно повышение n_n до $2 n_k$ и более. Но и в этом случае выбор наивыгоднейшего отношения n_3 и n_y имеет смысл только при отсутствии кантовки перед отделочным пропуском, когда пауза достаточно мала и n_y и n_3 обуславливаются лишь этой паузой. Практически же переход к следующей ступени n_n совпадает с кантовкой и пользоваться равенством (64) не приходится.

Таким образом условие, вытекающее из равенства (64), можно считать общим.

Если пауза велика и не может быть использована по условию (64), то n_3 и n_y в отдельности должны быть выбраны максимально возможными, например $n_3 = n_m$, а n_y из предельных условий захвата. Это имеет место при кантовке или подаче нового слитка.

Условия захвата иногда вынуждают брать $n'_y < n_3$, однако всегда нужно стремиться к равенству (64).

В табл. 6 дана продолжительность прокатки в зависимости от n_3 и n_y при $a=20$ об/мин. сек.; $b=40$ об/мин. сек.; $N_1=2$ об и $t_x=2$ сек.

Таблица 6

Продолжительность прокатки в зависимости от n_3 и n_y (при $t_x=2$ сек.)

n_3	n_y	2τ
60	10	9,83
40	30	9,50
26,7	26,7	9,40
20	30	9,45
5	37,5	9,55

Из таблицы видно, что при паузе 2 сек. рациональными скоростями являются $n_3 = n'_y = 26,7$ об/мин. Это соответствует обжатию (при $D_p = 950$ мм) около 75 мм (рис. 1). Следовательно, для блюминга при $a=20$ и $b=40$ вполне можно допустить $n_3 = n'_y = 26,7$ об/мин.

($t_x=2,0$ сек.). Это дает возможность в насеченных валках давать обжатия до 125 мм и на гладкой бочке до 75 мм.

В тех случаях, когда $t_x > 2,0$ сек., а $\Delta h < 75$ мм, приходится отступать от равенства (64), выбирая n_y из условий захвата и соответственно увеличивая n_3 по формуле (60).

В табл. 7 даны рациональные числа оборотов n_3 и n_y в зависимости от продолжительности паузы, вычисленные по формулам (60) и (64) при $a=20$ и $b=40$.

При наибольшем обжатии на гладкой бочке $\Delta h = 70$ мм $n_y = 30$ об/мин.

Итак, для достижения значительного эффекта нужно не только правильно рассчитать n_m , но и правильно выбрать n_y и n_3 . Выбирая

(б) разное; следовательно, если в случае (б) прокатывать полосы той же длины, что и в случае (а), то времени для этого потребуется меньше.

Значит промежуток времени, когда в валках нет слитка, не может не интересовать нас; он должен быть минимальным, так как аргументирует величину рационального машинного времени.

Увеличение паузы за счет соответствующего увеличения n_3 и n_y оправдывается лишь при необходимости разгрузить двигатель. В этих случаях оптимальные значения n_y и n_3 выводятся из условия минимального нагрева двигателя и в настоящей книге не рассматриваются.

Отметим лишь, что минимальный нагрев двигателя будет при максимальном допуске условиями захвата $n_{y,a}$ (рис. 1) и оптимальном n_3 :

$$\left. \begin{aligned} n_{y, \text{opt}} &= n_{y,a}, \\ n_{3, \text{opt}} &= n_n \left(1 - 2 \frac{M_b}{M_q} \right). \end{aligned} \right\} \quad (64'')$$

Здесь уже пауза является функцией скорости n_3 и n_y и, хотя период прокатки при этом увеличивается, он все же будет оптимальным при недостаточной мощности двигателя.

Имеется еще один частный случай, когда уменьшение паузы после определенного предела приводит к увеличению цикла пропуска.

Этот случай имеет место, если точки изменения ускорений n_a и n_b (рис. 17) совпадают с точками входа и выхода полосы, т. е. при

$$n_a = n_y \text{ и } n_b = n_3$$

и если $a_2 < a_1$, а $b_2 < b_1$.

Тогда условие минимального цикла пропуска может быть выведено на основании (57), (61)

$$[\tau]'_{n_3} = \frac{1}{b_1} - \frac{1}{b_2} + \frac{n_3}{b_2 n_n} = 0,$$

$$[\tau]'_{n_y} = \frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} + \frac{n_y}{a_2 n_n} = 0,$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} n_3 &= n_n \left(1 - \frac{b_2}{b_1} \right), \\ n_y &= n_n \left(1 - \frac{a_2}{a_1} \right). \end{aligned} \right\} \quad (64''')$$

Прокатка с постоянной скоростью. При прокатке с предельными обжатиями, определяемыми мощностью двигателя, в целях избежания затраты энергии во время пропуска на раскручивание валков целесообразно вести прокатку с постоянной скоростью, что позволит увеличить обжатие в пропуске. Выясним наиболее выгодное соотношение между машинным временем и паузой для этого случая.

Захват, прокатка и выдача происходят при постоянной скорости

$$n_y = n_n = n_3.$$

Найдем наименьшую продолжительность прокатки при данных ускорении a и замедлении b

$$\tau = t_p + t_n + t_o = \frac{n_n}{a} + \frac{N_1}{n_n} \cdot 60 + \frac{n_n}{b} = \frac{2n_n}{K} + \frac{N_1}{n_n} \cdot 60. \quad (65)$$

Выясним наличие минимума этой функции, взяв первую и вторую производные от τ по n_n ,

$$[\tau]'_{n_n} = \frac{2}{K} - \frac{60N_1}{n_n^2} \text{ и } [\tau]''_{n_n} = \frac{120N_1}{n_n^3}.$$

Так как вторая производная положительна, то уравнение

$$\frac{2}{K} - \frac{60N_1}{n_n^2} = 0$$

есть условие для нахождения $\tau_{\text{мин}}$, при котором

$$n_n = \sqrt{30KN_1}. \quad (66)$$

Найдем соотношение между t_m и t_x из формулы (65)

$$\frac{t_m}{t_x} = \frac{t_n}{t_p + t_o} = \frac{30KN_1}{n_n^2};$$

для $\tau_{\text{мин}}$ подставляем n_n из формулы (66)

$$\frac{t_m}{t_x} = \frac{30KN_1}{(\sqrt{30KN_1})^2} = 1, \quad (67)$$

т. е. $\tau_{\text{мин}}$ имеет место при $t_m = t_x$.

Паузы в реверсивных станах

Правильное определение пауз имеет важнейшее значение для расчета рационального режима прокатки и должно предшествовать расчету машинного времени. Паузами определяются режим скоростей и рациональное машинное время.

Паузы на реверсивных прокатных станах определяются, главным образом, временем работы нажимного устройства (за исключением кантовок и начальных пауз) и, следовательно, обычно являются функцией обжатия.

В табл. 8 приведены примерные данные по скоростям нажимных устройств для некоторых отечественных станов.

Время опускания верхнего вала

Таблица 8

Тип стана	Обжатия, мм														
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
Блюминг 1150	0,5	0,7	0,8	0,95	1,05	1,15	1,25	1,33	1,4	1,5	1,55	1,6	1,7	1,75	1,8
Слябинг 1100	0,8	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,1	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
Стан 900	—	0,9	1,1	1,26	1,41	1,55	1,67	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	—	—	—

Из данных, приведенных в таблице, видно, особенно для слябинга, что повышение скорости нажимного устройства способствует значительному повышению производительности.

У слябинга при задаче с передней стороны паузы получаются меньше, так как обжатия вертикальными валами невелики. Если ширина слитка незначительно превышает ширину сляба, то значительное количество пропусков можно делать без перестановки вертикальных валков. Тогда паузу с передней стороны можно довести до нуля, чем и пользуются некоторые операторы.

Стараясь уменьшить паузу с задней стороны стана, которая вследствие малой скорости нажимного устройства горизонтальных валков велика, операторы слябинга часто задают слиток в валки до их окончательной установки. Такая работа вредна для нажимного устройства.

На рис. 19 показана осциллограмма 5 и 6 пропуска при прокатке слитка в горизонтальных валках слябинга. Из осциллограммы видно, что задача слитка в 6 пропуск произведена раньше, чем сработало нажимное устройство

$$t_{ny} > t_x.$$

Кривая величины тока при прокатке в горизонтальных валках I_2 показывает, что захват слитка в 6 пропуске произошел при $n_y = 0$ (точка 1). Нажимное же устройство закончило работу значительно позднее (точка 2).

В целях нормальной эксплуатации нажимного устройства правильное захват произвести в точке 2 при $n_y > 0$.

Выбирая скорости n_3 и n_y на основании формулы (64) или (60) по времени работы нажимного устройства, тем самым паузу, необходимую на реверсирование валков от n_3 до n_y , приводят к паузе нажимного устройства

$$t_{рев} = t_{ny} = t_x.$$

В противном случае (при $t_{рев} \geq t_{ny}$) продолжительность прокатки увеличивается.

Однако при этом надо иметь в виду, что за время реверсирования и работы нажимного устройства рабочие рольганги должны

успеть возвратить слиток к валкам. Таким образом пауза, связанная с работой рольганга (t_{xp}), в свою очередь должна быть согласована с паузой реверсирования. В противном случае произойдет задержка задачи слитка рольгангом или же преждевременная задача, предотвращение которой потребует от операторов излишних манипуляций.

Следовательно, для ритмичной и производительной работы реверсивного стана должно быть соблюдено тройное условие —

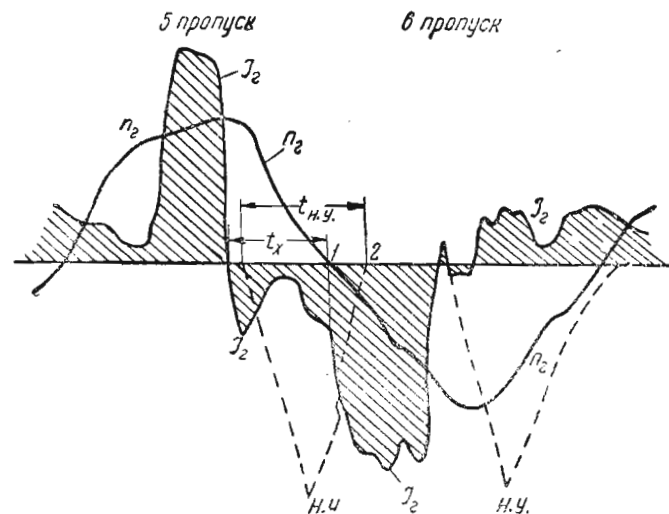


Рис. 19. Осциллограмма привода слябинга (горизонтальных валков).

равенство пауз, связанных с работой нажимного устройства, рольганга и реверсированием прокатных валков

$$t_{рев} = t_{xp} = t_{ny}. \quad (68)$$

Отступление от этого правила нарушает ритм работы, увеличивает число операций операторов, снижает производительность и даже может привести к преждевременному выходу из строя нажимного устройства.

Увязка работы нажимного устройства и реверсирования валков была рассмотрена выше в связи с применением формул (64) и (60).

Найдем при каких условиях можно увязать работу рольгангов с реверсированием валков стана.

При отсутствии необходимости в специальном транспортировании слитка рольгангом (при кантовке, начальной паузе) пауза рольганга определяется в конечном счете скоростью выброса слит-

ка из валков — v_3 . Торможение выброшенного слитка, как известно, происходит с ускорением μg , где μ — коэффициент трения между слитком и роликами и колеблется по данным А. И. Целикова от 0,15—0,30.

Ускорение слитка при подаче рольгангом также не может быть более μg и поэтому должно приниматься равным μg (меньшее ускорение рольганга снижает производительность стана).

Полагая ускорение μg постоянным и равным при движении слитка как в одну, так и в другую сторону, получаем паузу, равную удвоенному времени торможения слитка (если скорость рольганга не меньше скорости выброса слитка, т.е. $v_p \leq v_3$)

$$t_{xp} = \frac{2v_3}{\mu g} \quad (69)$$

или принимая $\mu = 0,204$, найдем, что пауза рольганга (при $v_p \leq v_3$) численно равна скорости выброса

$$t_{xp} = v_3. \quad (69')$$

Для случая $v_p > v_3$ трудно вывести выражение

$$t_{xp} = \frac{(v_3 + v_p)^2}{2\mu g v_p}. \quad (69'')$$

На рис. 20 приведена зависимость t_{xp} от v_3 и v_p при $\mu = 0,204$ ($\mu g = 2$).

Для большинства пауз, определяемых работой нажимного устройства (кроме начальных и кантовок), справедливы равенства (69) и (69').

Тогда для соблюдения тройного условия (68) должно быть на основании (55) и (69)

$$\frac{n_3}{b} + \frac{n'_y}{a} = \frac{2v_3}{\mu g} = t_{ny}. \quad (70)$$

Подставляя $v_3 = \frac{\pi D_p}{60} n_3$ и обозначая ускорение рольганга, приведенное к D_p , через

$$C = \frac{30\mu g}{\pi D_p} \approx \frac{19,1}{D_p},$$

получим значения для n_3 и n'_y , удовлетворяющие тройному условию (68) и (70):

$$n_3 = \frac{30\mu g}{\pi D_p} t_{ny} = C t_{ny}; \quad (71)$$

$$n'_y = a \left(t_{ny} - \frac{n_3}{b} \right). \quad (72)$$

При наивыгоднейшем соотношении n_3 и n'_y получим из равенства (70), подставляя в него $n'_y = n_3$ из формулы (71):

$$\frac{C t_{ny}}{b} + \frac{C t_{ny}}{a} = t_{ny}$$

или

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{a} = \frac{1}{C} = \frac{2}{K},$$

откуда

$$K = 2C = \frac{60\mu g}{\pi D_p} \approx \frac{38,2}{D_p}. \quad (73)$$

Таким образом для выполнения тройного условия при наивыгоднейшем соотношении скоростей выхода слитка из предыдущего пропуск и входа в последующий, произведение из среднего ускорения рабочих валков на их диаметр должно быть постоянным и равным $\sim 38,2$

$$K D_p = \frac{60\mu g}{\pi} = \sim 38,2. \quad (74)$$

Так как среднее ускорение не меняется в процессе прокатки, то из равенства (74) можно сделать вывод: чем меньше изменяется глубина вреза ручьев рабочих валков, тем ритмичнее идет работа стана.

Для поддержания ритмичной работы при переменных рабочих диаметрах (разные калибры, переточки), а также при переменном коэффициенте трения оператор должен иметь возможность изменять ускорение.

Если рабочий диаметр уменьшается или коэффициент трения возрастает — нужно в соответствии с тройным условием ускорения увеличивать, и наоборот.

При среднем рабочем диаметре валков блюминга 950 мм должно быть $K = 40$ и соотношения ускорений, удовлетворяющие тройному условию при $n_3 = n'_y$, будут:

a	40	36	33	31,5	30	29	28	27	26,5	26,3	26	25,5	25
b	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100

Как видим, соотношение, принимаемое в американской практике $a = 20$ и $b = 40$ ($K = 26,6$) не соответствует наивыгоднейшим условиям работы большого блюминга.

Отношение же, рекомендованное советским ученым проф. А. П. Виноградовым (ДОМЕЗ, 1932,9): $a = 30$ и $b = 60$ — соответствует наивыгоднейшим условиям.

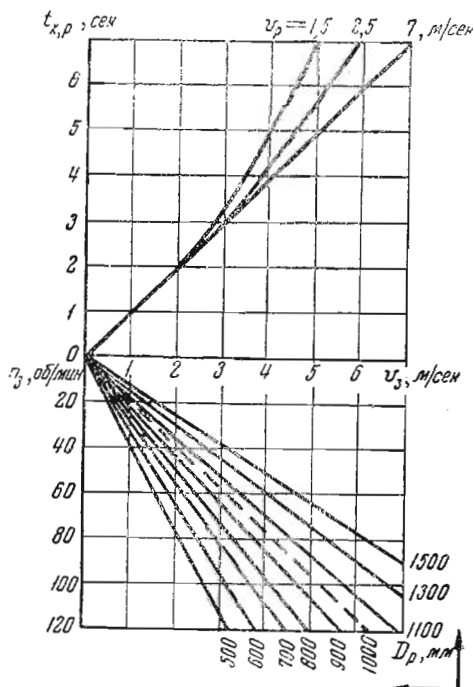


Рис. 20. Паузы рольганга в зависимости от скорости выброса.

Соотношение $a = 20$ и $b = 40$ может быть пригодным только при среднем диаметре валков

$$D = \frac{38,2}{K} = \frac{38,2(a+b)}{2ab} = \frac{38,2(20+40)}{20 \cdot 40} = 1430 \text{ мм.}$$

Для слябинга со средним диаметром 1060 мм при $n_3 = n'_y$ получается $K = 36$. Соотношения ускорений, соответствующие тройному условию, будут:

a	...	36	32,5	29,7	28,3	27	26,1	25,2	24,3	24	23,7	23	22,5
b	...	36	40,5	45	49,5	54	58,5	63	67,5	72	76,5	85,5	90

и для стана 900 со средним диаметром 850 мм ($K = 45$):

a	...	45	41	38	36	34,3	33	32	31,2	30,6	30	29,5	29
b	...	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100

Посмотрим, что получится, если отойти от наивыгоднейшего условия $n_3 = n'_y$.

Обозначим отношение

$$\frac{n'_y}{n_3} = \psi.$$

Тогда на основании равенства (70)

$$\frac{n_3}{b} + \frac{\psi n_3}{a} = \frac{2v_0}{\mu g} = \frac{n_3}{C}.$$

После преобразования получим

$$K = 2C \frac{1 + \psi \frac{b}{a}}{1 + \frac{b}{a}}. \quad (75)$$

На рис. 21 дана связь между величинами $\frac{K}{2C}$, $\frac{b}{a}$ и ψ .

При $\psi = 1$ получим равенство (73).

При $\psi < 1$ будем иметь $K < 2C$, т. е. ускорения должны быть меньшими, чем при $n_3 = n'_y$. Это приводит к снижению производительности стана (так, например, при $\psi = 0,5$ и $b/a = 2$ получается $K = 27$, чему соответствуют $a = 20$ и $b = 40$).

Иногда операторы производят задачу слитка в валки следующим образом. Сперва подводят слиток к неподвижным валкам, а затем начинают разгон валков. В этом случае $n'_y = 0$ и, следовательно, $\psi = 0$.

Тогда, даже при $b = a$, ускорения стана на основании равенства (70) должны быть вдвое ниже наивыгоднейших ($b = c$).

Для блюминга в этом случае получится $b = 20$ об/мин. сек., что значительно меньше фактических. А это значит, что при $b > 20$ рольганги будут отставать от стана, рабочие валки будут простаивать до подачи слитка, вследствие чего производительность стана снижается.

Н. А. Тищенко (трест Электропривод) рекомендует довести ускорения a и b на блюмингах до 100 об/мин. сек.

Применение таких ускорений при $n_3 = n'_y$ удовлетворит тройному условию на основании равенства (74) только при $D_p = 380$ мм. Для реверсивных станов с рабочим диаметром 950 мм тройное условие будет удовлетворено лишь при

$$\psi = \frac{n'_y}{n_3} = 4 \text{ или } n'_y = 4n_3.$$

Учитывая условия захвата и равенство (70), можно сделать вывод, что при больших ускорениях тройное условие будет удовлетворено только при очень малых паузах между пропусками, не пре-

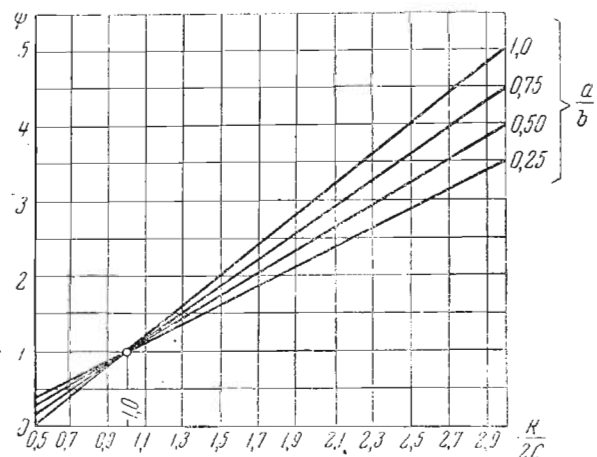


Рис. 21. Оптимальные соотношения между скоростями и ускорениями.

вышающих 0,5 сек. Так как фактически паузы значительно больше, то работа с высокими ускорениями должна будет сопровождаться остановкой валков между пропусками на определенные промежутки времени. Это потребует дополнительных движений от операторов стана, что отразится на ритмичности и производительности работы.

Рассмотрим вопрос о наивыгоднейшем ускорении с динамической точки зрения. Возьмем наиболее тяжелый для стана частный случай. Это случай, когда прокатка происходит по треугольной схеме скоростей, максимальная скорость превышает номинальную, а паузы очень малы (для простоты примем $t_x = t_p + t_o = 0$).

На рис. 22 приведена диаграмма моментов для этого случая. Напишем выражение для среднеквадратичного момента (для

упрощения задачи момент холостого хода и к. п. д. стана включены в момент прокатки — M_u):

$$\tau M_{\kappa\theta}^2 = (M_u + M_a)^2 \frac{n_n}{a} + \xi^2 (M_u + M_a)^2 \frac{n_m - n_n}{a} + \\ + \xi^2 (M_u - M_b)^2 \frac{n_m - n_n}{b} + (M_u - M_b)^2 \frac{n_n}{b}, \quad (76)$$

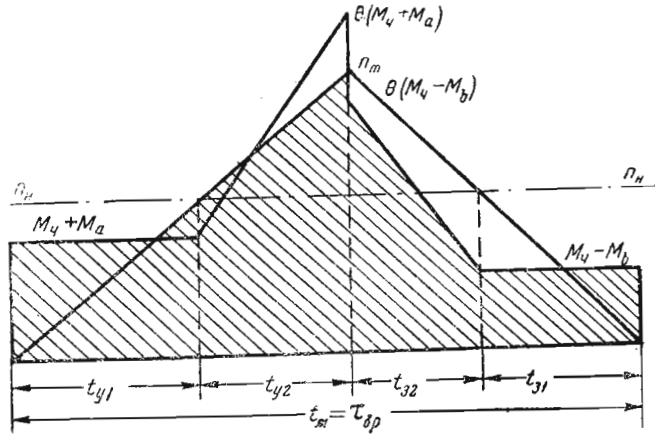


Рис. 22. Нагрузочная диаграмма при $t_n = n_y = n_z = 0$ и $\theta > 1$.

где $\xi^2 = \frac{1}{3} (\theta^2 + \theta + 1)$ — коэффициент для учета увеличения момента, эквивалентного по нагреву, при $n_m > n_n$.

$$\theta = \frac{n_m}{n_n}.$$

Обозначив через GD^2 маховой момент всех вращающихся деталей рабочей линии стана, приведенный к валу двигателя, и принимая во внимание, что

$$M_a = \frac{GD^2}{375} \cdot a = \delta a; \quad M_b = \frac{GD^2}{375} \cdot b = \delta b,$$

а также, что

$$M_b = \frac{b}{a} M_a \quad \text{и} \quad b = \frac{aK}{2a - K},$$

после подстановки в равенство (76) получим

$$M_{\kappa\theta}^2 = \frac{n_n}{\tau} \left[\frac{M_u^2}{a} + 2M_u \delta + \delta^2 a + \xi^2 M_u^2 \frac{\theta - 1}{a} + 2M_u \delta (\theta - 1) + \right. \\ \left. + \delta^2 a (\theta - 1) + \xi^2 M_u^2 \frac{(\theta - 1)(2a - K)}{aK} - \xi^2 M_u^2 \delta (\theta - 1) + \right. \\ \left. + \delta^2 (\theta - 1) \frac{aK}{2a - K} + M_u^2 \frac{2a - K}{aK} - 2M_u \delta + \frac{\delta^2 aK}{2a - K} \right].$$

Это выражение имеет минимум при определенном значении отношения $\frac{b}{a}$. Найдем первую производную от выражения для $M_{\kappa\theta}^2$ по a и приравняем ее нулю

$$[M_{\kappa\theta}^2]'_a = \delta^2 \theta - \frac{\delta^2 \theta K^2}{(2a - K)^2} = 0.$$

Решая полученное уравнение относительно a , получим $a = K$, откуда $(M_{\kappa\theta})_{\min}$ имеет место при

$$a = b = K. \quad (77)$$

Следовательно, наивыгоднейшее соотношение $\frac{b}{a}$ при данном K равно единице. Тот же вывод получается и во всех других частных случаях (см. главу III).

Применяемое часто в практике реверсивного электропривода отношение $\frac{b}{a} = 2$ таким образом не имеет основания и лишь увеличивает нагрузку двигателя и расход энергии.

При $b = a = K$ для рассматриваемого случая получим, заменяя $M_{\kappa\theta}$ на M_u ,

$$M_u = \sqrt{\frac{3}{\theta^2 + \frac{2}{\theta}} \cdot M_n^2 - \left(\frac{GD^2}{375} \cdot K \right)^2}; \quad (78)$$

при $n_m \leq n_n$ $\theta = 1$, тогда

$$M_u = \sqrt{M_n^2 - \left(\frac{GD^2}{375} \cdot K \right)^2}; \quad (78')$$

при $\theta = 2$

$$M_u = \sqrt{0,6 M_n^2 - \left(\frac{GD^2}{375} \cdot K \right)^2}. \quad (78'')$$

Для типового двигателя 7000 л. с. при $M_n = 100$ тм и $a = b = K$ при различных значениях его получим M_u , приведенные ниже.

θ	$K = 26,6$	$K = 40$	$K = 100$
1	96,5	91,7	0
2	73	66,5	0

Таким образом для блюминга (при $D_p = 950$) наивыгоднейшее по тройному условию $K = 40$ даже в наиболее тяжелых условиях обеспечивает значительный полезный момент прокатки.

При ускорениях $a = b = 100$ об/мин. сек. ($K = 100$), прокатка без пауз невозможна даже при $n_m < n_n$ ($\theta = 1$). При наличии пауз между пропусками моменты прокатки и ускорения могут возрастать с возрастанием пауз. В зависимости от соотношения скоростей n_y , n_n и n_z имеется и наивыгоднейшее соотношение между ускорением и моментом прокатки (M_u).

Это последнее находится из минимума работы прокатки за цикл пропуска путем несложных математических выкладок, в результате которых получаем (при $a = b$):

$$\frac{K}{M_u} = \frac{375}{GD^3} \sqrt{0,5 + \left(\frac{n_y}{2n_n}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{2n_n}\right)^2 - \frac{n_y + n_z}{2n_n}}. \quad (79)$$

При средних значениях скоростей $n_y = n_z = 25$ об/мин и $n_n = 50$ об/мин и при полном использовании мощности двигателя по условиям нагрева равенство (79) дает следующие наивыгоднейшие значения ускорений ($a = b = K$):

для электродвигателя в 7000 л. с. $K = 50-35$;
для электродвигателя в 10 000 л. с. $K = 70-50$.

Большие значения ускорений для коротких полос, а меньшие для длинных.

С уменьшением n_y и n_z наивыгоднейшие ускорения увеличиваются, и наоборот.

Если наивыгоднейшие ускорения получаются большими и не могут быть использованы вследствие больших обжатий металла то часто бывает выгоднее увеличить число пропусков, чем снизить ускорения.

Пауза на кантовку. Что касается паузы, необходимой для кантовки, то она в известных пределах (когда расстояние пробега слитка до кантователя невелики) также может быть согласована с реверсированием валков (нажимное устройство при этом не лимитирует и, следовательно, t_{ny} не может быть увязано с t_{rev} и $t_{x.p}$).

Если расстояние пробега слитка до первого крючка кантователя обозначить

$$l_k = S - 0,5 L_1,$$

где S расстояние от оси валков до первого крючка кантователя, L длина слитка, то необходимая скорость выброса будет

$$v_3 = \sqrt{2\mu g(S - 0,5L_1)}; \quad (80)$$

при $\mu g = 2$

$$v_3 = 2\sqrt{S - 0,5L_1}. \quad (80)$$

При $S = 3$ м и $L_1 = 2$ м потребуется $v_3 = 2,8$ м/сек, что при $D_p = 1000$ мм соответствует $n_3 = 50$ об/мин.

В этом случае пауза составит 2,8 сек. и кантовка должна производиться «на ходу».

Если надлежащая скорость выброса не обеспечивается, что возможно на первых пропусках, когда раскат еще короткий, то не трудно вывести формулу для расчета паузы:

$$t_{x.p} = \frac{2S - L_1}{v_p} + \frac{3v_p}{2\mu g} + \frac{v_3^2}{2\mu g v_p} - \frac{v_3}{\mu g}, \quad (81)$$

где максимальная скорость ролланга $v_p > v_3$.

При $\mu g = 2$

$$t_{x.p} = \frac{2S - L_1 + 0,5v_p^2 + 0,25(v_p - v_3)^2}{v_p}. \quad (82)$$

Н а ч а л ь н а я п а у з а реверсивных станов обычно лимитируется временем подъема верхнего валка стана в исходное положение. Выражая скорость и ускорение нажимного устройства в линейных единицах, получим

$$T_0 = \frac{H_1 - h_k - \frac{v_{n.y}^2}{K_{n.y}}}{v_{n.y}} + \frac{2v_{n.y}}{K_{n.y}} \quad (83)$$

или

$$T_0 = \frac{H_1 - h_k}{v_{n.y}} + \frac{v_{n.y}}{K_{n.y}},$$

где H_1 — высота полосы после первого пропуска;

h_k — конечная высота полосы;

$v_{n.y}$ — осевая скорость нажимного винта;

$K_{n.y}$ — осевое ускорение нажимного винта.

ГЛАВА III

ДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

Соотношение между моментом прокатки (M_u) и моментами двигателя (M_n и $M_{\max}$) при наивыгоднейшей схеме скоростей (тип I)

Наивыгоднейшей схемой скоростей реверсивного стана с точки зрения минимального цикла прокатки, как установлено выше, является треугольная схема (при $t_n = 0$).

Поэтому динамические условия работы по этой схеме представляют особый интерес.

Найдем соотношение между моментом прокатки — M_u и моментами двигателя — M_n и $M_{\max}$ при условии:

$$\theta(M_u + M_a) \leq M_{\max} \text{ и } M_{\kappa\theta} \leq M_n.$$

Для упрощения вывода примем ускорения a и b постоянными (фактически они уменьшаются при $n_m > n_n$), а $n_y = n_3$. Это соотношение является наивыгоднейшим для n_3 предыдущего и n_y последующего пропусков (64), но если предположить, что паузы перед и после рассматриваемого пропуска равны, то равенство (64) будет справедливо и для одного и того же пропуска.

При заданных паузах, длине полосы и ускорениях соотношение между n_y , n_3 и n_m на основании выражения (40) будет единственно возможным и наивыгоднейшим. Обозначим это соотношение через φ

$$n_y = n_3 = \varphi n_m.$$

С л у ч а й $\varphi n_m < n_n$ ($\varphi < \frac{1}{\theta}$). На рис. 23 приведена диаграмма моментов для случая треугольной схемы скоростей при $\varphi n_m < n_n$, но при $n_m > n_n$.

Напишем выражение для среднеквадратичного момента

$$M_{\kappa\theta}^2 \tau = M_a^2 \frac{\varphi n_m}{a} + (M_u + M_a)^2 \cdot \frac{n_n - \varphi n_m}{a} + \xi^2 (M_u + M_a)^2 \cdot \frac{n_m - n_n}{a} + \xi^2 (M_u - M_b)^2 \cdot \frac{n_m - n_n}{b} + (M_u - M_b)^2 \cdot \frac{n_n - \varphi n_m}{b} + M_b^2 \frac{\varphi n_m}{b}.$$

Механический к. п. д. и M_x учтены для упрощения в M_u , величина ξ была пояснена выше (76).

После преобразований получим

$$M_{\kappa\theta} = \sqrt{\frac{1}{3} M_u^2 \left(\theta^2 + \frac{2}{\theta} - 3\varphi \right) + \frac{1}{3} M_a M_b \left(\theta^2 + \frac{2}{\theta} \right)} \quad (84)$$

или, обозначив

$$\frac{1}{3} \left(\theta^2 + \frac{2}{\theta} \right) = A,$$

упростим уравнение (84)

$$M_{\kappa\theta} = \sqrt{M_u^2 (A - \varphi) + A M_a M_b}. \quad (84')$$

Принимая во внимание, что

$$M_a = \frac{GD^2}{375} \cdot a = \delta a \text{ и } M_b = \frac{GD^2}{375} \cdot b = \delta b,$$

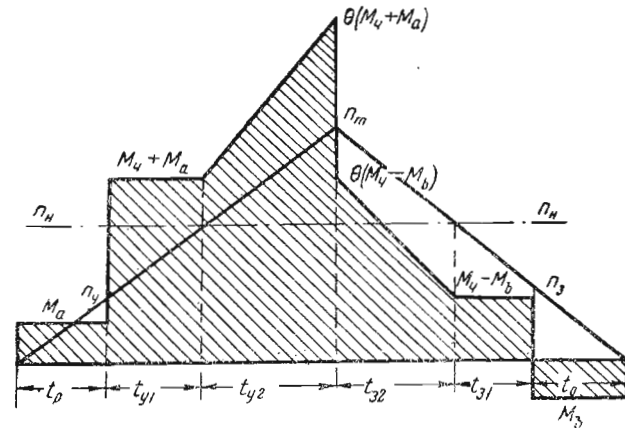


Рис. 23. Нагрузочная диаграмма при $n_y > 0$; $n_3 > 0$; $\theta > 1$; (тип I схемы скоростей).

перепишем уравнение (84) в виде

$$M_{\kappa\theta} = \sqrt{M_u^2 (A - \varphi) + A \delta^2 ab}. \quad (85)$$

При заданном постоянном

$$K = \frac{2ab}{a + b} \quad (86)$$

соотношение между a и b (может меняться в пределах от 1 до 4) не влияет на продолжительность цикла прокатки, так как

$$\tau = \frac{n_m}{a} + \frac{n_m}{b} = \frac{2n_m}{K}. \quad (87)$$

Найдем при каком соотношении a и b будет $(M_{\kappa\theta})_{\min}$. Для этого нужно приравнять нулю первую производную от переменной части выражения (85) по a

$$[ab]'_a = \left[\frac{a^2 K}{2a - K} \right]'_a = \frac{2Ka(2a - K) - 2b^2 K}{(2a - K)^2} = 0.$$

Решая полученное уравнение, будем иметь

$$a = K;$$

после подстановки в равенство (86) получим $b = K$.

Следовательно, $(M_{кв})_{мин}$ будет при
 $a = b = K$

и выражение (85) примет вид

$$(M_{кв})_{мин} = \sqrt{M_u^2 (A - \varphi) + A \delta^2 K^2}. \quad (88)$$

Заменяя $M_{кв}$ на M_n , получим выражение для допускаемого момента прокатки из условий нагрева двигателя

$$M_u = \sqrt{\frac{M_n^2 - A \delta^2 K^2}{A - \varphi}} = \sqrt{\frac{M_n^2 - A M_a^2}{A - \varphi}}. \quad (89)$$

Из последнего уравнения при $n_m \leq n_n$; $\theta = 1$ и $A = 1$, получим

$$M_u = \sqrt{\frac{M_n^2 - \delta^2 K^2}{1 - \varphi}} = \sqrt{\frac{M_n^2 - M_a^2}{1 - \varphi}}, \quad (89')$$

при $n_y = n_z = 0$ и, следовательно, $\varphi = 0$, и при $\theta = 1$

$$M_u = \sqrt{M_n^2 - \delta^2 K^2} = \sqrt{M_n^2 - M_a^2}. \quad (89'')$$

С изменением среднего ускорения K среднеквадратичный момент из равенства (88) увеличится или уменьшится в зависимости от изменения φ [сравнить с уравнением (79)]. Однако изменение K против оптимального его значения, как нами было выяснено выше (73), нарушает ритмичность работы операторов или влечет за собой менее благоприятное соотношение скоростей n_z и n_y (рис. 21), которое достаточно точно можно будет выдержать только при полной автоматизации управления станом.

С л у ч а й $\varphi n_m > n_n$ ($\varphi > \frac{1}{\theta}$). На рис. 24 приведена схема моментов для этого случая.

Обозначая через $\theta = \frac{n_m}{n_n}$ и $\theta_p = \frac{n_y}{n_n}$, напомним выражение для поправочных коэффициентов, учитывающих увеличение эквивалентного по нагреву момента за n_n . При увеличении числа оборотов от n_n до n_y

$$\xi_p^2 = \left(\frac{M_{ay}}{M_a} \right)^2 = \frac{1}{3} (\theta_p^2 + \theta_p + 1)$$

и при увеличении числа оборотов от n_y до n_m

$$\xi_y^2 = \left(\frac{M_{yz}}{M_u + M_a} \right)^2 = \frac{1}{3} (\theta^2 + \theta \theta_p + \theta_p^2).$$

Учитывая, что $\frac{\theta_p}{\theta} = \frac{n_y}{n_m} = \varphi$ и $\theta_p = \varphi \theta$, получим

$$\left. \begin{aligned} \xi_y^2 &= \frac{1}{3} \theta^2 (\varphi^2 + \varphi + 1); \\ \xi_p^2 &= \frac{1}{3} \theta^2 \left(\varphi^2 + \frac{\varphi}{\theta} + \frac{1}{\theta^2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (90)$$

Выражение для среднеквадратичного момента получит вид

$$M_{кв}^2 \tau = \frac{M_a^2}{a} n_n + \frac{\xi_p^2 M_a^2}{a} (n_y - n_n) + \frac{\xi_y^2 (M_u + M_a)^2}{a} (n_m - n_y) + \\ + \frac{\xi_y^2 (M_u - M_b)^2}{b} (n_m - n_z) + \frac{\xi_p^2 M_b^2}{b} (n_z - n_n) + \frac{M_b^2}{b} \cdot n_n.$$

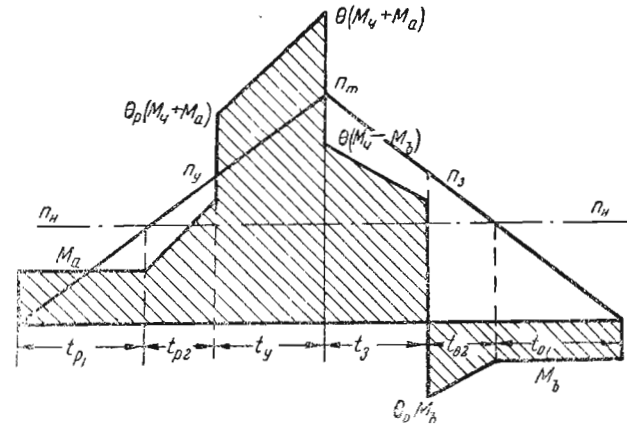


Рис. 24. Нагрузочная диаграмма при $n_y > n_n$; $n_z > n_n$; $\theta > 1$.

После подстановки

$$M_a = \delta a, \quad M_b = \delta b, \quad \frac{n_y}{n_m} = \varphi \text{ и } \frac{n_n}{n_m} = \frac{1}{\theta}$$

и соответствующих преобразований получим

$$M_{кв} = \sqrt{\xi_y^2 (1 - \varphi) M_u^2 + \left[\xi_y^2 (1 - \varphi) + \xi_p^2 \left(\varphi - \frac{1}{\theta} \right) + \frac{1}{\theta} \right] \delta^2 ab} \quad (91)$$

или в упрощенной записи

$$M_{кв} = \sqrt{B M_u^2 + A \delta^2 ab}, \quad (91')$$

где

$$\left. \begin{aligned} B &= \xi_y^2 (1 - \varphi) = \frac{1}{3} \theta^2 (1 - \varphi^2); \\ A &= \xi_y^2 (1 - \varphi) + \xi_p^2 \left(\varphi - \frac{1}{\theta} \right) + \frac{1}{\theta} = \frac{1}{3} \left(\theta^2 + \frac{2}{\theta} \right). \end{aligned} \right\} \quad (92)$$

Заменяя $M_{кв}$ на M_n , получим выражение для допускаемого момента прокатки из условий нагрева двигателя

$$M_u = \sqrt{\frac{M_n^2 - A \delta^2 ab}{B}}. \quad (93)$$

Из этой формулы при

$$n_y = n_n, \varphi = \frac{1}{\theta} \text{ и } B = \frac{1}{3} (\theta^2 - \varphi) = A - \varphi$$

снова получим выражение (89).

Подставляя в выражение (93) $a = b$, получим

$$(M_n)_{\max} = \sqrt{\frac{M_n^2 - A \delta^2 K^2}{B}} = \sqrt{\frac{M_n^2 - A M_n^2}{B}} \quad (93')$$

Обозначив $\frac{M_a \cdot M_b}{M_n^2} = \alpha^2$, выражения (89) и (93) можно представить и в относительных единицах в виде коэффициента относительной нагрузки двигателя по нагреву λ_n .

При $\varphi < \frac{1}{\theta}$ из формулы (89) получим

$$\lambda_{nI} = \frac{M_n}{M_n} = \sqrt{\frac{1 - \frac{A \delta^2 ab}{M_n^2}}{A - \varphi}} = \sqrt{\frac{1 - A \alpha^2}{A - \varphi}}, \quad (94)$$

при $\varphi > \frac{1}{\theta}$ из формулы (93) получим

$$\lambda_{nI} = \frac{M_n}{M_n} = \sqrt{\frac{1 - \frac{A \delta^2 ab}{M_n^2}}{B}} = \sqrt{\frac{1 - A \alpha^2}{B}}. \quad (95)$$

На рис. 25 приведены значения λ_n , вычисленные по формуле (94) слева, и по формуле (95) — справа от кривой λ_n при $\varphi = \frac{1}{\theta}$, проведенной пунктиром при значениях

$$\alpha^2 = \frac{\delta^2 ab}{M_n^2} = \left(\frac{M_a}{M_n} \right)^2 = 0,16;$$

$M_n = 1 \text{ тм}; \delta = 0,01 \text{ тм. сек}^2; a = b = 40 \text{ об/мин. сек.}$

По этому графику удобно выбирать обжатия из условий нагрева двигателя при наивыгоднейшей схеме скоростей, а также можно проверить допустимость наивыгоднейшей схемы скоростей при заданном обжатии.

На этом же графике даны допускаемые из условий нагрева максимальные моменты на валу двигателя

$$\lambda_m = \frac{\theta (M_n + M_a)}{M_n}. \quad (96)$$

Выразим значение коэффициента φ через время при $n_y = n_z = n_x = \varphi n_m$.

Учитывая, что из формулы (64)

$$n_x = K \cdot \frac{t_x}{2} \text{ и } n_m = K \cdot \frac{\tau}{2},$$

получим

$$\varphi = \frac{n_x}{n_m} = \frac{K t_x}{K \tau} = \frac{t_x}{\tau}, \quad (97)$$

т. е. φ представляет собой коэффициент холостого хода стана.

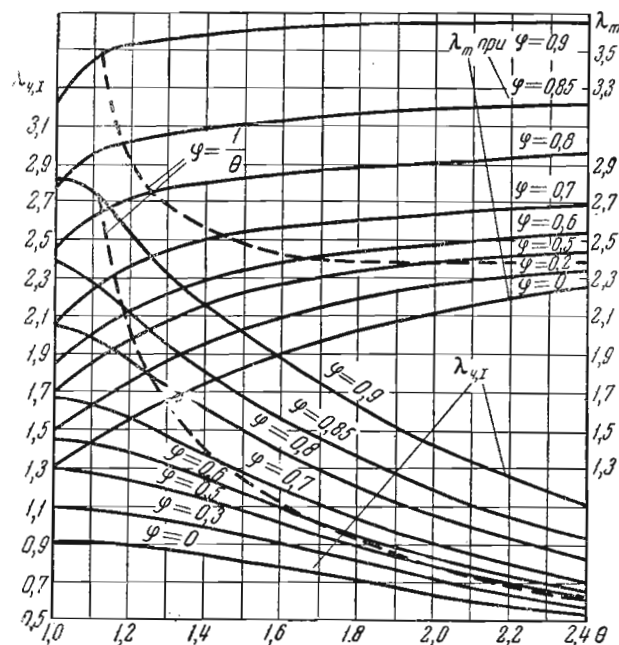


Рис. 25. Допускаемые моменты по нагреву двигателя (тип I схемы скоростей).

Написав выражение для машинного времени

$$t_m = \tau - t_x = \frac{2(n_m - n_x)}{K},$$

найдем коэффициент загрузки стана по времени

$$\gamma = \frac{t_m}{\tau} = \frac{n_m - n_x}{n_m} = 1 - \varphi. \quad (98)$$

Рассматривая график на рис. 25, видим, что максимальный момент двигателя, допускаемый его нагревом, в значительной степени зависит от коэффициента использования стана γ .

Чем выше коэффициент использования стана γ (или чем меньше коэффициент холостого хода φ), тем меньше должен быть коэффициент перегрузки двигателя λ_m .

Поэтому паспортные коэффициенты перегрузки реверсивного двигателя, достигающие $\lambda_m = 2,5 \div 3,0$, могут быть использованы только при первых пропусках.

Конечно, наличие отдельных больших пауз (кантовка, начальная пауза) увеличивает общий коэффициент использования стана, что позволяет соответственно увеличить λ_m и λ_u .

Рост коэффициента перегрузки двигателя λ_m с увеличением θ , как это видно из графика 25, не является эффективным, так как

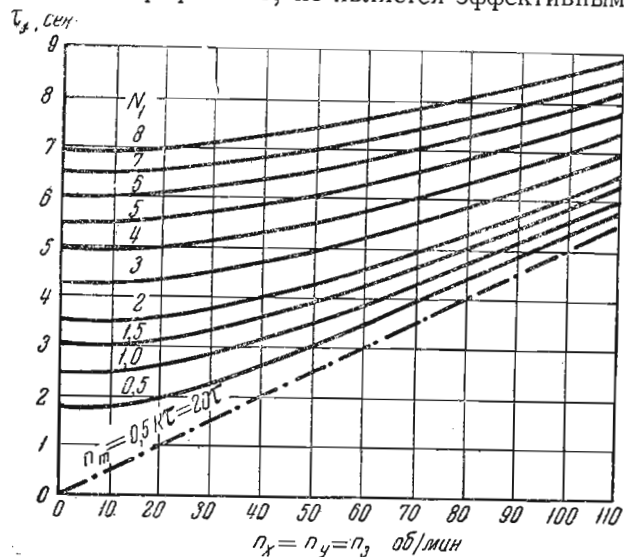


Рис. 26. Цикл пропуска при $n_y = n_3$ (тип I схемы скоростей).

полезный момент при этом снижается, о чем свидетельствует изменение коэффициента λ_u .

Выбирая обжатия из условий нагрева (по λ_u), нужно одновременно сделать проверку двигателя на перегрузку. Так, например, при $\varphi \geq 0,85$ нельзя выбирать обжатия по условиям нагрева, а при $\varphi < 0,7$ — по максимальному моменту двигателя.

Если автомат главного привода установлен на $\lambda_m = 2,75$, то при $\varphi = 0,8$ и $\theta = 1,2$ — обжатие нужно выбирать по нагреву, а при $\theta = 1,3$ по коэффициенту перегрузки.

На рис. 26 приведен график зависимости цикла пропуска от $n_x = n_y = n_3$ и от длины полосы в оборотах — N_1 (при $t_n = 0$).

Прямая пунктирная линия (при $K = 40$)

$$n_m = K \cdot \frac{\tau}{2} = 20 \cdot \tau$$

связывает цикл пропуска и максимальное число оборотов.

Соотношение между моментом прокатки и моментами двигателя при прокатке с постоянной скоростью (тип II схемы скоростей)

Схема скоростей при прокатке с постоянной скоростью $n_y = n_n = n_3$ была уже рассмотрена выше. Наивыгоднейшая постоянная скорость из условия $\tau_{мин}$ была также определена (66).

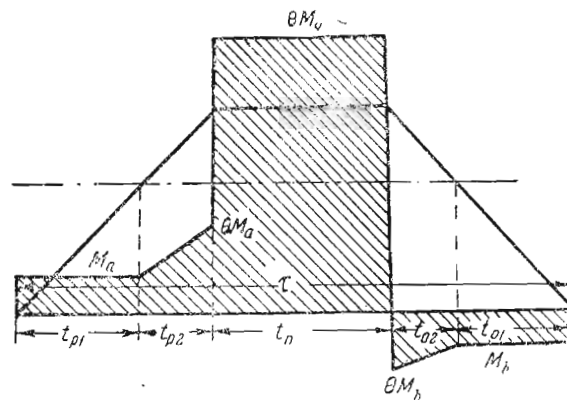


Рис. 27. Нагрузочная диаграмма при $n_y = n_n = n_3$ (тип II схемы скоростей).

Рассмотрим динамику этой схемы прокатки.

Напишем выражение для среднеквадратичного момента (рис.

27) при наивыгоднейшем n_n , когда $t_m = t_x = \frac{2 n_n}{K}$

$$M_{кв}^2 \tau = \frac{M_a^2}{a} n_n + \frac{\xi^2 M_a^2}{a} (n_n - n_n) + \frac{2\theta^2 M_u^2}{K} n_n + \frac{\xi^2 M_b^2}{b} (n_n - n_n) + \frac{M_b^2}{b} n_n.$$

После преобразования с учетом формулы (92)

$$M_{кв} = \sqrt{\frac{1}{2} (\theta^2 M_u^2 + A \delta^2 ab)} = \sqrt{\frac{1}{2} (\theta^2 M_u^2 + A M_a M_b)}. \quad (99)$$

Заменяя $M_{кв}$ на M_n , получим

$$M_n = \sqrt{\frac{2M_n^2 - A \delta^2 ab}{\theta^2}} = \sqrt{\frac{2M_n^2 - A M_a M_b}{\theta^2}}; \quad (100)$$

при $a = b$

$$(M_n)_{макс} = \frac{1}{\theta} \sqrt{2M_n^2 - A \delta^2 K^2} = \frac{1}{\theta} \sqrt{2M_n^2 - A M_a^2}; \quad (101)$$

при $\theta = 1$

$$M_n = \sqrt{2M_n^2 - M_a^2} \quad (101')$$

или в виде относительной нагрузки двигателя

$$\lambda_n = \frac{M_n}{M_K} = \frac{1}{\theta} \sqrt{2 - A \left(\frac{M_a}{M_K} \right)^2} = \frac{1}{\theta} \sqrt{2 - A \alpha^2}. \quad (101'')$$

Для удобства расчета наивыгоднейших n_n , τ и моментов при этой схеме приведены рис. 28, 29 и 30. На рис. 30 в виде пунктирных

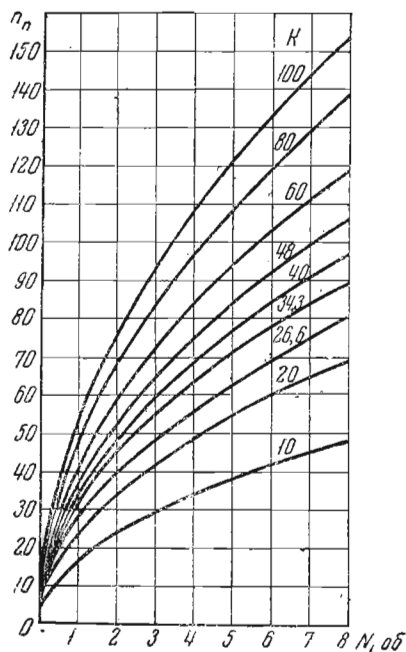


Рис. 28. Оптимальные скорости при схеме скоростей типа II.

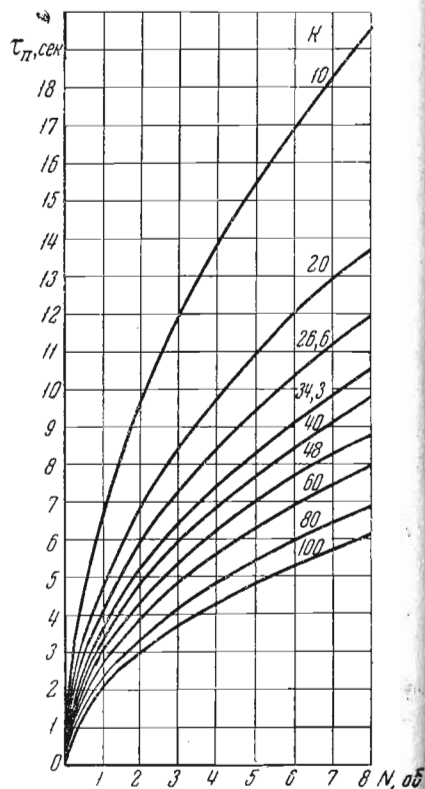


Рис. 29. Минимальный цикл пропуски при схеме скоростей типа II.

кривых даны $\lambda_n = f(n_n)$ при двух значениях режимов скоростей $K = 40$ и $K = 100$ об/мин. сек.

В случае отступления от наивыгоднейшего n_n ($t_x \neq t_m$) выражение для моментов получит более сложный вид (при $a = b$)

$$\lambda_{nII} = \frac{1}{\theta} \sqrt{\frac{30KN_1 + n_n^2(1 - A\alpha^2)}{30KN_1}}; \quad (102)$$

при $\theta = 1$ и $A = 1$

$$\lambda_{nII} = \sqrt{\frac{30KN_1 + n_n^2(1 - \alpha^2)}{30KN_1}}. \quad (102')$$

На рис. 30 даны значения λ_n и λ_m в зависимости от длины полюсы N_1 и постоянных оборотов ($n_n = \theta n_n$) при $n_n = 50$ об/мин, $K = 40$ и

$$\alpha = \frac{M_a}{M_K} = 0,4.$$

Продолжительность цикла вращения валков (цикл пропуска) в зависимости от принятого числа оборотов по формуле (65) равна

$$\tau = t_x + t_m = \frac{2n_n}{K} + \frac{N_1}{n_n} \cdot 60.$$

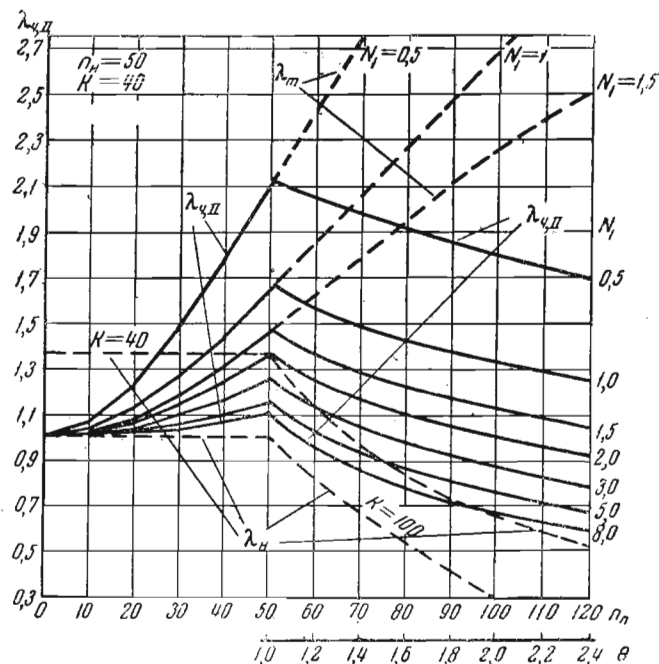


Рис. 30. Допускаемые моменты по нагреву двигателей λ_2 , (тип II схемы скоростей).

При наивыгоднейшем с точки зрения производительности числе оборотов, когда $t_x = t_m$

$$\tau_{мин} = \frac{4n_n}{K} = 2 \sqrt{\frac{30N_1}{K}}, \quad (103)$$

при $K = 40$,

$$\tau_{мин} = 0,1n_n = 1,73 \sqrt{N_1}.$$

На рис. 31 дана зависимость цикла пропуска (τ) от длины полосы и постоянной скорости (при $K = 40$).

Для каждой данной длины имеется рациональное число оборотов, при котором цикл пропуска имеет минимальное значение.

На графике эти рациональные обороты лежат на одной прямой. Пользуясь графиками (рис. 30 и 31), можно выбирать режимы прокатки с постоянной скоростью.

Так например, для прокатки на блюминге полосы длиной $N_1 = 1,0$ об. (3,14 м при $D_p = 1$ м) наименьшее время при

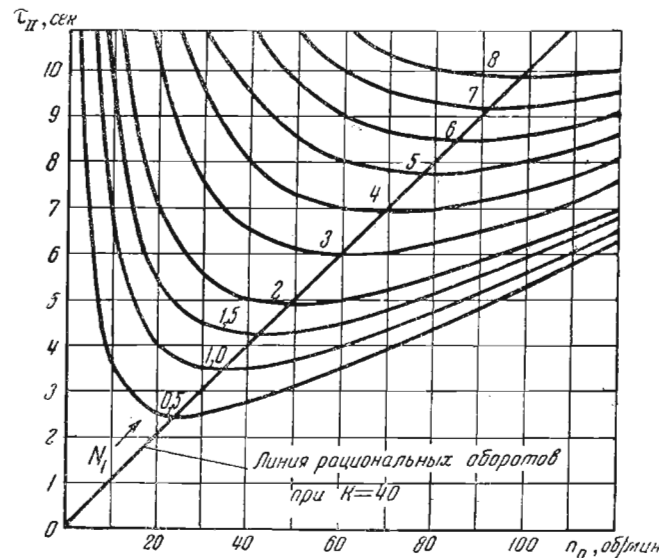


Рис. 31. Цикл пропуска при различных n_n .

прокатке с постоянной скоростью получим при $n_n = 35$ об/мин когда $\tau_{\min} = 3,4$ сек. (рис. 31). Обжатие при этом можно выбрать исходя из допускаемого в этом случае момента прокатки $M_n = \lambda_n M_n = 1,36 M_n$ (рис. 30 при $K = 40$).

Уменьшение или увеличение числа оборотов против 35 об/мин увеличит цикл пропуска. При этом уменьшение числа оборотов будет вызывать уменьшение допускаемого момента прокатки (формула 102' при $\theta = 1$) и, следовательно, уменьшение обжатия.

Увеличение числа оборотов, наоборот, будет вызывать увеличение допускаемого момента и, следовательно, обжатия вплоть до достижения номинальной скорости (на рис. 30 при $n_n = 50$ об/мин). При $n_n = 50$ цикл пропуска возрастет с 3,4 до 3,7 сек., т. е. на 9%, а допускаемый момент возрастет с $1,36 M_n$ до $1,66 M_n$, т. е. на 22%. Почти на столько же можно увеличить обжатие.

При дальнейшем увеличении скорости сверх номинальной наряду с увеличением продолжительности будет снижаться допускае-

мое обжатие (рис. 30). Повышать n_n в сравнении с наивыгоднейшим из условия $\tau_{\min}$ для увеличения обжатий можно только при обеспечении захвата.

С увеличением обжатия и скорости условия захвата ухудшаются (см. рис. 1).

Из графика на рис. 30 видно, что совпадение минимального цикла пропуска и максимального допускаемого момента (обжатия) имеет место только при $N_1 = 2$ (6,28 м при $D_p = 1$ м), когда рациональное $n_n = n_n$ ($\theta = 1$).

Кривые λ_n показывают, что при $N_1 = 0,5$ об. и $n_n < 70$ об/мин обжатия должны выбираться из условий нагрева двигателя, а при $n_n > 70$ об/мин по максимальному моменту двигателя (при $M_{\max} = 2,75 M_n$).

При $N_1 = 1,0$ таким числом оборотов будет 105.

При $N_1 > 1,25$ обжатие определяется только нагревом двигателя.

В итоге анализа прокатки с постоянной скоростью можно сделать заключение:

1) если величина обжатия не ограничивается двигателем, то максимальная производительность будет при $n_n = \sqrt{30KN_1}$;

2) если величина обжатия ограничивается мощностью двигателя, то максимальная производительность будет при $n_n = n_n$ (если позволяют условия захвата рис. 1), когда имеет место наибольшее значение показателя производительности

$$P = \frac{N_1 \lambda_n}{\tau} \quad (104)$$

При большей длине этот показатель возрастает, несмотря на уменьшение λ_n .

Сравнение прокатки при постоянной скорости (тип II) с прокаткой без периода постоянной скорости (тип I)

Выше было доказано, что прокатка без периода постоянной скорости ($t_n = 0$) всегда дает наименьшую продолжительность ($\tau_{\min}$).

Поэтому I тип схемы скоростей будет наивыгоднейшим, если в данном пропуске момент прокатки не превышает допускаемый по формулам (94) и (95) (рис. 25).

Если же величина обжатия лимитируется мощностью двигателя, то нужно выбрать ту схему скоростей, которая при равных циклах пропусков дает наибольший допускаемый момент прокатки (λ_n) (рис. 25 и 30).

При схеме скоростей II типа наименьшая продолжительность ($\tau_{\min}$) имеет место при

$$n_n = \sqrt{30KN_1}$$

Сравним эти два типа схем скоростей по допускаемому λ_n при $\tau_{\min} = \tau_{\min}$.

В схеме I типа (87)

$$\tau_{\min} = \frac{2n_m}{K};$$

в схеме II типа (103)

$$\tau_{\text{п. мин}} = \frac{4n_n}{K}.$$

Очевидно циклы пропусков будут равны при $n_m = 2 n_n$. Тогда на основании формулы (40) при $n_y = n_z = \varphi n_m$

$$\varphi = \sqrt{1 - \frac{60KN_1}{n_m^2}}, \quad (105)$$

подставляя

$$n_m = 2n_n = 2\sqrt{30KN_1},$$

получим

$$\varphi = \sqrt{1 - \frac{60KN_1}{(2\sqrt{30KN_1})^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707. \quad (105')$$

Учитывая, что при схеме II коэффициент холостого хода меньше ($\varphi = 0,5$), прокатка по схеме I позволяет при одинаковом цикле пропуска иметь большие паузы на величину (97)

$$t_{x.m} - t_{x.n} = (0,707 - 0,5)\tau = 0,207\tau. \quad (106)$$

Это особенно важно для станов с малой скоростью нажимного устройства, когда при большей сумме пауз можно получить при схеме I меньший период прокатки, чем при схеме II.

Определив φ , можно сравнить допускаемые моменты по уравнениям (89) и (101"). Рассматривая эти уравнения и графики 25 и 30, видим, что при схеме I максимальное значение $\lambda_{\text{ч}}$ имеет место при $\theta = 1$ и оно постоянно при изменении n_m от 0 до n_n . С увеличением θ значение $\lambda_{\text{ч}}$ быстро снижается.

При схеме II наибольшее значение $\lambda_{\text{ч}}$ имеет место лишь при $n_n = n_n$ и снижается не только с увеличением, но и с уменьшением оборотов в сравнении со значением n_n .

При $n_n = n_n$ должно быть $n_m = 2n_n$, следовательно, при схеме I будет $\theta = 2$. По рис. 25 видим, что в этом случае при $\varphi = 0,707$ $\lambda_{\text{ч}1} \approx 0,9$, т. е. меньше чем по схеме II ($N_1 = 2$ и $\lambda_{\text{ч}n} = 1,36$).

С другой стороны, например, при $n_n = 30$ об/мин, должно быть $n_m = 60$ об/мин и $\theta = 1,2$. По рис. 25 при $\varphi = 0,707$ имеем $\lambda_{\text{ч}1} = 1,58$, т. е. больше чем по второй схеме ($\lambda_{\text{ч}n} = 1,36$ при $N_1 = 0,8$).

Таким образом видно, что преимущество схемы I может быть только при $n_n < n_n$ во второй схеме. Поэтому, сопоставляя формулы (89) и (101"), можно принять

$$\theta_n = A_n = 1 \text{ и } \lambda_{\text{ч}n} = \sqrt{2 - \alpha^2}.$$

Очевидно преимущество схемы I будет тогда, когда

$$\left(\frac{\lambda_{\text{ч}m}}{\lambda_{\text{ч}n}}\right)^2 = \frac{1 - A\alpha^2}{(A - \varphi)(2 - \alpha^2)} > 1,$$

где $A = \frac{1}{3} \left(\theta^2 + \frac{2}{\theta} \right)$ — относится к схеме I.

При $\varphi = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$ получим, что $\frac{\lambda_{\text{ч}m}}{\lambda_{\text{ч}n}}$ будет больше единицы при

$$A_m < 1,207 - 0,353 \alpha^2; \quad (107)$$

при $\alpha = 0,4$ должно быть $A_m < 1,15$ или

$$\theta_m \leq 1,414. \quad (107')$$

Таким образом наивыгоднейшая схема в скоростном отношении будет наивыгоднейшей по сравнению со схемой II и в динамическом отношении при $\theta < \sqrt{2}$.

При обычно принятой номинальной скорости $n_n = 50$ об/мин, схема I будет наивыгоднейшей в динамическом отношении при $n_m < n_n \sqrt{2} \approx 70$ об/мин.

Соотношение между моментом прокатки и моментами двигателя при смешанной схеме скоростей (тип III)

Схема скоростей типа III, имеющая три периода машинного времени ($t_x = t_y + t_n + t_z$), является наиболее общей и промежуточной по отношению к первым двум схемам. При $t_n = 0$ получается тип I схемы скоростей; при $n_y = n_z = n_n$ получается тип II схемы. В практике работы реверсивных станов схема типа III является самой распространенной.

Найдем соотношение между моментом прокатки $M_{\text{ч}}$ и моментами двигателя M_n и $M_{\text{макс}}$ при наивыгоднейших соотношениях, принятых выше.

С л у ч а й $\varphi n_m < n_n$ ($\varphi < \frac{1}{\theta}$). На рис. 32 дана диаграмма моментов для схемы скоростей типа III для данного случая, где $n_y = n_z = \varphi n_m$.

Напишем выражение для среднеквадратичного момента в общем случае при $\theta > 1$:

$$\begin{aligned} M_{\text{кс}}^2 \tau = & \frac{M_a^2}{a} \varphi n_n + \frac{(M_{\text{ч}} + M_a)^2}{a} (n_n - \varphi n_n) + \frac{\xi^2 (M_{\text{ч}} + M_a)^2}{a} (n_n - n_n) + \\ & + \theta^2 M_{\text{ч}}^2 t_n + \frac{\xi^2 (M_{\text{ч}} - M_b)^2}{b} (n_n - n_n) + \frac{(M_{\text{ч}} - M_b)^2}{b} (n_n - \varphi n_n) + \\ & + \frac{M_b^2}{b} \varphi n_n. \end{aligned}$$

Принимая наивыгоднейшее соотношение между ускорениями ($a = b$) и подставляя значения для τ и t_n из

$$\tau = \frac{2n_n}{K} + \frac{N_1 - N_y - N_z}{n_n} \cdot 60 = \frac{N_1}{N_n} 60 + \frac{n_n}{K} (1 + \varphi^2) \quad (108)$$

$$t_n = \tau - \frac{2n_n}{K} = \frac{N_1}{n_n} 60 - \frac{1 - \varphi^2}{K} n_n, \quad (109)$$

получим (заменяя $M_{кв}$ на M_n)

$$\lambda_{ч III} = \frac{M_{ч}}{M_n} = \sqrt{\frac{\frac{30KN_1}{n_n^2} + \frac{1+\varphi^2}{2} - A\alpha^2}{\theta^2 \frac{30KN_1}{n_n^2} - \frac{1-\varphi^2}{2} \theta^2 - \varphi + A}} \quad (110)$$

Здесь попрежнему

$$A = \xi^2 - \frac{\xi^2}{\theta} + \frac{1}{\theta^2} = \frac{1}{3} \left(\theta^2 + \frac{2}{\theta} \right) \quad \text{и} \quad \alpha^2 = \frac{M_a M_b}{M_n^2} = \left(\frac{\delta K}{M_n} \right)^2$$

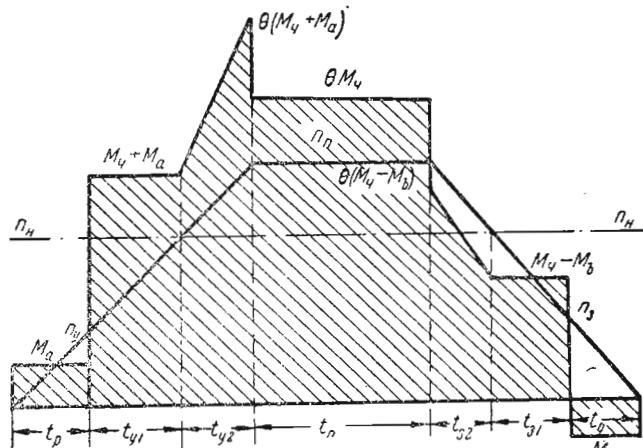


Рис. 32. Нагрузочная диаграмма при $n_y > 0$; $n_3 > 0$; $t_n > 0$ (тип III схемы скоростей).

При $n_n \leq n_n$; $\theta = 1$ и $A = 1$ выражение (110) примет вид:

$$\lambda_{ч III} = \sqrt{\frac{\frac{30KN_1}{n_n^2} + \frac{1+\varphi^2}{2} - \alpha^2}{\frac{30KN_1}{n_n^2} + \frac{1+\varphi^2}{2} - \varphi}} \quad (110')$$

Так как в этом случае $\varphi \leq \frac{1}{\theta}$, то $\varphi = 1$ может быть только при $\theta = 1$, т. е. когда $n_y = n_3 = n_n = n_n$.

При этих условиях формулы (110) превратятся в формулы для типа II скоростных диаграмм (102).

С л у ч а й $\varphi n_n > n_n$ ($\varphi > \frac{1}{\theta}$) (рис. 33). Аналогично предыдущему, учитывая формулы (90) и (92), получим

$$\lambda'_{ч III} = \sqrt{\frac{\frac{30KN_1}{n_n^2} + \frac{1+\varphi^2}{2} - A\alpha^2}{\theta^2 \frac{30KN_1}{n_n^2} - \theta^2 \frac{1-\varphi^2}{2} + B}} \quad (111)$$

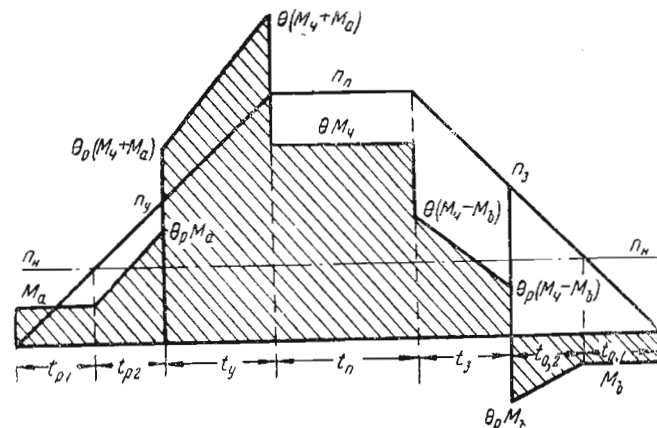


Рис. 33. Нагрузочная диаграмма при $n_y > n_n$; $n_3 > n_n$; $t_n > 0$ (тип III).

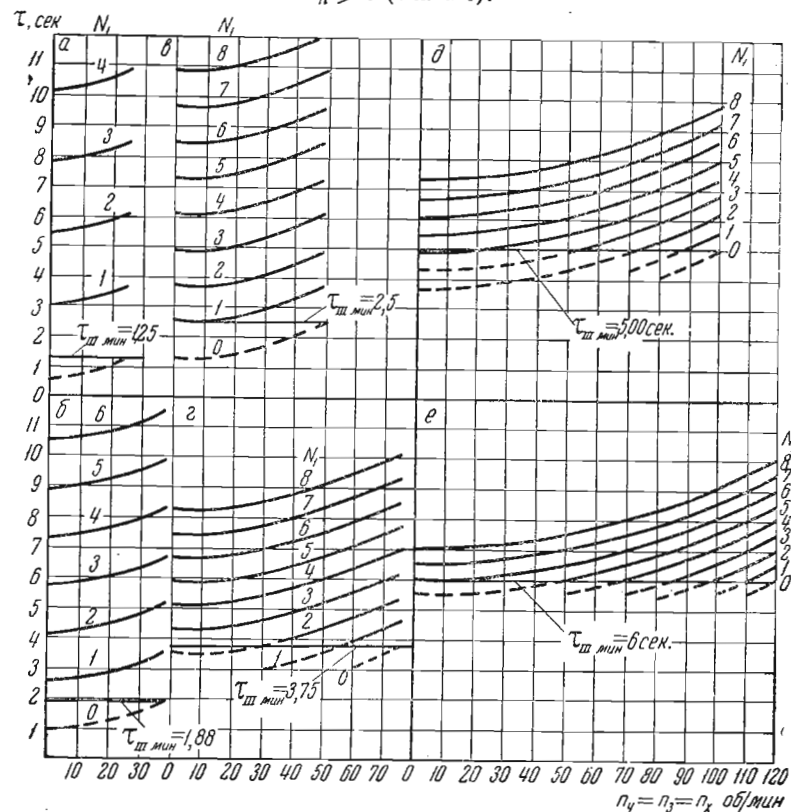


Рис. 34. Цикл пропуска при различных n_n , n_y и n_3 (тип III).
а — $n_n = 25$ об/мин; б — то же 37,5 об/мин; в — то же 50 об/мин; г — то же 75 об/мин; д — то же 100 об/мин; е — то же 120 об/мин.

При $\varphi = 1$ получим формулу (102).

На рис. 34 и 35 даны значения τ_{III} и $\lambda_{u, III}$ для схемы типа III. Проанализируем формулы (110), (111) и график на рис. 35.

Во всех случаях с увеличением коэффициента холостого хода φ значительно возрастает допускаемый момент прокатки (λ_u), что позволяет увеличивать обжатия, если они не являются предельными

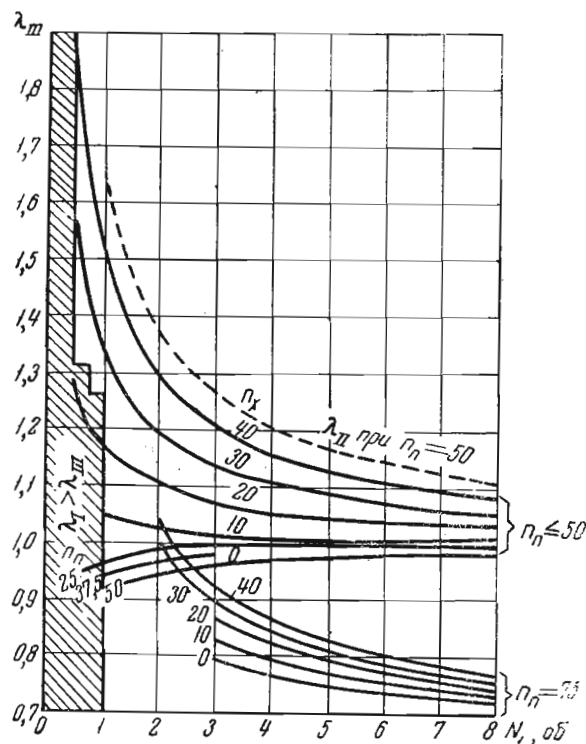


Рис. 35. Допускаемые моменты по нагреву двигателя $\lambda_{u, III}$.

из условий захвата и других условий калибровки. Однако при этом возрастает пауза и цикл пропуска. Кроме того, увеличение скорости захвата может не позволить увеличить обжатия вследствие ухудшения захвата.

Отсюда понятно какое большое влияние на повышение производительности стана оказывает надлежащая мощность и характеристика реверсивного двигателя.

Рассматривая формулу (110'), когда скорость прокатки не превышает номинальную, видим, что при $\varphi = \alpha^2$ будет $\lambda_{u, III} = 1$. При $\alpha = 0,4$, $\lambda_{u, III} = 1$ будет при $\varphi = 0,16$, что соответствует для $n_n = 50$ значению $n_y = 8$ об/мин.

Если $\varphi < \alpha^2$, то λ_u возрастает с длиной полосы, наоборот, если $\varphi > \alpha^2$, то λ_u убывает с длиной полосы. В последнем случае λ_u почти не зависит от n_n и при $n_n = n_n$ незначительно больше, чем при $n_n < n_n$. При $\varphi < \alpha^2$ влияние n_n на λ_u более значительно (рис. 35), где при $n_y = n_x = 0$ значения λ_u убывают с увеличением n_n .

В случаях $n_n > n_n$ ($\theta > 1$) имеет место резкое снижение λ_u , особенно при больших длинах.

На рис. 35 это показано для $n_n = 75$ об/мин ($n_n = 50$; $\theta = 1,5$).

Этим, в частности, объясняется тот факт, что в практике, когда мощность двигателя сравнительно ограничена (7000 л. с.), редко ведут прокатку при скоростях выше основной.

Для удобства сопоставления допускаемых моментов схемы типа III со схемами скоростей типа I и II на рис. 36 даны значения λ_I и λ_{II} в функции от длины полосы, как и на рис. 35.

Наибольшие допускаемые моменты (λ_u) получаются при прокатке по схеме типа II при $n_n = n_n$ (на графиках принято $n_n = 50$). Однако в этом случае получается и наибольшая продолжительность цикла пропуска ($\tau_{II} > \tau_{III} > \tau_I$).

Так, например, при $N_1 = 6$ об., $n_n = 50$ и $n_x = 0$ получается $\tau_{II} = 9,7$ сек., $\tau_{III} = 8,45$ сек., а $\tau_I = 6,0$ сек.

При $n_n < n_n$ преимущества схемы типа II в динамическом отношении в сравнении со схемой типа III практически отпадают.

Схема типа I в сравнении со схемой типа III имеет преимущество в динамическом отношении лишь при длине полосы, не превышающей 3 м ($N_1 = 1,0$ об.) и при $n_x \geq 25$ об/мин. В остальных случаях допускаемый момент получается ниже.

При расчете скоростных режимов прежде всего должна быть составлена схема калибровки в минимальное число пропусков и рассчитаны моменты прокатки M_u .

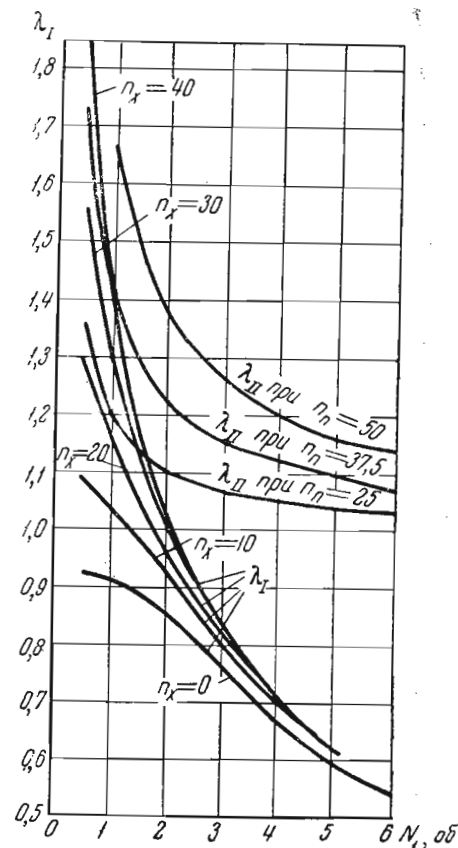


Рис. 36. Сравнение допускаемых моментов при схемах скоростей прокатки I и II типа.

Имея значения M_n по пропускам и n_x , рассчитанные по паузам, сначала выясняют возможность применения схемы скоростей типа I. Для этого отношение момента прокатки данного пропуска к номинальному моменту двигателя должно быть не больше $\lambda_{n,1}$ по рис. 36, т. е.

$$\frac{M_n}{M_n} \leq \lambda_{n,1}.$$

При этом надо принять во внимание, что допустима и перегрузка, так как не учтены большие паузы, когда валки не вращаются (начальная пауза, кантовка) и, следовательно,

$$\frac{\Sigma t_x}{\Sigma t_p + \Sigma t_0} > 1.$$

Эту допускаемую перегрузку легко использовать, если среднеквадратичный момент считать по пропускам, используя нарастающие значения итоговых сумм $\Sigma M^2 t$ и $\Sigma(t_x + t_m)$, начиная с начальной паузы.

Так, например, среднеквадратичный момент после двух пропусков будет равен

$$(M_{кв})_{1+2} = \sqrt{\frac{(\Sigma M^2 t)_1 + (\Sigma M^2 t)_2}{T_0 - t_{p1} + \tau_1 + \tau_2}}, \quad (112)$$

где $(\Sigma M^2 t)_1$ — сумма моментов за все периоды первого пропуска и т. д.;

T_0 — начальная пауза;

τ_1 и τ_2 — цикл 1-го и 2-го пропусков;

$t_{p,1}$ — период раскручивания валков в первом пропуске до захвата полосы (входит в τ_1 , и поэтому вычитается из T_0).

Пауза между 1 и 2 пропусками входит в τ_1 и τ_2 и равна $(\tau_{01} + t_{p2}) = t_{x1}$.

Формулу (112) можно выразить и через машинное время

$$(M_{кв})_{1+2} = \sqrt{\frac{(\Sigma M^2 t)_1 + (\Sigma M^2 t)_2}{T_0 + t_{m1} + t_{x1} + t_{m2}}}. \quad (112')$$

Аналогично можно проводить проверку и в последующих пропусках.

В случае $\frac{M_n}{M_n} > \lambda_{n,1}$ делают проверку по схеме III (рис. 35) и, наконец, по схеме II (рис. 30).

При значительной перегрузке двигателя, даже с учетом формулы (64"), следует пересмотреть схему калибровки, увеличив число пропусков.

Рассмотренные теоретические положения позволяют рассчитать и установить рациональные режимы работы реверсивных станов.

ГЛАВА IV

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ

В практике проектирования технологических процессов для новых станов, расчета производительности существующих станов, анализа передового опыта и рационализации работы станов пользуются теми или иными теоретическими соображениями и практическими данными и приемами.

В литературе имеется несколько теоретических методов расчета режимов работы реверсивных станов [3; 4; 5; 6; 10] и практических методов обобщения передового опыта [11; 12]. Ниже приводится анализ теоретических методов, а в главе V — анализ практических методов обобщения передового опыта.

В основе всех известных теоретических методов расчета режимов работы реверсивных станов лежит расчет машинного времени при постоянных ускорениях a и b по упрощенной схеме скоростей (типа III, рис. 13, а) и соответствующей ей формуле машинного времени

$$t_m = \frac{n_n - n_y}{a} + \frac{n_n - n_z}{b} + \frac{120N_1 - \frac{n_n^2 - n_y^2}{a} - \frac{n_n^2 - n_z^2}{b}}{2n_n}, \quad (113)$$

являющейся частным случаем формулы (26).

Отличаются между собой различные теоретические методы лишь тем, как в них задаются скоростями захвата (n_y), выхода (n_z) и максимальной скоростью (n_n) при прокатке.

Рассмотрим основные черты каждого теоретического метода в хронологическом порядке. Впервые такой метод был разработан проф. А. П. Виноградовым [3] (более ранние и приближенные методы А. Ф. Головина и М. Л. Зарошинского здесь не рассматриваются).

Метод А. П. Виноградова [3]

Для расчета машинного времени пропуска по формуле (113) А. П. Виноградов принимает:

а) скорость захвата во всех пропусках постоянной и равной $n_y = 30$ об/мин;

б) скорость выхода слитка из валков во всех пропусках постоянной и равной $n_z = 60$ об/мин;

в) угловые ускорения постоянными и равными: $a = 30$ и $b = 60$ об/мин. сек.

Максимальную скорость он вычисляет в зависимости от длины полосы по формуле

$$n_n = \sqrt{X \cdot L_1}, \quad (114)$$

где коэффициент X определяется из конечных условий при $n_{\max} = 120$ об/мин и $L_{\max} = 25$ м;

$$X = \frac{n_{\max}^2}{L_{\max}} = \frac{120^2}{25} = 576.$$

При подстановке этих данных в формулу (113) последняя становится простой и удобной для подсчета машинного времени пропуск

$$t_m = \frac{60N_1 + 45}{n_n} + \frac{n_n}{40} - 2. \quad (115)$$

Являясь наиболее простым, метод Виноградова, как и другие условно закономерные методы, имеет существенные недостатки.

Дело в том, что условно закономерные методы базируются не на реальных конкретных факторах, определяющих режим каждого пропуска (величина обжатия, условия захвата, пауза, мощность двигателя и т. д.), а исходят из какой-либо условной закономерности изменения параметров от пропуска к пропуску в зависимости лишь от его номера и без учета особенностей каждого пропуска.

Поэтому параметры, характеризующие подобный метод, не рассчитываются, а подбираются с расчетом получения средней существующей производительности.

С течением времени режимы работы и производительность станов меняются, меняются и станы, их оборудование и приводы. Производительность же, рассчитанная по условно закономерному методу, остается неизменной и все более и более заниженной в сравнении с фактической.

В самом деле, если в окончательную формулу А. П. Виноградова (115) подставим значение n_n из его же формулы (114), то получим

$$t_m = \frac{19,1 \frac{L}{D} + 45}{\sqrt{XL}} + \frac{\sqrt{XL}}{40} - 2. \quad (115')$$

По формуле (115') получается, что машинное время, а следовательно и производительность, зависят только от длины полосы. Между тем, как мы выяснили в первой части книги, на производительность влияет большое количество и других конкретных факторов, связанных с технологическим процессом и оборудованием стана. Длины могут оставаться те же, а производительность будет разной даже на одном и том же стане и в один и тот же отрезок времени (например в двух соседних сменах), но у различных операторов. Тем более она будет разной на разных станах и в разное время.

Следовательно, условность метода А. П. Виноградова заклю-

чается в том, что производительность в нем является функцией лишь одной длины полосы. В этом его основной недостаток.

А. П. Виноградов вывел свой метод не из фактических режимов работы станов, а из ориентировочных подсчетов производительности по проектным данным. Это подтверждается тем, что в качестве критерия приемлемости и точности метода он дает сопоставление результатов, полученных по его методу, с проектными данными первого советского блюминга.

В качестве другого критерия А. П. Виноградовым приводится сугубо приближенный расчет производительности блюминга, произведенный М. Л. Зарощинским («Вестник металлопромышленности», 1931, 9), где машинное время принято нереально низким, а приближение к фактической в то время производительности достигнуто за счет заведомо завышенных пауз, составляющих свыше 70% цикла прокатки. По поводу этого метода М. Л. Зарощинский впоследствии писал: «отдельные элементы времени нами брались с большими допущениями, общее же время на прокатку одной болванки получается довольно правильно»....

Таким образом исходные положения и критерии оценки правильности метода, на которые опирался А. П. Виноградов, мало убедительны и не соответствуют фактическим режимам работы современных блюмингов.

Выяснив основной недостаток метода А. П. Виноградова — его односторонность, остановимся на его технической характеристике.

Принятые ускорения $a = 30$ и $b = 60$ соответствуют среднему ускорению

$$K = \frac{2ab}{a+b} = \frac{2 \cdot 30 \cdot 60}{30+60} = 40,$$

которое является с точки зрения тройного условия (68), выведенного выше, наивыгоднейшим.

Постоянные $n_y = 30$ и $n_z = 60$ предполагают как бы постоянство обжатий и постоянство пауз во всех пропусках. Если с постоянством обжатий (по рис. 1 при $n_y = 30$, $\Delta h = 70-75$ мм) в первом приближении еще можно согласиться, то постоянство пауз является совершенно нереальным.

Расчет пауз А. П. Виноградов не приводит и рекомендует ими задаваться.

Однако по исходным данным метода эти паузы вытекают сами собой.

Так, например, пауза, необходимая для реверсирования с $n_z = 60$ до $n_y = 30$, будет

$$t_{\text{рев}} = \frac{n_z}{b} + \frac{n_y}{a} = \frac{60}{60} + \frac{30}{30} = 2 \text{ сек.}$$

Пауза, необходимая для работы нажимного устройства при среднем обжатии 70—75 мм, на основании табл. 8, составит приблизительно

$$t_{n.y} = 1,75 \div 1,8 \text{ сек.}$$

Пауза, же необходимая для возвращения слитка рольгангом к стану, при скорости выброса $n_3 = 60$ об/мин составит на основании рис. 20 или формулы (70)

$$t_{x.p} = v_3 = \sim 3 \text{ сек.}$$

Таким образом видим, что тройное условие нарушено. Пауза будет определяться рольгангом и составлять около 3 сек., причем валки после реверсирования будут в течение 1,20—1,25 сек. вращаться вхолостую со скоростью 30 об/мин, или же должны останавливаться на то же время. Естественно, что при такой работе потребуются лишние манипуляции оператора.

Совершенно очевидно, что для большинства пропусков (без кантовки) скорость выброса завышена, а в пропусках передкантовкой она может оказаться, в зависимости от длины полосы и расстояния до кантователя, или пониженной или повышенной.

Формула А. П. Виноградова (114) для расчета n_n выведена из ошибочного предположения, что длина полосы и квадрат максимальной скорости пропорциональны друг другу

$$L = v_c \cdot t_m = K_1 \cdot n_n \cdot K_4 \cdot n_n = K_5 n_n^2$$

Рассматривая длину полосы как произведение из средней скорости на машинное время и считая, что каждый множитель пропорционален максимальной скорости, он приходит к выводу, что длина пропорциональна квадрату этой скорости.

В действительности ни средняя скорость пропуска (v_c), ни машинное время пропуска (t_m) не пропорциональны максимальной скорости (n_n).

В самом деле, если машинное время пропорционально n_n , то каким образом в формуле Виноградова для машинного времени (115) максимальная скорость попала в знаменатель первого члена уравнения и как это вяжется с постоянным третьим членом?

Аналогичная ошибка имеется и в отношении средней скорости. При постоянных n_y и n_3 средняя скорость будет расти медленнее, чем n_n . Эта пропорциональность будет иметь место лишь при $n_y = n_3 = t_n = 0$ (формула 40").

С точки зрения наимыгоднейшей скоростной схемы (тип I) формула (114) дает заниженные значения n_n и тем в большей степени, чем короче полоса (40). Возможность применения этих скоростей с точки зрения использования мощности двигателя в методе Виноградова не учитывается.

Метод Г. Фокса [4]

При заданной калибровке и ускорениях $a = 20$ и $b = 40$ об/мин.сек. Г. Фокс принимает все скорости (n_y , n_3 и n_n) равномерно возрастающими от первого пропуска к последнему в следующих пределах:

$$\begin{aligned} n_y &= 15 \div 50 \text{ об/мин} \\ n_3 &= 25 \div 80 \text{ } \\ n_n &= 30 \div 100 \text{ } \end{aligned}$$

Так же без всякого расчета принимаются паузы:

$$\begin{aligned} \text{Без кантовки} & \dots \dots \dots t_x = 2,75 \text{ сек.} \\ \text{При кантовке} & \dots \dots \dots t_{xk} = 4 \text{ сек.} \\ \text{Начальная} & \dots \dots \dots T_o = 10 \text{ сек.} \end{aligned}$$

Метод является чисто условным, так как скорости назначаются совершенно произвольно в арифметической прогрессии от первого пропуска к последнему независимо от конкретных условий прокатки и особенностей пропуска и даже без учета длины полосы (как в методе Виноградова), что при прокатке коротких полос может привести даже к фиктивным значениям n_n .

Методом как бы предусматривается постепенное уменьшение обжатий и увеличение пауз от пропуска к пропуску по ходу прокатки. В действительности обжатия и паузы к концу прокатки могут и убывать и возрастать в зависимости от калибровки, не подчиняясь произвольно принятой закономерности.

Паузы, определяемые реверсированием валков в первых пропусках, по Фоксу составляют

$$t_{pes} = \frac{n_{y1}}{b} + \frac{n_{y2}}{a} = \frac{25}{40} + \frac{15}{20} = 1,375 \text{ сек.}$$

и являются заниженными, так как не обеспечивают времени работы нажимного устройства при обжатиях свыше 70 мм и не соответствуют принимаемым Фоксом паузам (2—4 сек.). Следовательно, n_y и n_3 в первых пропусках занижены.

Паузы, определяемые реверсированием валков, в последних пропусках должны быть

$$t_{pes} = \frac{n_{3k}}{b} = \frac{n_{yk}}{a} = \frac{80}{40} + \frac{50}{20} = 4,5 \text{ сек.,}$$

т. е., наоборот, завышены (если нет кантовки) без всяких оснований и в ущерб производительности и также не соответствуют паузам, которыми он задается. Следовательно, значения n_y и n_3 в последних пропусках завышены, а паузы, которыми он задается, фиктивны, так как они оказываются меньше времени, потребного для реверсирования валков.

Произвольный выбор скоростей, неувязка пауз и машинного времени, скоростей и обжатий, отсутствие учета мощности двигателя и пр. делают метод Фокса непригодным для реальных расчетов режимов прокатки.

В одной из работ [1] было показано на конкретном примере к каким ошибкам приводит пользование методом Фокса. При определенных условиях получается фиктивность пауз и иногда фиктивность захвата и максимальных скоростей.

Метод М. Л. Зарощинского [5; 7]

При расчете машинного времени по формуле (113) М. Л. Зарощинский принимает скорость при входе и выходе слитка в каждом

данном пропуске равными друг другу и возрастающими от первого пропуска к последнему в следующих пределах:

$$n_y = n_z = 10 \div 30 \text{ об/мин.}$$

Столь заниженные значения n_y и n_z объясняются им боязнью ударов при захвате и далекого выброса слитка при выходе, а также тем, что на практике в большинстве случаев прокатку ведут с таким режимом скоростей.

Далее скорости $n_y = n_z$ им связываются с максимальной скоростью n_n соотношением

$$\frac{n_n}{n_y} = 2,5 \text{ при } n_n \leq 50 \text{ об/мин}$$

и

$$\frac{n_n}{n_y} = 3,0 \text{ при } n_n = 60 \div 90 \text{ об/мин.}$$

При $n_n > 90$ об/мин $n_y = n_z = 30$ об/мин.

Получается несколько ступеней скорости в соответствии с точками регулировки электропривода:

При $n_n = 25$ об/мин	...	$n_y = n_z = 10$ об/мин
» $n_n = 37,5$ »	...	» $n_y = n_z = 15$ »
» $n_n = 50$ »	...	» $n_y = n_z = 20$ »
» $n_n = 60$ »	...	» $n_y = n_z = 20$ »
» $n_n = 75$ »	...	» $n_y = n_z = 25$ »
» $n_n = 90$ »	...	» $n_y = n_z = 30$ »

В зависимости от длины полосы переход к каждой следующей ступени скоростей М. Л. Зарощинским рекомендуется производить при условии, чтобы период прокатки с постоянной скоростью был не менее 0,5 сек. ($t_n \geq 0,5$ сек.).

Тогда при $a = 20$ и $b = 40$ об/мин.сек. конечная формула для расчета машинного времени:

$$\text{при } \frac{n_n}{n_y} = 2,5$$

$$t_m = \frac{7,6}{n_y} \frac{L}{D} + 0,033 n_y; \quad (116)$$

$$\text{при } \frac{n_n}{n_y} = 3$$

$$t_m = \frac{6,33}{n_y} \frac{L}{D} + 0,049 n_y. \quad (116')$$

Учитывая, что n_n , а следовательно, и связанное с ним n_y берутся только в зависимости от длины полосы, получаем чисто условный метод, скоростной режим при котором не зависит ни от калибровки, ни от пауз, ни от мощности двигателя.

Будут ли кататься бломсы или слябы, мягкие или твердые стали, при низких или высоких температурах, с кантовками после каждого пропуска или совсем без кантовок; при равных длинах в пропуске по этому методу будут всегда одинаковые режимы скоростей и машинные времена. В действительности режимы прокатки в этих случаях, конечно, не могут быть одинаковыми.

Следовательно, метод М. Л. Зарощинского принципиально вследствие своей условности и абстрактности не может дать рациональных режимов или служить средством анализа методов работы передовых прокатчиков.

Рассмотрим отдельные положения этого метода.

Связывание n_y и n_n постоянным отношением (2,5 и 3) является искусственным, принятым ради упрощения расчета, лишает метод необходимой универсальности и подчеркивает условность метода. В практике это отношение меняется от единицы (при $n_y = n_n = n_z$) до бесконечности (при $n_y = 0$). Причем работа от нуля ($n_y = 0$) широко распространена среди операторов.

Изменение операторами отношения n_n/n_y в столь широких пределах позволяет им применять наиболее рациональные режимы скоростей для каждого конкретного случая прокатки.

Связывание постоянным отношением n_y и n_n , по сути, делает n_y функцией n_n , являющегося в свою очередь функцией длины.

В действительности же n_y ни в коей мере не является ни функцией максимальной скорости, ни функцией длины полосы. Выше было доказано, что n_y и n_z являются функцией паузы и, наоборот, максимальная скорость является функцией n_y , n_z и мощности двигателя.

Таким образом принятые постоянные отношения между n_y и n_n не обоснованы и принципиально неверны.

Чрезмерно заниженные скорости входа и выхода слитка в первых пропусках не обоснованы, они увеличивают машинное время, не увязаны с принимаемыми паузами и снижают производительность. В самом деле, при $n_y = n_z = 10$ об/мин в первых пропусках пауза, необходимая для реверсирования валков, составит

$$t_{\text{рес}} = \frac{n_z}{b} + \frac{n_y}{a} = \frac{10}{40} + \frac{10}{20} = 0,75 \text{ сек.}$$

За это время нажимное устройство может опустить верхний валик стана всего на 10—15 мм. Для того, чтобы дать полное обжатие 60—80 мм, оператор должен остановить валки и потом снова включить их. Это требует лишние движения и затрату времени у оператора.

Если слиток выдать при $n_z = 10$ об/мин на вращающийся навстречу рольганг, то он вернет полосу к валкам через 0,15 сек. (рис. 20), т. е. раньше, чем сработает нажимное устройство. Следовательно, от оператора потребуются дополнительные манипуляции и время для управления рольгангом. Тройное условие здесь полностью нарушено и высокопроизводительной работы быть не может.

В действительности же, как показывают исследования (рис. 1), скорость захвата в первых пропусках, даже на гладкой бочке, вполне может быть увеличена до 30 об/мин и более (в зависимости от обжатия и рабочего диаметра валков). Тем более может быть увеличена скорость выброса слитка. Все это облегчит работу оператора, уменьшит машинное время, не увеличивая па-

узы по работе нажимного устройства, предупредит преждевременную задачу слитка в валки до конца их перестановки и, следовательно, повысит производительность.

В практике часто задачу в первый и третий пропуск, когда слиток еще имеет конусность, производят даже при 50 об/мин и выше.

Особенно невыгодны малые скорости выброса перед кантовкой, так как при этом увеличивается не только машинное время, но и пауза. М. Л. Зарошинский и здесь не делает исключения.

Необходимость равенства n_y и n_z в одном и том же пропуске ничем не обоснована. Наоборот, выше была доказана выгода равенства скорости выброса из предыдущего пропуска скорости захвата в последующем. А это обычно вызывает нарушения равенства n_y и n_z для одного и того же пропуска.

В последних пропусках пауза, необходимая на реверсирование при рекомендуемых М. Л. Зарошинским скоростях $n_y = n_z = 30$ об/мин, составит

$$t_{рев} = \frac{30}{40} + \frac{30}{20} = 2,25 \text{ сек.}$$

Фактически в конце прокатки в зависимости от обжатия пауза очень часто не превышает $1,4 \div 1,6$ сек., и метод в этих случаях дает излишне завышенные паузы (2,25 сек.).

Неувязка режима скоростей с паузами является одним из самых существенных недостатков метода и вытекает из недооценки автором метода этой важной связи. Последнее следует из следующего выражения М. Л. Зарошинского [5, стр. 36] [7, стр. 40]: «Промежуток времени, когда в валках нет слитка и число оборотов возрастает от 0 до n_y нас при расчете не интересует».

Выше было подробно показано, что этот промежуток должен интересовать в первую очередь и именно с него и надо начинать расчет рационального режима прокатки.

В результате М. Л. Зарошинский задается такими паузами, которые позволяют повысить скорости n_y и n_z , и такими скоростями, которые позволяют снизить паузы, но он этим не воспользовался.

Этим и объясняется, почему его метод дает значительно большие значения продолжительности прокатки в сравнении с фактическими на современных блюмингах (в примерах М. Л. Зарошинского при 17 пропусках $103 \div 108,5$ сек., фактически по ряду блюмингов около 80 сек.).

М. Л. Зарошинский учитывает мощность двигателя при выборе обжатий (по максимальному моменту), но не учитывает ее при выборе максимальных скоростей, так как обжатия он выбирает уже при рассчитанном режиме скоростей [7, стр. 124]. Получается, что обжатия являются функцией режима скоростей, а не наоборот, что нужно сперва рассчитать режим скоростей, а потом уже калибровку.

Выбор обжатий при заданном режиме скоростей снижает обжатия при $n_n > n_k$ и тем самым увеличивает число пропусков.

Очевидно этим и объясняется, что в примерах прокатки на блюминге у М. Л. Зарошинского нигде нет числа пропусков ниже 17 (даже в книге 1948 г.), тогда как фактически прокатка на блюмингах ведется в 13 и даже 11 пропусков.

Конечно, выбор режима скоростей по мощности двигателя уже при выбранных обжатиях в свою очередь может снизить максимальные скорости в ряде пропусков (при $n_m > n_k$ и больших обжатиях), но это вполне естественно и никоим образом не может служить основанием для необоснованного увеличения числа пропусков.

Основанием для увеличения числа пропусков может служить только непрохождение двигателя по нагреву, этот фактор М. Л. Зарошинский вовсе не учитывает.

Выбор обжатий по максимальному моменту при интенсивной прокатке очень часто приводит к перегреву двигателя.

Продланное выше исследование (рис. 25, 30, 35 и 36) показывает, в какой степени допускаемый момент прокатки из условий нагрева может быть ниже допускаемого из условий перегрузочной способности двигателя.

Метод А. А. Александрова [6; 9]

А. А. Александров, критикуя методы А. П. Виноградова и М. Л. Зарошинского в связи с тем, что принимаемые ими допущения не характеризуют действительного процесса прокатки и считая, что расчетные данные Фокса [9, табл. 41 и 42] являются безупречными, предлагает свой метод, являющийся комбинацией условных методов А. П. Виноградова, М. Л. Зарошинского и Фокса с тенденцией приблизить результаты к данным Фокса.

В результате получился обобщенный условный метод с обобщенными недостатками.

Метод А. А. Александрова характеризуется следующими исходными положениями.

Числа оборотов при захвате полосы принимаются по Фоксу и по аналогии с М. Л. Зарошинским выражаются через максимальную скорость отношением

$$n_y = 0,4 n_n \text{ (т. е. } n_n/n_y = 2,5\text{)}.$$

Соотношение между n_y и n_z принимается также по Фоксу

$$n_z = 2n_y.$$

Расчет максимальной скорости производится по формуле А. П. Виноградова (114), но с заниженным коэффициентом — X (484 вместо 576), повидимому для того, чтобы приблизиться к данным Фокса [9, табл. 41 и 59].

Конечная расчетная формула при $a = 20$ и $b = 40$ об/мин. сек. имеет вид

$$t_{\mu} = \frac{19,1}{n_n} \cdot \frac{L}{D} + 0,01 n_n. \quad (117)$$

Но так как $n_n = \sqrt{XL}$, то формула для расчета t_m А. А. Александрова ничем не отличается от формул А. П. Виноградова и М. Л. Зарощинского и столь же условна, так как машинное время определяется только в функции длины полосы и не зависит от конкретных условий прокатки (обжатий, пауз, мощности двигателя и т. п.).

Сравним эту формулу количественно с формулой М. Л. Зарощинского (116) при $n_n/n_y = 2,5$, подставив вместо n_y его значение через n_n ,

$$t_m = \frac{7,6 \cdot 2,5}{n_n} \cdot \frac{L}{D} + \frac{0,033}{2,5} n_n = \frac{19}{n_n} \cdot \frac{L}{D} + 0,0132 n_n.$$

Разница получается лишь во втором члене на величину 0,0032, т. е. по Александрову машинное время меньше на 0,32% второго члена. При изменении n_n от 25 до 50 машинное время получается меньше на $0,0032 (25 \div 50) = 0,08 \div 0,16$ сек. Так как соотношение между n_n и n_y у М. Л. Зарощинского и А. А. Александрова до $n_n = 50$ одинаково, то разница в машинном времени получается за счет большей скорости выхода по А. А. Александрову.

При $n_n > 50$ об/мин эта разница возрастает, так как у М. Л. Зарощинского увеличивается отношение n_n/n_y до 3, а у А. А. Александрова оно остается неизменным и даже снижается до 2.

Меньшее машинное время, чем у М. Л. Зарощинского, А. А. Александров и считает достоинством своего метода, ошибочно полагая, что наибольшая производительность имеет место при минимальном машинном времени.

Меньшее машинное время в последних пропусках получается за счет высоких скоростей, которые достигают:

$$n_n = 110; n_y = 50; n_z = 100 \text{ [9, табл. 61].}$$

В результате высоких значений n_y и n_z паузы достигают величин значительно больших, чем это необходимо для работы нажимного устройства. Так, например, в расчетах для полосы длиной 15,37 м при $D_p = 889$ мм [9, табл. 61] А. А. Александров получает $n_y = 35$; $n_n = 85$; $n_z = 70$ об/мин и $t_m = 4,64$ сек.

Пауза, необходимая для реверсирования валков, в этом случае будет

$$t_{\text{пер}} = \frac{n_z}{b} + \frac{n_y}{a} = \frac{70}{40} + \frac{35}{20} = 3,5 \text{ сек.,}$$

т. е. для пропуска без кантовки чрезмерно завышена.

Цикл вращения валков составит

$$\tau = t_m + t_x = 4,64 + 3,5 = 8,14 \text{ сек.}$$

При обжатиях 80—90 мм пауза, необходимая для работы нажимного устройства, должна быть не более 2 сек.

Если принять паузу $t_x = 2$ сек. (как принимает ее и сам А. А. Александров, не учитывая, что она получается у него фиктивной),

то при $a = 20$ и $b = 40$ n_y и n_z должны быть на основании (64)¹

$$n_y = n_z = K \cdot \frac{t_x}{2} = \frac{2 \cdot 20 \cdot 40}{20 + 40} \cdot \frac{2}{2} = 27 \text{ об/мин.}$$

Тогда при тех же $L = 15,37$ м, $D_p = 889$ и $n_n = 85$ получим по общей формуле (113) $t_m = 5,39$ сек., т. е. на 0,75 сек. больше чем у А. А. Александрова, а цикл вращения $\tau = t_m + t_x = 5,39 + 2 = 7,39$ сек., т. е. на 0,75 сек. меньше чем у А. А. Александрова.

Таким образом, вследствие завышенных n_y и n_z , время пропуска у А. А. Александрова увеличивается на 0,75 сек. Фактически же паузы бывают и меньше 2 сек.

Наоборот, в первых пропусках n_y и n_z у А. А. Александрова занижены. В самом деле, в его примере при $L = 2,26$ м и $D_p = 1016$ мм $n_y = 10$; $n_n = 30$; $n_z = 20$ об/мин и $t_m = 1,8$ сек.

При обжатии не более 75 мм по табл. 8 паузу можно принять $t_x = 1,8$ сек.

Тогда цикл пропуска по А. А. Александрову составит

$$\tau = t_m + t_x = 1,8 + 1,8 = 3,6 \text{ сек.}$$

Наивыгоднейшие n_y и n_z на основании формулы (64) получатся

$$n_y = n_z = K \cdot \frac{t_x}{2} = 26,6 \cdot \frac{1,8}{2} = 24 \text{ об/мин.}$$

По формуле (113) при тех же остальных параметрах получим:

$$t_m = 1,47 \text{ сек. и } \tau = t_m + t_x = 1,47 + 1,8 = 3,27 \text{ сек.}$$

Если к тому же принять наивыгоднейшее n_n , то по формуле (40) получим $n_n = n_m = 41,5$ об/мин и

$$\tau = \frac{2n_m}{K} = \frac{2 \cdot 41}{26,6} = 3,12 \text{ сек.,}$$

т. е. в обоих случаях цикл вращения получается меньше цикла вращения по А. А. Александрову.

Следовательно, по методу А. А. Александрова получается потеря во времени как в первых, так и в последних пропусках.

Кроме того, высокие скорости захвата в последних пропусках вообще фиктивны. В самом деле, при современных интенсивных обжатиях, когда последние в конце прокатки доходят до $90 \div 100$ и более мм, захват при 50 об/мин невозможен.

С другой стороны, ограничение максимальной скорости при $n_n < n_n$ и скорости выброса перед кантовкой совершенно нецелесообразно.

Что касается максимальных скоростей при $n_n > n_n$, которые у А. А. Александрова доходят до 110 об/мин, то при интенсивных обжатиях они также окажутся фиктивными. Такие скорости возможны лишь при очень малых обжатиях или при приводах большой мощности.

¹ Так как рассматривается один пропуск, то условно принимается $n_y = n_z$ для одного и того же пропуска.

Таким образом метод А. А. Александрова, в котором не учитываются важнейшие факторы, не может быть использован при практических расчетах и тем более при анализе передового опыта прокатчиков.

Метод Н. А. Тищенко [10]

Н. А. Тищенко правильно отмечает [10], что в режимах работы реверсивных станов преобладает чистый эмпиризм, практика работы лучших операторов не обобщается и не направляется. Н. А. Тищенко ставит задачу определения оптимального графика работы главного привода, рабочих рольгангов и нажимного устройства.

Несмотря на правильно поставленные цели и безупречные математические выводы, Н. А. Тищенко не смог получить оптимальных режимов работы реверсивных станов. Это объясняется тем, что им не учитывается взаимосвязь пауз и машинного времени.

Проанализируем его основные положения, относящиеся к режиму работы главного привода.

При составлении оптимального графика работы реверсивного стана для первых и средних пропусков Н. А. Тищенко рекомендует исходить из следующего:

а) максимальная скорость должна быть равна основной скорости двигателя и не превосходить ее;

б) входная и выходная скорости, равные между собой, выраженные в метрах в секунду, должны быть равны времени работы нажимного устройства, выраженному в секундах;

в) целесообразно уменьшить значение входной и выходной скорости слитка, если этому соответствует время работы нажимного устройства; время работы нажимного устройства должно быть максимально сокращено;

г) рабочая скорость рольгангов на первых и средних проходах должна быть не ниже входной скорости;

д) главный привод должен иметь предельно большую величину ускорения от входной до основной скорости и замедления от основной до выходной скорости. Время реверса главного привода в пределах от оптимальной выходной до входной скорости должно быть меньше времени работы нажимного устройства.

Что касается первого положения (а), то надо отметить, что при коротких полосах и малых паузах, когда по формуле (32) получается $n_m < n_n$, прокатку при $n_n = n_n$ вести нецелесообразно, так как это снижает производительность.

Если $n_m > n_n$ и при этом обжатие ограничивается мощностью двигателя, тогда целесообразно принять $n_n = n_n$.

По условиям захвата и калибровки не во всех пропусках имеет место предельное использование мощности двигателя; тогда целесообразно принять $n_m > n_n$.

При современном усовершенствованном мощном приводе блюминга (9000—10 000 л. с.) имеется возможность работать полностью

по скоростной схеме типа I и при $n_m > n_n$. В этом случае будет достигнута максимально возможная производительность.

Во втором положении (б) Н. А. Тищенко имеет в виду равенство $n_y = n_z$ для одного и того же пропуска и только при работе с большими углами захвата.

Выше было показано, что соотношение между скоростью выхода слитка в предыдущем пропуске (n_z) и скоростью входа в последующем (n_y) определяется равенством (75), откуда

$$\psi = \frac{n'_y}{n_z} = \frac{K}{2C} \left(\frac{a}{b} + 1 \right) - \frac{a}{b}$$

или, подставляя $C = \frac{19,1}{D_p}$,

$$\psi = \frac{KD_p}{38,2} \left(\frac{a}{b} + 1 \right) - \frac{a}{b}.$$

Следовательно, наивыгоднейшее соотношение n'_y/n_z на основании тройного условия зависит от ускорений и диаметра рабочих валков стана (рис. 21) и $n_y = n_z$ не может быть принято как правило для одного и того же пропуска.

Что касается возможности захвата при $v_y > v_p$, то график на рис. 1 получен при скоростях рольганга, меньших скорости захвата.

Условия захвата заставляют делать отступление от равенства (75) в сторону уменьшения n_y , если угол захвата превышает предельный для данной скорости (рис. 1).

Правильно определяя наивыгоднейшую скорость входа и выхода из минимума суммы машинного времени и паузы пропуска, Н. А. Тищенко делает неправильный анализ результата после нахождения минимума.

Так, принимая заранее (перед выводом) $v_n = v_n$; $v_y = v_z$ и $t_x = v_z$, он находит, что $(t_n + t_x)_{\min}$ будет при

$$v_z = v_n \left(1 - \frac{cd}{c+d} \right) = v_n \left(1 - \frac{K}{2} \right), \quad (118)$$

где c и d соответственно линейные ускорение и замедление, м/сек² (при выводе принято $\mu g = 2$).

Считая, что v_z по этому выражению представляет какую-то конечную положительную величину, он и рекомендует эту скорость $v_z = v_y$ как оптимальную при прокатке на реверсивных станах. При этом оговаривает, что эти оптимальные скорости могут приниматься только в том случае, если будет удовлетворено условие $v_z \geq t_{n.y}$.

Посмотрим какое же значение здесь имеет эта оптимальная скорость при паузе рольганга, принятой Тищенко при выводе формулы, равной $t_x = v_z$ и при ускорении $\mu g = 2$.

Связь между паузой и скоростями v_y и v_z выражается на основании формул (55) и (70):

$$\frac{v_z}{d} + \frac{v_y}{c} = t_x = v_z;$$

при $v_z = v_y$ получим

$$\frac{v_z}{d} + \frac{v_z}{c} = v_z \text{ или } \frac{2v_z}{K} = v_z,$$

откуда очевидно, что при $v_z = v_y$ неизбежно $K = 2$.

Тогда, возвращаясь к формуле (118) и подставляя $K = 2$, получим, что

$$v_z = v_y = v_n \left(1 - \frac{2}{2}\right) = 0,$$

т. е. никакой оптимальной скорости выхода и входа не получилось, а получилось, что чем меньше v_z и v_y , а следовательно и пауза, тем выгоднее.

Выше, в гл. II, было доказано, что минимальный цикл пропуска получается при $t_x = n_x = 0$ (т. е. при $v_z = v_y = 0$), и поэтому скорости входа и выхода слитка из валков нужно рассчитывать по минимально необходимой паузе, руководствуясь тройным условием. Для случая $v_z = v_y$ (или $n_z = n_y$) выведена формула (59).

Если же $K \neq 2$, то, следовательно, и $v_z \neq v_y$ и формула (118), выведенная Н. А. Тищенко, не имеет силы по исходным условиям.

Случай, когда $v_z \neq v_y$, также рассмотрен в гл. II (формула 75 и рис. 21).

Таким образом вопрос оптимального графика работы для первых и средних проходов Н. А. Тищенко не разрешил.

Рассмотрим выводы Н. А. Тищенко относительно оптимального графика работы при $n_m > n_n^1$:

а) Входная и выходная скорости могут быть не равны между собой. Величина выходной скорости должна быть возможно меньше, но не меньше времени работы нажимного устройства ($v_z \leq t_{n,y}$).

Величина входной скорости должна быть максимально допустимой по технологическому процессу прокатки.

б) Так как величина входной скорости, допустимая по технологическим условиям, велика, а величина ускорения и замедления главного привода практически ограничена, достижение наиболее выгодной максимальной величины входной скорости неосуществимо (?!).

К этим выводам Н. А. Тищенко приходит также после определения минимума суммы $(t_m + t_x)$ в частных производных: вначале по входной скорости, а затем по выходной, принимая $v_m = \text{const}$ и $v_z \neq v_y$.

¹ Приводится только часть наиболее оригинальных выводов Н. А. Тищенко.

Приведем эти частные производные:

$$\frac{\partial (t_m + t_x)}{\partial v_y} = -\frac{1}{c} + \frac{v_y}{cv_m} = 0,$$

$$\frac{\partial (t_m + t_x)}{\partial v_z} = -\frac{1}{d} + \frac{v_y}{dv_m} + \frac{2}{\mu g} = 0,$$

откуда он получает

$$v_y = v_m, \quad (119)$$

$$v_z = v_m \left(1 - \frac{2d}{\mu g}\right). \quad (120)$$

Оговаривая, что выражение для величины v_z не имеет смысла при $d > 1 \text{ м/сек}^2$ и так как последняя не бывает обычно меньше 1 м/сек^2 , Н. А. Тищенко приходит к заключению, что наиболее выгодной будет $v_z = 0$ (при $d = 1$ и $\mu g = 2$).

Но так как для работы нажимного устройства необходимо некоторое время, то он рекомендует принимать в этом случае v_z численно равным времени работы нажимного устройства, т. е. $v_z = t_{n,y}$. Правильно согласовывая таким образом $t_{n,y}$ и $t_{x,p}$, Н. А. Тищенко ошибочно исходит из положения, что пауза состоит только из времени остановки валков со скорости v_z до нуля, т. е. из соотношения (при $d = 1$ и $\mu g = 2$):

$$t_x = \frac{v_z}{d} = \frac{v_z}{1} = v_z.$$

Но это соотношение справедливо лишь тогда, когда в паузу не входит период раскручивания $t_p = \frac{v_y}{c}$, т. е. когда на основании равенства (55) скорость входа $v_y = 0$.

Таким образом и в этом случае минимальное время цикла пропуска получается при $v_z = v_y = 0$, т. е., когда пауза равна нулю. Получился тот же самый вывод, что и в случае для первых пропусков.

Но поскольку у Н. А. Тищенко $v_y \neq 0$, а по формуле (119) получилось $v_y = v_m$, то в паузу войдет составляющая раскручивания

$$t_p = \frac{v_y}{c} = \frac{v_m}{c},$$

которая будет больше чем

$$t_0 = \frac{v_z}{d} = t_{n,y},$$

т. е. больше паузы нажимного устройства. Зачем же еще принимать $v_z = t_{n,y}$? Ведь суммарная пауза тогда превзойдет необходимую более чем в 2 раза:

$$t_x = \frac{v_z}{d} + \frac{v_m}{c} = t_{n,y} + \frac{v_m}{c} > 2t_{n,y}.$$

Так как $v_m > v_z$, а $c < d$, то получится огромная пауза и ни о каком оптимальном графике не может быть и речи.

Ошибка Н. А. Тищенко в том, что он не учитывает времени

$$t_p = \frac{v_y}{c},$$

которое входит в паузу так же, как и

$$t_0 = \frac{v_z}{d},$$

считая, что t_p данного пропуска относится к предыдущей паузе. Но тогда логика подсказывает, что нужно учитывать t_p последующего пропуска, иначе где же будет учитываться время раскручивания валков от нуля до скорости захвата?

Первоначальный метод автора [1; 2]

Первоначальный метод автора, разработанный в 1938 г. и впервые опубликованный в 1944 г., относился только к расчету наивыгоднейшего режима скоростей при заданной калибровке и заведомо достаточной мощности двигателя, о чем и делалась оговорка.

В настоящей работе дается более широкое освещение метода автора, и режим скоростей выбирается уже с учетом режима обжатий и динамического режима.

Сделаны более общие выводы и для режима скоростей (учет переменных ускорений, прокатка в непрерывно-связанных клетях и т. п.).

ГЛАВА V

ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБОБЩЕНИЯ ПЕРЕДОВОГО ОПЫТА

Метод КМК

Работники передового советского блюминга КМК поставили перед собой задачу изучить приемы работы передовых прокатчиков, выяснить в чем именно заключаются их наиболее рациональные методы работы и на этой основе создать и внедрить обобщенный передовой метод работы, чтобы еще более повысить производительность блюминга.

Для этого на заводе были проведены большие исследования работы нескольких операторов стана на нескольких профилях и слитках из кипящей и спокойной стали с осциллографированием режима работы электропривода [11; 12].

Тщательно изучив методы работы отдельных операторов и сделав правильно некоторые общие выводы, авторы, пренебрегая теоретическими расчетами, слишком упрощенно и потому ошибочно подошли к разработке улучшенного, обобщенного режима работы.

Неправильно применив метод обобщения, они сочли, что улучшенный цикл прокатки является простой механической суммой лучших элементов времени различных операторов.

Они не учли, что в реверсивных станах отдельные элементы времени неразрывно связаны друг с другом, зависят друг от друга и изменение одного из них неизбежно вызывает изменение другого.

Поэтому, выбирая те или иные лучшие элементы, но полученные разными операторами, необходимо проанализировать возможно ли их соединение без всяких изменений.

В своем методе построения лучшего режима прокатки авторы складывают минимальное машинное время одних операторов с минимальными паузами других операторов. Для характеристики метода КМК приведем одну из таблиц авторов метода [11, табл. 3] или [12, стр. 119], где на основании данных работы пяти операторов получен улучшенный режим (табл. 9).

Здесь, по отдельности пауза и машинное время каждого пропуска улучшенного режима взяты минимальными из 5 значений, принадлежащих различным операторам, причем в каждом пропуске получилось, что машинное время и пауза принадлежат различным операторам, кроме 2-го пропуска, где у оператора Меркулова

Таблица 9

Прокатка прямоугольного слитка спокойной стали в заготовку 320×330 за 13 пропусков

№ пропуска	О п е р а т о р ы										Улучшен- ный режим	
	Зварыкин		Меркулов		Бизунов		Попов		Лозбин			
	t_m	t_x	t_m	t_x	t_m	t_x	t_m	t_x	t_m	t_x	t_m	t_x
0		6,40		6,30		6,65		6,95		6,90		6,30
1	1,60	1,62	1,38	1,53	1,71	1,66	1,34	1,65	1,62	1,53	1,34	1,53
2	1,32	3,87	1,18	3,85	1,38	3,21	1,23	3,81	1,20	3,96	1,18	3,21
3	2,15	1,50	1,74	1,53	2,00	1,44	1,70	1,85	2,06	1,50	1,70	1,44
4	1,61	1,52	1,31	1,48	1,55	1,48	1,44	1,50	1,45	1,43	1,31	1,43
5	1,90	2,00	1,46	1,87	1,57	2,07	1,68	2,20	1,64	2,10	1,46	1,87
6	1,90	3,54	1,91	3,34	1,70	3,26	2,05	3,42	1,96	3,68	1,76	3,26
7	2,06	1,82	1,60	1,93	1,84	1,76	2,04	2,19	1,90	1,76	1,60	1,76
8	2,24	1,47	1,99	1,59	2,24	1,36	2,45	1,41	2,25	1,41	1,99	1,36
9	2,22	2,00	1,91	2,03	2,12	1,98	2,14	2,20	2,37	2,14	1,91	1,98
10	2,40	4,13	2,07	3,49	2,25	3,38	2,40	3,65	2,34	3,70	2,07	3,38
11	3,50	2,65	2,87	2,33	3,15	2,20	3,07	2,70	3,13	2,77	2,87	2,20
12	3,35	3,40	2,43	2,70	3,34	2,22	3,70	2,74	3,36	2,75	2,43	2,22
13	4,51		4,65		4,50		4,36		4,47		4,36	
30,76		35,92	26,50	33,97	29,35	32,67	29,60	36,27	29,75	35,63	25,98	31,94
66,68		60,47		62,02		65,87		65,38		57,92		

и пауза и машинное время оказались меньше, чем у остальных операторов.

В результате получился цикл прокатки 57,92 сек.—на 2,55 сек. меньше лучшего результата оператора Меркулова. Последний имеет минимальную сумму машинного времени 26,5 сек., поэтому при разработке обобщенного метода у него заимствовано машинное время 9 пропусков из 13.

Наименьшая же сумма пауз получилась у оператора Бизунова (32, 67 сек.), поэтому у него заимствовано для обобщенного метода 9 пауз из 13.

Конечно производить обобщение таким образом нельзя. Ранее было доказано, что получение минимального машинного времени приводит к увеличению пауз, а минимальные паузы, наоборот, увеличивают машинное время.

Поэтому, если один оператор получает меньшее машинное время, а другой меньшие паузы, то механически сложить машинное время первого с паузами второго нельзя. Для правильного обобщения нужно путем тщательного анализа и расчетов найти наиболее выгоднейшее соотношение между паузой и машинным временем для каждого пропуска.

Этого, к сожалению, на КМК не было сделано.

Посмотрим насколько ошибочен такой метод на примере 12 пропуска «улучшенного» режима КМК, где принято машинное время Меркулова 2,43 сек. (на 0,9 сек., меньше, чем у остальных операторов), а пауза перед пропуском взята у Бизунова — 2,2 сек. (меньше чем у Меркулова на 0,13 сек.). При этом надо иметь в виду, что машинное время связано не только с предыдущей, но и с последующей паузой. Последующая пауза 2,22 сек. взята опять-таки у Бизунова и она меньше, чем у Меркулова на 0,48 сек.

Принимая, по калибровочным данным, длину полосы в 12 пропуске 7,25 м, найдем среднюю скорость прокатки для получения $t_m = 2,43$ сек.

$$n_n = \frac{L \cdot 60}{\pi D t_m} = \frac{7,25 \cdot 60}{3,14 \cdot 0,95 \cdot 2,43} = 60 \text{ об/мин,}$$

хотя авторы [11; 12] указали, что при исследовании скорость не превышала 50 об/мин.

Для того, чтобы разогнать валки до $n_n = 60$ об/мин и затем остановить их, потребуется пауза (при $a = 35$, $b = 45$)

$$t_x = \frac{n_n}{b} + \frac{n_n}{a} = \frac{60}{45} + \frac{60}{35} = 3,05 \text{ сек.}$$

Между тем в улучшенном методе и предыдущая и последующая паузы гораздо меньше. Принимая во внимание, что машинное время 11 и 13 пропуска взято тоже минимальное, рассчитывать, что в них происходит прокатка без паузы, — нельзя.

Аналогичная, упрощенная методика обобщения передового опыта была использована и на НТМЗ. Однако дополнительные исследования в содружестве с УПИ им. Кирова позволили установить более рациональные режимы, чем по методу КМК.

Эти дополнительные исследования были посвящены изучению условий захвата, пауз, ускорений и нагрузки двигателя с целью получения надежных величин для расчета.

При прокатке на блюминге профиля 210 × 300 в 17 пропусков обжатия во всех пропусках практически одинаковы (кроме обжатий после кантовки), и минимально необходимая пауза, определяемая работой нажимного устройства, определилась в 1,2 сек.

После кантовки обжатия достигают больших величин, но время работы нажимного устройства перекрывается временем кантовки.

Поэтому паузы на кантовку брались по хронометражным данным, а остальные принимались 1,2 сек.

Изучение осциллограмм главного привода блюминга позволило установить его ускорения, которые имеют две ступени, разные при установке контроллера до n_n и выше n_n . Средние значения этих ускорений приведены ниже

	a_p	a_y	b_z	b_0
при $n_m \leq n_n$	30	20	20	30
при $n_m > n_n$	40	20	40	40

где a_p и b_0 — ускорения на холостом ходу;

a_y и b_z — ускорения при нагрузке в об/мин. сек.

Основная скорость $n_n = 50$ об/мин.

Определение моментов и расхода энергии в пропусках по осциллограммам позволило уточнить методику теоретического расчета этих величин.

Эти данные позволили на основании формулы (59) установить, что при прокатке со скоростями, не превышающими основную, при паузах без кантовки $t_x = 1,2$ сек. наивыгоднейшее число оборотов выброса из предыдущего пропуска и задачи в последующий должно быть

$$n_z = n'_y = 0,5 K t_x = \frac{2 \cdot 30 \cdot 30}{2(30 + 30)} \cdot 1,2 = 18 \text{ об/мин.}$$

При больших значениях n_y и n_z пауза увеличится, что нецелесообразно, несмотря на уменьшение машинного времени.

При меньших значениях n_y и n_z пауза не уменьшится, так как она определяется временем работы нажимного устройства, машинное время при этом увеличится, что также нецелесообразно.

В последних пропусках, когда $n_m > n_n$, наивыгоднейшее значение n_y и n_z составляет

$$n_z = n'_y = 0,5 K t_x = \frac{2 \cdot 40 \cdot 40}{2 \cdot (40 + 40)} \cdot 1,2 = 24 \text{ об/мин.}$$

В случае уменьшения n_y из условий захвата соответственно должно быть увеличено n_z , чтобы сумма n_z и n_y была равна 36 (при $n_m \leq 50$) или 48 об/мин (при $n_m > 50$). Что касается пауз с кантовкой длительностью до 4—5 сек., то здесь скорость выброса из предыдущего пропуска должна быть возможно большей, т. е. $n_z = n_m$, а скорость захвата в последующем пропуске должна быть предельной из условий захвата. Это уменьшит машинное время и предыдущего и последующего пропуска, не увеличивая паузы между ними, так как она заведомо больше времени реверсирования валков от n_z до n'_y .

Максимальная скорость в каждом пропуске может быть вычислена. Ее наивыгоднейшее значение с точки зрения сокращения машинного времени определяется по формуле (32)

$$n_m = \sqrt{120 \frac{a_y b_z}{a_y + b_z} \left(N_1 + \frac{n_y^2}{120 a_y} + \frac{n_z^2}{120 b_z} \right)}.$$

Подставляя значения $a_y = b_z = 20$ (при $n_m < n_n$), получим

$$n_m = 34,7 \sqrt{N_1 + \frac{n_y^2 + n_z^2}{2400}}.$$

Подставляя значения $a_y = 20$ и $b_z = 40$ (при $n_m > n_n$), получим

$$n_m = 40 \sqrt{N_1 + \frac{n_y^2}{2400} + \frac{n_z^2}{4800}}.$$

Скорость выброса на кантовку (39) составит

$$n_z = n_m = 49 \sqrt{N_1 + \frac{n_y^2}{2400}}.$$

Так как на блюминге НТМЗ максимальная скорость ограничена величиной 75 об/мин, то n_m должно быть не более 75 об/мин. При достижении этой скорости появляется период постоянной скорости.

Анализ осциллограмм, снятых на блюминге, показывает, что наиболее производительно работают операторы, режим скоростей которых в большей степени приближается к теоретически наивыгоднейшему.

В табл. 10 приведено машинное время и паузы по средним данным, взятым с осциллограмм работы старших операторов блюминга НТМЗ: Живанова, Хоперского и Бокарева. Здесь же приведено «улучшенное» время, полученное по методу КМК, и время, рассчитанное теоретически.

Сопоставление этих данных показывает, что расчет по методу КМК дает фиктивный результат, так как производительность здесь больше технически возможной, рассчитанной по минимальным паузам.

Аналогичное сопоставление было сделано на плохо освоенном, в тот период, профиле 140 × 350 на основании осциллографирования работы операторов Живанова и Хоперского.

Средний результат Живанова получился 111,77 сек., у Хоперского 110,23 сек. Обобщение по методу КМК дало цикл прокатки 103,5 сек.

Лучшая же осциллограмма Живанова показала цикл прокатки 103,19 сек., т. е. лучше, чем «улучшенный» результат по двум операторам.

Теоретический расчет показал, что данный профиль можно прокатать за 93,68 сек.

Таким образом метод КМК дает самые неожиданные результаты, то превышающие технически возможную производительность, то далеко отстающие от нее. При этом по методу КМК не дается указаний как получить, «улучшенные» результаты в каждом конкретном пропуске.

Таблица 10

Машинное время и паузы при прокатке заготовки 240×300 мм

№ пропуска	О п е р а т о р ы									
	Живанов		Хоперский		Бокарев		Улучшенный режим		Расчетный режим	
	t_m	t_x	t_m	t_x	t_m	t_x	t_m	t_x	t_m	t_x
0		5,0		6,53		4,69		5,0		5,0
1	1,57	1,17	1,77	1,61	1,20	1,65	1,20	1,17	1,50	1,2
2	1,12	4,77	1,04	4,90	0,80	5,08	0,80	4,77	1,15	4,77
3	1,03	1,68	1,04	1,96	1,36	1,25	1,03	1,25	1,13	1,2
4	1,30	1,60	1,16	2,33	1,09	1,50	1,09	1,50	1,43	1,2
5	1,78	1,05	1,73	1,39	1,62	1,17	1,62	1,05	1,70	1,2
6	1,89	1,77	1,63	1,84	1,57	1,31	1,57	1,31	1,84	1,2
7	1,86	1,07	2,07	1,53	1,75	1,31	1,75	1,07	1,94	1,2
8	1,74	4,08	1,69	4,10	1,57	4,37	1,57	4,08	1,73	4,08
9	2,13	1,26	1,98	1,87	1,73	1,61	1,73	1,26	2,29	1,2
10	2,48	1,57	1,97	2,12	2,05	2,05	1,97	1,57	2,23	1,2
11	2,27	1,47	2,54	1,64	2,87	1,70	2,27	1,47	2,25	1,2
12	2,25	3,65	2,44	4,00	2,10	3,64	2,10	3,64	2,15	3,6
13	2,94	1,63	2,43	2,04	3,07	1,60	2,94	1,63	2,63	1,2
14	2,53	3,09	2,58	3,60	2,23	4,72	2,23	3,09	2,73	3,0
15	3,29	1,55	3,26	1,20	3,95	1,20	3,26	1,20	3,38	1,2
16	2,78	3,63	3,36	4,50	3,24	3,50	2,78	3,50	3,10	3,6
17	3,77		3,88		3,49		3,49		3,36	
	36,73	40,04	36,57	47,16	35,69	43,35	33,40	39,0	36,74	37,20
	76,77		83,73		79,04		72,40		74 сек.	

Таблица 11

Машинное время и паузы при прокатке заготовки 240×300 мм

№ пропуска	По методу Живанова					По теоретическому расчету				
	n_y	n_m	n_z	t_m	t_x	n_y	n_m	n_z	t_m	t_x
0					5,0					5,0
1	10	25	19	1,60	1,44	15	30	18	1,50	1,2
2	23	43	43	0,96	4,72	18	40	40	1,15	4,77
3	10	23	10	1,65	0,90	30	35	18	1,13	1,2
4	10	23	10	1,65	1,00	18	31	18	1,43	1,2
5	13	30	14	2,16	1,00	18	35	18	1,70	1,2
6	10	34	20	1,92	1,30	18	36	18	1,84	1,2
7	19	38	19	1,90	1,20	18	37	18	1,94	1,2
8	12	43	43	1,76	4,06	18	52	52	1,73	4,08
9	10	38	15	2,52	1,12	18	42	18	2,29	1,2
10	10	43	15	2,72	1,33	18	51	24	2,23	1,2
11	25	53	21	2,32	1,36	24	54	24	2,25	1,2
12	17	60	60	2,28	3,60	24	67	67	2,15	3,6
13	10	60	25	2,98	1,50	30	63	24	2,63	1,2
14	35	58	58	2,48	3,00	24	75	75	2,73	3,0
15	18	63	15	3,66	1,40	20	69	24	3,58	1,2
16	27	73	73	2,92	3,55	24	75	75	3,10	3,6
17	18	75	75	3,40		30	75	75	3,36	
	—	—	—	38,88	37,48	—	—	—	36,74	37,25
				76,36					74,00	

Если отбор лучших результатов произвести по наименьшей сумме машинного времени пропуска и предыдущей паузы, то улучшенный цикл прокатки будет уже иным.

С последующей паузой в данном пропуске связана лишь скорость выхода, скорость же входа связана с предыдущей паузой.

Следует отметить, что одновременную увязку машинного времени с предыдущей и последующей паузой сделать без расчетов нельзя.

Чем меньше разница между предыдущей и последующей паузой, тем точнее метод ММК и наоборот.

Заниженные обороты по сравнению с паузами в большинстве пропусков разработанной на заводе карты передовых приемов дают основание предполагать наличие значительных резервов производительности или неточное определение оборотов (или пауз).

Лучшие результаты по использованию пауз имеют Гончаров, Киреев и Тищенко. Однако и Гончаров, например, при прокатке блюмса 280×280 имел заниженные обороты при захвате. Эти заниженные обороты механически вошли и в лучшие результаты.

Так, при прокатке слитка в блюмсы 290×290 мм в улучшенных результатах пауза между 5 и 6 пропусками принята 1,2 сек., скорость выхода из предыдущего пропуска 9 об/мин и скорость входа в последующий — 9 об/мин. Наивыгоднейшие же скорости, если принять среднее ускорение 40 об/мин. сек., получатся

$$n_y = n_z = 0,5Kt_x = \frac{40 \cdot 40}{40 + 40} \cdot 1,2 = 24 \text{ об/мин.}$$

Из сказанного следует, что производить обобщение без теоретического анализа нельзя.

При исследовании работы операторов блюминга на ММК бригадой Академии наук СССР под руководством академика А. П. Чекарева был использован метод обобщения лучших результатов отдельных операторов, заключающийся в следующем:

Суммарное машинное время и паузы измерялись у каждого оператора от кантовки до кантовки (включая и время последующей кантовки). Таким образом получилось несколько групп пропусков.

При определении улучшенного цикла прокатки каждую группу пропусков заимствовали у того оператора, у которого время в этой группе было наименьшим.

Такой метод не имеет принципиальных ошибок и является поэтому более надежным в сравнении с методами КМК и ММК. Однако возможности обобщения этим методом тем меньшие, чем меньше число кантовок. При прокатке без кантовок (например на слябинге) такой метод обобщения совсем отпадает. Этот метод не позволяет обобщать лучшие приемы внутри группы пропусков между двумя кантовками.

Таким образом обобщение передового опыта дает наибольший эффект только тогда, когда результаты исследований и наблюдений будут обрабатываться на основе теории и расчета.

ГЛАВА VI

РАСЧЕТ НАИВЫГОДНЕЙШИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕВЕРСИВНЫХ СТАНОВ

Методика расчета

Наивыгоднейшие режимы работы могут быть рассчитаны лишь при полной увязке режима обжатий со скоростями и динамическим режимом стана. При этом определяющим является режим обжатий в минимальное число пропусков. Проверка двигателя по нагреву может производиться сразу при выборе обжатий по пропускам, что избавляет от последующего перерасчета всего режима прокатки (см. главу III).

Зависимость между обжатиями и скоростями установлена специальным исследованием и выражена равенствами (1) и (2).

Исследованием установлено, что чем меньше пауза, тем меньше продолжительность прокатки, несмотря на увеличение машинного времени. Поэтому расчет минимально необходимых пауз должен предшествовать расчету машинного времени (см. главу II).

Наивыгоднейшие скорости захвата и выхода слитка должны рассчитываться по паузе на основании формул (64), (64'), (70—72) и удовлетворять тройному условию (68). При недостаточной мощности двигателя нужно n_y принимать наибольшим по условиям захвата, а n_z по формуле (64").

Если максимальная скорость не ограничивается двигателем, ее наивыгоднейшее значение должно быть рассчитано аналитически по выведенным равенствам (32) и др.

Наивыгоднейшее среднее ускорение и соотношение между ускорением и замедлением выражено формулами (77), (73), (79).

Так как методика расчета режимов работы для различных станов имеет много общего, рассмотрим лишь методику наиболее сложного реверсивного стана — слябинга.

Для других станов расчет будет аналогичен, но проще.

Ход расчета излагается в соответствии с разработанной табличной формой (табл. 12).

Определение числа пропусков (графа I)

Минимально возможное число пропусков окончательно может быть установлено лишь в конце всего расчета. Если расчет вести по

Расчет режима прокатки слэба 115 × 1060 × 7350 мм из слитка 640 × 1100 × 1550 мм — 7 т — Ст. 3

№ про- пуска	h_2	Δh_2	Δb	h_6	Δh_6	b_2	L_2	$l_{c.2}$	t	p	P_2	x	$M_{np.2}$	$l_{c.6}$	P_6	$M_{np.6}$	t_x	N
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	640	—	—	—	—	1100	1,55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	535	105	10	1070	30	1080	1,55	240	1200	5,33	810	0,93	202	101	207	26	10,5	0,47
2	485	50	10	1070	20	1090	1,73	166	1195	5,45	1080	0,95	205	82,5	218	23	2,6	0,53
3	435	50	10	1070	0	1080	1,92	166	1190	5,60	1000	0,95	192	—	—	—	0	0,58
4	385	50	10	1070	20	1090	2,18	166	1185	5,73	1030	0,92	193	82,5	159	17	2,5	0,67
5	335	50	10	1060	10	1070	2,52	166	1180	5,87	1040	0,92	194	58,3	115	9,4	1,2	0,77
6	285	50	10	1060	20	1080	2,96	166	1175	6,00	1070	0,92	200	82,6	141	15	2,5	0,90
7	240	45	10	1060	0	1070	3,62	158	1170	6,14	1035	0,92	185	—	—	—	0	1,07
8	195	45	10	1060	20	1080	4,33	158	1160	6,40	1090	0,90	192	82,5	103	11	2,4	1,29
9	155	40	10	1060	0	1070	5,45	149	1150	6,66	1056	0,88	174	—	—	—	0	1,66
10	115	40	10	1060	20	1080	7,35	149	1140	7,19	1150	0,85	185	82,5	66	7	2,2	2,24
11	115	0	0	1060	0	1060	7,35	0	1125	7,33	—	—	—	—	—	—	0	2,24

Табл. 12 (продолжение)

№ про- пуска	$n_{y.2}$	$n_{y.2}$	n_m	n_3	t_{p35}	t_{p12}	$t_{y.5}$	t_{y12}	t_n	t_3	t_0	t_1	Вертикальные валки							t_3	t_0
													t_{p35}	t_{p12}	t_{y35}	t_{y12}	t_{y12}^p	t_n^p	t_n^x		
1	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	50	50	50	50	1,14	0,84	—	—	1,37	—	1,25	2,62	1,14	0,84	—	—	—	0,57	0,80	—	1,25
2	—	42,5	50	0	1,14	0,21	—	0,63	0,24	1,25	—	3,47	1,14	0,84	—	—	—	0,01	0,23	1,25	—
3	0	—	50	50	—	—	1,14	0,84	0,29	—	1,25	3,52	—	—	1,14	0,29	0,55	—	0,29	—	1,25
4	—	41,3	50	48	1,14	0,11	—	0,73	0,90	0,05	1,20	4,13	1,14	0,84	—	—	—	0,76	0,14	0,05	1,25
5	0	—	50	50	—	—	1,14	0,84	0,52	—	1,25	3,75	—	—	1,14	0,54	0,30	—	0,52	—	1,25
6	—	41,3	50	0	1,14	0,11	—	0,73	0,60	1,25	—	3,83	1,14	0,84	—	—	—	0,46	0,14	1,25	—
7	0	—	50	50	—	—	1,14	0,84	0,88	—	1,25	4,11	—	—	1,14	0,84	—	0,07	0,81	—	1,25
8	—	40,4	50	0	1,14	0,01	—	0,83	0,99	1,25	—	4,19	1,14	0,84	—	—	—	0,93	0,06	1,25	—
9	0	—	50	50	—	—	1,14	0,84	1,59	—	1,25	4,82	—	—	1,14	0,84	—	0,81	0,78	—	1,25
10	—	33,2	50	0	0,95	—	0,19	0,84	1,88	1,25	—	5,21	1,14	0,75	—	0,09	—	1,98	—	1,25	—
11	0	—	50	50	—	—	1,14	0,84	2,28	—	1,25	4,26	—	—	1,14	0,84	—	1,48	0,80	—	1,25

Табл. 12 (продолжение)

№ про пуска	Горизонтальные валки									Вертикальные валки							Горизонтальные валки						
	t_{p35}	t_{p12}	t_{y35}	t_{y12}^p	t_{y12}^x	t_n^p	t_n^x	t_3	t_0	M_{p35}	M_{p12}	M_{y35}	M_{y12}	M_n	M_3	M_0	M_{p35}	M_{p12}	M_{y35}	M_{y12}	M_n	M_3	M_0
1	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	1,14	0,84	—	—	—	0,57	0,80	—	1,25	30	14	—	—	37,5	—	—25	60	24	—	—	229	—	60
2	1,14	0,21	—	0,63	—	0,06	0,18	—	1,25	30	14	—	—	34	4	—	60	24	—	252	233	—	60
3	1,14	0,40	—	0,44	—	0,29	—	—	1,25	30	14	30	14	—	—	—25	60	24	—	238	219	—	60
4	1,14	0,11	—	0,73	—	0,14	0,76	—	1,25	30	14	—	—	26	4	—25	60	24	—	238	219	—	60
5	1,14	0,40	—	0,44	—	0,52	—	—	1,25	30	14	42	26	—	—	—25	60	24	—	240	221	—	60
6	1,14	0,11	—	0,73	—	0,42	0,18	—	1,25	30	14	—	—	24	—6	—	60	24	—	245	227	—	60
7	1,14	0,40	—	0,44	—	0,88	—	—	1,25	30	14	30	14	5	—	—25	60	24	—	230	211	—	60
8	1,14	0,01	—	0,83	—	0,81	0,18	—	1,25	30	14	—	—	17,5	—12,5	—	60	24	—	237	218	—	60
9	1,14	0,40	—	0,44	—	1,59	—	—	1,25	30	14	30	14	5	—	—25	60	24	—	217	198	—	60
10	0,95	—	0,19	0,84	—	1,80	0,18	—	1,25	30	14	—	23	14	—16	—	60	24	266	230	211	—	60
11	1,14	0,40	—	0,44	—	2,28	—	—	1,25	30	14	30	14	5	—	—25	60	24	—	24	5	—	60

Табл. 12 (продолжение)

№ про пуска	Вертикальные валки									Горизонтальные валки								
	$M_{p35}^2 t_p$	$M_{p12}^2 t_p$	$M_{y35}^2 t_y$	$M_{y12}^2 t_y$	$M_n^2 t_n$	$M_3^2 t_3$	$M_0^2 t_0$	$\Sigma M^2 t$	$M_{кв}$	$M_{p35}^2 t_p$	$M_{p12}^2 t_p$	$M_{y35}^2 t_y$	$M_{y12}^2 t_y$	$M_n^2 t_n$	$M_3^2 t_3$	$M_0^2 t_0$	$\Sigma M^2 t$	$M_{кв}$
1	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81
0	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	—	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	—
1	0,10	0,02	—	—	0,08	—	0,08	0,28	24,7	0,41	0,05	—	—	3,00	—	0,45	3,91	93
2	0,10	0,02	—	—	0,00	0,00	—	0,12	18,6	0,41	0,01	—	4,00	0,32	—	0,45	5,19	122
3	—	—	0,10	0,01	—	—	0,08	0,19	23,2	0,41	0,02	—	2,45	1,37	—	0,45	4,70	116
4	0,10	0,02	—	—	0,05	0,00	0,08	0,25	24,6	0,41	0,01	—	4,15	0,67	—	0,45	5,69	118
5	—	—	0,20	0,04	—	—	0,08	0,32	29,2	0,41	0,02	—	2,54	2,52	—	0,45	5,94	125
6	0,10	0,02	—	—	0,03	0,01	—	0,15	20,6	0,41	0,01	—	4,42	2,16	—	0,45	7,45	140
7	—	—	0,10	0,02	0,00	—	0,08	0,20	22	0,41	0,02	—	2,33	3,92	—	0,45	7,13	132
8	0,10	0,02	—	—	0,03	0,02	—	0,17	20	0,41	0,00	—	4,65	3,85	—	0,45	9,37	150
9	—	—	0,10	0,02	0,00	—	0,08	0,20	20,3	0,41	0,02	—	2,07	6,24	—	0,45	9,19	138
10	0,10	0,01	—	0,00	0,04	0,03	—	0,18	18,6	0,34	—	1,33	4,40	7,96	—	0,45	14,48	167
11	—	—	0,10	0,02	0,01	—	0,08	0,21	19,4	0,41	0,02	—	0,03	0,01	—	0,45	0,92	41

горизонтальным строкам табличной формы, то с заполнением последней горизонтальной строки (последний пропуск) заканчивается и расчет, так как число пропусков получается само собой и перерасчета не требуется.

Однако такой способ расчета требует больше времени и утомителен. Значительно удобнее и быстрее вести расчет в порядке вертикальных столбцов (преимущество — однотипность вычислений). Однако в этом случае нужно заранее задаться числом пропусков и распределить обжатия. За исходную основу может быть принят установившийся фактический режим обжатий. Расчет покажет, насколько удачен установившийся режим и в каком направлении он может быть улучшен.

Последующий перерасчет даст более рациональный режим прокатки. Для окончательного уточнения режима работы может потребоваться несколько перерасчетов.

Последний пропуск желательно предусмотреть без обжатия в горизонтальных валках и время этого пропуса совместить с подъемом верхнего горизонтального вала в исходное положение. Это сокращает начальную паузу и сохраняет боковые поверхности слэба плоскими.

Обжатия в горизонтальных валках (графы 2—3)

Величина обжатий в каждом отдельном пропуске может определяться или условиями захвата, или перегрузочным моментом двигателя. Прочность валков редко лимитирует величину обжатия (см. графы 12, 14 и 52—54).

В горизонтальных валках условия захвата позволяют свободно обжимать до 75—100 мм (рис. 1), однако максимально допустимый момент двигателя обычно ограничивает эти обжатия до 40—50 мм при прокатке широких слэбов из мягкой стали (если его мощность не превышает 10 000 л. с.).

В еще большей степени суммарная величина обжатий ограничивается нагревом двигателя. Ввиду этого проверка двигателя на нагрев (графы 73—81) совершенно необходима и является определяющей при выборе режима обжатий на слэбинге. В первом пропуске, благодаря конусности слитка и пониженной плотности металла, обжатия до 100 мм не вызывают перегрузок стана.

Уширение в горизонтальных валках (графа 4)

Для правильного расчета режима работы вертикальных валков необходимо учитывать уширение металла в горизонтальных валках. Существующие формулы уширения в условиях слэбинга дают чаще всего заниженные результаты, что приводит к неправильному представлению о нагрузке двигателя вертикальных валков. Исследования максимального уширения на слэбинге показывают,

что наиболее пригодна формула Петрова [14, стр. 169] с коэффициентом $C = 0,425$

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,425 \frac{\sqrt{\Delta h R}}{H} \quad (121)$$

Обжатия вертикальными валками (графы 5—6)

При мощности двигателя вертикальных валков не более 2500 л. с. обжатия лимитируются мощностью привода и могут быть установлены окончательно после проверки двигателя на нагрев (графы 64—72). В первых пропусках при прокатке квадратных слитков обжатия возможны до 15—20 мм, а на плоских до 25 мм. В последующих пропусках обжатия могут быть 30—40 мм. На первом пропуске при сглаживании конусности слитка обжатия возможны до 40 мм (при $D_p \sim 700$ мм условия захвата позволяют обжимать до 50 мм).

Если уширения за нечетный и четный пропуск не могут быть сняты в четном пропуске в вертикальных валках из-за перегрузки двигателя, то вертикальные валки в четном пропуске должны быть соответственно разведены. При возможности работы без разведения валков пауза с передней стороны стана может быть сокращена до нуля, что способствует повышению производительности. Последующий расчет позволяет установить возможность работы без разведения вертикальных валков.

Ширина полосы после выхода из горизонтальных валков (графа 7)

Ширина полосы после выхода из горизонтальных валков равна: в нечетных пропусках — раствору вертикальных валков плюс уширение;

в четных пропусках — ширине после предшествующего нечетного пропуса плюс уширение.

Длина полосы после выхода из горизонтальных валков (графа 8)

Длину полосы после выхода из горизонтальных валков определяют по весу слитка

$$L_2 = \frac{G \cdot 10^5}{7,85 \cdot h_2 \cdot b_2}, \quad (122)$$

где L_2 — длина полосы, м;

G — вес слитка, т;

h_2 и b_2 — толщина и ширина полосы, мм.

В первых пропусках, где расчетная длина получается меньше длины слитка, принимается длина слитка.

Длина пояса деформации (графы 9 и 15)

$$l_c = \sqrt{\Delta h R}. \quad (123)$$

Температура пропуска (графа 10)

Начальная температура металла задается технологией нагрева. Снижение температуры по пропускам для слябинга может быть подсчитано по формуле (20).

При предварительном расчете температур можно задаваться в условиях слябинга длительностью пропусков $z = 4-6$ сек. Меньшее значение — для коротких полос. Более точно время берется из графы 31 после ее расчета.

Полное удельное давление (графа 11)

На основании анализа осциллограмм установлено, что хорошее совпадение с опытами получается при расчете удельного давления по формуле (13).

В первом пропуске вследствие рыхлости металла и конусности слитка удельное давление должно быть снижено против расчетного, примерно, на 40%.

Учитывать внешнее трение при прокатке на слябинге можно по формуле А. Ф. Головина (14).

Учет трения необходим только при $l_c/h_c > 1$, что на слябинге бывает очень редко. В остальных случаях можно принять коэффициент для учета влияния внешнего трения $k_f = 1$, так как влияние трения здесь незначительно.

Вертикальное усилие в горизонтальных валках (графа 12)

$$P_z = pb_z l_{c,z}. \quad (124)$$

Допускаемое прочностью валка усилие определяется по формуле (10).

Наихудшие условия имеют место при прокатке самого узкого сляба.

Принимая $D = 1000$, $L = 2000$, $l = 700$, $B = 620$ мм, допускаемое напряжение изгиба для стальных валков $[\sigma]_u = 12$ кг/мм², получим

$$P_{доп} = 2000 \text{ т},$$

а при диаметре 1100 мм

$$P_{доп} = 2700 \text{ т}.$$

При прокатке сляба шириной 1250 мм соответствующие допускаемые усилия будут

$$P_{доп} = 2300 \text{ и } 3050 \text{ т}.$$

Момент прокатки в горизонтальных валках (графы 13 и 14)

$$M_{пр,z} = P_z (\chi l_{c,z} + f d_z), \quad (125)$$

где χ — коэффициент для учета положения центра тяжести давления на горизонтальные валки (6),

d_z — диаметр шейки горизонтальных валков,

f — коэффициент трения в шейках (при текстолитовых вкладышах $f = \sim 0,05$).

Давление на вертикальные валки (графа 16)

$$P_g = pb_g \cdot l_{c,g}. \quad (126)$$

В нечетных пропусках за ширину b_g принимается толщина слитка, поступающего из предыдущего пропуска; в четных пропусках — толщина слитка, выходящего из горизонтальных валков в данном пропуске.

Момент прокатки в вертикальных валках (графа 17)

$$M_{пр,g} = P_g \cdot (l_{c,g} + f d_g), \quad (127)$$

где d_g — диаметр шейки вертикальных валков.

Паузы между пропусками (графа 18)

Правильное определение пауз имеет важнейшее значение для расчета рационального режима прокатки и должно предшествовать расчету машинного времени. Паузы определяют скоростной режим и рациональное машинное время.

На слябинге паузы определяются почти исключительно скоростью работы нажимного устройства (горизонтальных валков с задней стороны и вертикальных валков с передней стороны стана). Следовательно, пауза с передней стороны стана есть функция величины обжатия в вертикальных валках, а с задней стороны стана — функция величины обжатия в горизонтальных валках (табл. 8).

Пауза на кантовку по данным хронометража и осциллографирования занимает от 5 до 7 сек. Кантовка на слябинге производится довольно редко.

Начальная пауза (между двумя слитками) также определяется временем подъема верхнего валка в исходное положение. Подъем на 470 мм занимает до 10,5 сек., подъем на 750 мм — 14,0 сек.

При работе без разведения вертикальных валков в четных пропусках можно принимать паузу с передней стороны стана равной нулю.

Длина полосы, выраженная в оборотах валков (графа 19)

$$N_1 = L_1 : \pi D_p$$

Скорость захвата и выдачи слитка (графы 20, 21, 23)

Наивыгоднейшее значение скорости захвата и скорости выдачи слитка определяется минимально необходимой паузой. Причем паузой связывается скорость выдачи из предыдущего пропуска (n_z) со скоростью задачи в последующий (n_y).

Эти скорости должны быть выбраны, исходя из тройного условия (68) так, чтобы время остановки валков после предыдущего пропуска и время их раскручивания до захвата слитка в последующем пропуске в сумме были равны паузе, с одной стороны, и чтобы линейная скорость выхода слитка из предыдущего пропуска численно была равна паузе, с другой стороны (71), (72). При больших скоростях n_3 и n_y необходимо большее время на реверсирование валков, следовательно, паузы увеличатся, а производительность уменьшится.

При меньших скоростях n_3 и n_y увеличится машинное время без уменьшения пауз, что опять-таки приведет к снижению производительности.

Таким образом наивыгоднейшие скорости n_3 и n_y определяются соотношением (при $\mu_g = 2$)

$$\frac{n_3}{b} + \frac{n_y}{a} = v_3 = t_x,$$

где t_x — минимально необходимая пауза (обычно время работы нажимного устройства), сек.;

b — ускорение при торможении двигателя на холостом ходу, об/мин. сек.;

a — ускорение при раскручивании двигателя на холостом ходу, об/мин. сек.

Свыше основной скорости слябинги обычно не работают. При полной загрузке двигателей во всех пропусках скорость выше основной и не требуется, так как она приведет к перегреву двигателя и снижению производительности.

Выше доказано (59), что минимальное время прокатки получается при

$$n_3 = n_y = K \frac{t_x}{2}.$$

Однако такое соотношение часто бывает невозможно осуществить. Например, если по условиям захвата должно быть $n_y < n_3$; если получается $v_3 > t_{ny}$ в пропусках без кантовки, что увеличивает паузу рольганга и, следовательно, общую паузу. При $v_3 < t_{ny}$ прокатка возможна, но необходимы дополнительные манипуляции рольгангом для избежания преждевременной задачи слитка в валки. При перегреве двигателя нужно учесть (64").

При больших паузах (начальная пауза, пауза при кантовке слитка) целесообразно захват производить при предельной по условиям захвата скорости, а выдачу — при максимальной скорости. Это сократит машинное время, увеличение же времени на реверсирование будет перекрыто паузой.

Максимальная скорость (графа 22)

Выше доказано, что наивыгоднейшая максимальная скорость, если она не ограничивается мощностью двигателя, будет тогда,

когда период прокатки с постоянной скоростью будет равен нулю и прокатка будет происходить только в периоды ускорения и замедления. Тогда при данных n_y и n_3 получится минимально возможное машинное время (формулы 46—49).

При постоянных ускорениях a и b во всех интервалах скоростей двигателя (что имеет место при контакторном управлении) наивыгоднейшая максимальная скорость горизонтальных валков определится из выражения

$$n_m = \sqrt{60 K \left(N_{11} + \frac{n_y^2}{120 a_2} + \frac{n_3^2}{120 b_2} \right)}, \quad (128)$$

где N_{11} — длина полосы, выраженная в оборотах валков с учетом расстояния между горизонтальными и вертикальными валками;

a_2 — постоянное ускорение за все время раскручивания горизонтальных валков, об/мин. сек.;

b_2 — постоянное замедление за все время торможения горизонтальных валков, об/мин. сек.;

n_y — скорость в момент захвата слитка, об/мин.;

n_3 — скорость в момент выдачи слитка, об/мин.

(Все величины приведены к горизонтальным валкам).

Если ускорение двигателя в различные периоды цикла вращения валков изменяется, то уравнение для максимальной скорости в конце верхнего периода ускорения напишется в следующем виде:

$$n'_m = \sqrt{120 \frac{a'_2 b'_2}{a'_2 + b'_2} \left(N_{11} + \frac{n_y'^2}{120 a'_2} + \frac{n_3'^2}{120 b'_2} \right)}, \quad (129)$$

где a'_2 и b'_2 — ускорения в верхнем периоде ускорений;

n_y' — скорость в начале верхнего периода ускорений;

n_3' — скорость в конце того же периода;

N_{11} — длина полосы, прокатываемая за тот же период, определяемая как разница между полной длиной полосы с учетом расстояния между горизонтальными и вертикальными валками (N_1) и длин, прокатанных за все остальные периоды,

$$N_{11} = N_1 - (N_{y1} + N_{y2} + \dots + N_{31} + N_{32} + \dots). \quad (130)$$

Длина полосы, прокатанной за каждый период, отличающийся от соседнего ускорением, может быть выражена формулами

$$\left. \begin{array}{l} \text{а) при ускорении} \quad N_i = \frac{n_2^2 - n_1^2}{120 a_i}; \\ \text{б) при замедлении} \quad N_i = \frac{n_2^2 - n_1^2}{120 b_i}. \end{array} \right\} \quad (131)$$

где n_1 и n_2 — скорости в начале и в конце каждого соответствующего периода.

В данном конкретном примере расчета (см. табл. 12) принято в периоде разгона два ускорения: $a_1 = 35$ об/мин. сек. (до 40 об/мин) и $a_2 = 12$ об/мин. сек. (при числе оборотов свыше 40 об/мин), отрицательное ускорение (замедление) $b = 40$ об/мин. сек., расстояние между горизонтальными и вертикальными валками $2,2$ м, $D_p = 1050$ мм, следовательно $N' = 2,2 : \pi D_p = 0,67$ об.

При этих значениях получим:

а) для случая, когда $n_y \geq 40$ об/мин

$$n_m = 33,3 \sqrt{N_1 + 0,67 + \frac{n_y^2}{1440} + \frac{n_z^2}{4800}}; \quad (132)$$

б) для случая, когда $n_y < 40$ об/мин.

$$n_m = 33,3 \sqrt{N_1 + 1,4 + \frac{n_y^2}{4200} + \frac{n_z^2}{4800}}; \quad (133)$$

в) для случая, когда $n_y = 40$ об/мин

$$n_m = 33,3 \sqrt{N_1 + 1,78 + \frac{n_z^2}{4800}}. \quad (134)$$

Перед большими паузами (кантовка, пауза перед новым слитком) возможна выдача слитка из валков на максимальной скорости (в период раскручивания), т. е. $n_3 = n_m$.

Для этого случая формулы (132), (133) и (134) примут соответственно вид:

при $n_y > 40$ об/мин

$$n_m = 38 \sqrt{N_1 + 0,67 + \frac{n_y^2}{1440}}; \quad (135)$$

при $n_y \leq 40$ об/мин

$$n_m = 38 \sqrt{N_1 + 1,4 + \frac{n_y^2}{4200}}; \quad (136)$$

при $n_y = 40$ об/мин

$$n_m = 38 \sqrt{N_1 + 1,78}. \quad (137)$$

В тех случаях, когда максимальная скорость ограничена мощностью двигателей и она меньше расчетной, за максимальную принимается скорость, допускаемая двигателем. Для слэбингов в настоящее время максимальная скорость ограничивается их номинальной скоростью.

Все формулы от (128) до (137) даны с учетом расстояния между горизонтальными и вертикальными валками и, следовательно, с учетом прокатки как в горизонтальных, так и в вертикальных валках.

Для упрощения расчета обороты вертикальных валков приводятся к диаметру горизонтальных валков, а окружная скорость горизонтальных и вертикальных валков в каждый данный момент принимается одинаковой.

В четных пропусках эти скорости должны быть приблизительно одинаковы, а в нечетных пропусках (где окружная скорость вертикальных валков должна быть меньше, чем у горизонтальных, в соответствии с вытяжкой) это различие компенсируется тем, что длина полосы берется по выходе из горизонтальных валков, т. е. длиннее чем в вертикальных валках в соответствии с вытяжкой.

Период раскручивания валков вхолостую с ускорением 35 об/мин. сек. (графа 24):

при $n_y < 40$ об/мин

$$t_{p35} = \frac{n_y}{35}, \quad (138)$$

при $n_y \geq 40$ об/мин

$$t_{p35} = \frac{40}{35} = 1,14 \text{ сек.} \quad (139)$$

Период раскручивания валков вхолостую (графа 25) с ускорением 12 об/мин. сек. имеет место только при $n_y > 40$ об/мин

$$t_{p12} = \frac{n_y - 40}{12}. \quad (140)$$

Период ускорения валков с полосой при $a = 35$ об/мин. сек. (графа 26) имеет место только при $n_y < 40$ об/мин

$$t_{y35} = \frac{40 - n_y}{35}. \quad (141)$$

Период ускорения валков с полосой при $a = 12$ об/мин. сек. (графа 27):

при $n_y > 40$ об/мин

$$t_{y12} = \frac{n_m - n_y}{12}; \quad (142)$$

при $n_y \leq 40$ об/мин

$$t_{y12} = \frac{n_m - 40}{12}. \quad (143)$$

Период замедления валков с полосой при $b = 40$ об/мин. сек. (графа 29)

$$t_z = \frac{n_m - n_z}{40}. \quad (144)$$

Период остановки валков вхолостую при $b = 40$ об/мин. сек. (графа 30)

$$t_0 = \frac{n_z}{40}. \quad (145)$$

Период прокатки с постоянной максимальной скоростью (графа 28)

$$t_n = \frac{60 N_n}{n_n}, \quad (146)$$

где N_n — длина полосы, прокатываемая с постоянной скоростью;

$$N_n = N_1 + 0,67 - N_{y35} - N_{y12} - N_3. \quad (147)$$

Длины N_{y35} и N_3 могут отсутствовать, если отсутствуют соответствующие периоды:

при $n_y > 40$ об/мин отсутствуют t_{y35} и N_{y35} ;

при $n_3 = n_m$ отсутствуют t_3 и N_3 ;

при $n_y < 40$ об/мин.

$$N_{y35} = \frac{40^2 - n_y^2}{4200} = 0,38 - \frac{n_y^2}{4200}; \quad (148)$$

при $n_y > 40$ об/мин

$$N_{y12} = \frac{n_m^2 - n_y^2}{1440}; \quad (149)$$

при $n_y = 40$ об/мин

$$N_{y12} = \frac{n_m^2 - 40^2}{1440}; \quad (150)$$

$$N_3 = \frac{n_m^2 - n_3^2}{4800}. \quad (151)$$

Продолжительность вращения валков за пропуск (графа 31)

$$\tau = t_{p35} + t_{p12} + t_{y35} + t_{y12} + t_n + t_3 + t_0. \quad (152)$$

Машинное время пропуска

$$t_m = t_{y35} + t_{y12} + t_n + t_3. \quad (153)$$

При правильном и полном использовании паузы она должна быть равна сумме t_0 предыдущего пропуска и $(t_{p35} + t_{p12})$ последующего. Большие паузы (начальная или при кантовке) не могут быть полностью использованы.

Периоды вращения вертикальных валков (графы 32—40)

а) В нечетных пропусках

t_{p35} ; t_{y35} ; t_{p12} — переносятся из соответствующих общих граф (24—26) см. формулы (138—141).

Период t_{y12} может оказаться короче общего (по графе 27), так как длина полосы берется уже без учета расстояния между горизонтальными и вертикальными валками. Для проверки нужно

рассчитать n_m по длине полосы, прокатываемой в вертикальных валках:

при $n_y \geq 40$ об/мин

$$n_m^s = 38 \sqrt{N_1 + \frac{n_y^2}{1440}}; \quad (154)$$

при $n_y \leq 40$ об/мин

$$n_m^s = 38 \sqrt{N_1 + 0,73 + \frac{n_y^2}{4200}}. \quad (155)$$

Если получится $n_m^s > n_m$ (ограниченного двигателем), то период t_{y12} берется из графы 27.

Если $n_m^s < n_m$, то t_{y12}^p рассчитывается по формулам (142) и (143) с заменой n_m на n_m^s . Получается новый период холостого хода

$$t_{y12}^x = \frac{n_m - n_m^s}{12}. \quad (156)$$

Если $n_m^s < n_m$, то в вертикальных валках периода t_n не будет. В противном случае t_n^p вертикальных валков рассчитывается по формуле

$$t_n^p = \frac{60}{n_n} N_n^s, \quad (157)$$

где

$$N_n^s = N_1 - N_{y35} - N_{y12}; \quad (158)$$

N_{y35} и N_{y12} определяются по формулам (148—150).

Разница между общим t_n (графа 28) и t_n^p в вертикальных валках составит их холостой ход при постоянной максимальной скорости

$$t_n^x = t_n - t_n^p. \quad (159)$$

Периода замедления в вертикальных валках при нечетных пропусках не будет, он переходит в период остановки

$$t_0 = \frac{n_m - n_3}{40} + \frac{n_3}{40} = \frac{n_m}{40}, \quad (160)$$

т. е. графа 40 берется как сумма граф 29 и 30.

б) В четных пропусках

В четных пропусках полоса попадает в вертикальные валки позднее, чем в горизонтальные, на время прокатки в горизонтальных валках части длины полосы, равной расстоянию между горизонтальными и вертикальными валками ($N' = 0,67$ об).

Захват полосы вертикальными валками может произойти или в период t_{y12} , или в период t_n . До этого момента все предыдущие общие периоды (графы 24—28) будут составлять холостой ход в вертикальных валках, а все последующие общие периоды (графы 28—30) переходят без изменения в периоды вертикальных валков (графы 37, 39 и 40).

Если в горизонтальных валках $(N_{y35} + N_{y12}) < 0,67$, то полоса попадает в вертикальные валки в период t_n .

Тогда время холостого хода в периоде t_n равно

$$t_n^x = \frac{60}{n_n} (0,67 - N_{y35} - N_{y12}), \quad (161)$$

а рабочий ход периода t_n

$$t_n^p = t_n - t_n^x. \quad (162)$$

В этом случае в вертикальных валках не будет периодов t_{y35} и t_{y12} , а соответствующее время из общих граф 26 и 27 переходит в t_{p35} и t_{p12} вертикальных валков (графы 32 и 33).

Если в горизонтальных валках $(N_{y35} + N_{y12}) > 0,67$, то полоса попадает в вертикальные валки в период t_{y12} и последний разбивается на две части — t_{y12}^x (холостой ход в вертикальных валках) и t_{y12}^p (рабочий ход в вертикальных валках). Все остальные периоды переписываются из общих граф. Для определения t_{y12}^x вертикальных валков нужно найти число оборотов валков, при которых полоса входит в вертикальные валки:

при $n_y > 40$ об/мин

$$n_y^e = 38 \sqrt{0,67 + \frac{n_y^2}{1440}}; \quad (163)$$

при $n_y < 40$ об/мин

$$n_y^e = 38 \sqrt{1,4 + \frac{n_y^2}{4200}}. \quad (164)$$

Тогда для вертикальных валков будет:

$$t_{y12}^x = \frac{n_y^e - 40}{12} \quad (165)$$

и

$$t_{y12}^p = t_{y12} - t_{y12}^x. \quad (166)$$

Значения t_{y12}^x из графы 35 удобнее записать в графе 33.

Периоды вращения горизонтальных валков (графы 41—49)

а) В нечетных пропусках

Рассчитываются как периоды вращения вертикальных валков в четных пропусках — формулы (161—166).

б) В четных пропусках

Рассчитываются как периоды вращения вертикальных валков в нечетных пропусках — формулы (154)—(160).

Крутящие моменты при прокатке в вертикальных валках (графы 50—56)

Принимая для вертикальных валков $GD^2 \approx 100 \text{ тм}^2$, найдем значения динамических моментов при прокатке в вертикальных валках. Динамический момент при прокатке с ускорением $a = 35$ об/мин. сек. (приведено к горизонтальным валкам) будет $M_{35}^e = 25 \text{ тм}$; при прокатке с ускорением 12 об/мин. сек $M_{12}^e = 9 \text{ тм}$.

При замедлении $v = 40$ об/мин. сек $M_{40}^e = 30 \text{ тм}$. Момент холостого хода примем $M_x^e = 5 \text{ тм}$ к. п. д. передачи $\eta_e = 0,8$. Тогда:

$$\left. \begin{aligned} M_{p35} &= M_{35} + M_x = 25 + 5 = 30 \text{ тм} \\ M_{p12} &= M_{12} + M_x = 9 + 5 = 14 \text{ тм} \\ M_{y35} &= M_u + M_{35} + M_x = M_u + 30 \text{ тм} \\ M_{y12} &= M_u + M_{12} + M_x = M_u + 14 \text{ тм} \\ M_n &= M_u + M_x = M_u + 5 \text{ тм} \\ M_z &= M_u - M_{40} + M_x = M_u - 25 \text{ тм} \\ M_0 &= -M_{40} + M_x = -25 \text{ тм} \end{aligned} \right\} \quad (167)$$

Крутящие моменты при прокатке в горизонтальных валках (графы 57—63)

Принимая для горизонтальных валков $GD^2 = 600 \text{ тм}^2$, найдем: $M_{35}^e = 55 \text{ тм}$; $M_{12}^e = 19 \text{ тм}$; $M_{40}^e = 65 \text{ тм}$.

Зададимся $M_x = 5 \text{ тм}$ и $\eta_e = 0,9$. Тогда:

$$\left. \begin{aligned} M_{p35} &= M_{35} + M_x = 55 + 5 = 60 \text{ тм} \\ M_{p12} &= M_{12} + M_x = 19 + 5 = 24 \text{ тм} \\ M_{y35} &= M_u + M_{35} + M_x = M_u + 60 \text{ тм} \\ M_{y12} &= M_u + M_{12} + M_x = M_u + 24 \text{ тм} \\ M_n &= M_u + M_x = M_u + 5 \text{ тм} \\ M_z &= M_u - M_{40} + M_x = M_u - 60 \text{ тм} \\ M_0 &= -M_{40} + M_x = -60 \text{ тм} \end{aligned} \right\} \quad (168)$$

Проверка двигателей по нагреву (графы 64—81)

Графы 64—72 являются вспомогательными для расчета средне-квадратичного момента привода вертикальных валков, а графы 73—81 для привода горизонтальных валков.

Условия прохождения по нагреву двигателя

$$\sqrt{\frac{\sum M^2 t}{T}} \leq M_n, \text{ тм.} \quad (169)$$

Для двигателя вертикальных валков при мощности 2500 л. с. и $n = 100/275$ об/мин, $M_n = 28,6$ тм (приведен к вертикальным валкам). Для двух двигателей горизонтальных валков при мощности по 5000 л. с. и $n = 50/100$ об/мин; $M_n = 2 \cdot 71,6 = 143$ тм.

В период прокатки T должна быть включена начальная пауза (T_0)

$$T = \Sigma t_x + \Sigma t_m + T_0. \quad (170)$$

Моменты прокатки в графах 52—61 должны быть проверены на допустимую перегрузку двигателей.

При установке автоматов двигателей вертикальных валков на трехкратную, а горизонтальных — на 2,5-кратную перегрузку допускаемые максимальные моменты получаются (при тех же двигателях):

$M_{\max}^e = 86$ тм (приведен к вертикальным валкам);

$M_{\max}^z = 350$ тм.

Если в отдельных пропусках получается перегрузка по допускаемому максимальному моменту, целесообразно сделать соответствующее перераспределение обжатий.

Если двигатель не проходит по нагреву и при учете (64"), необходимо добавить два пропуска и сделать перерасчет.

Если двигатели по нагреву имеют значительный запас, можно сделать ориентировочный расчет на уменьшение двух пропусков и при положительном результате сделать полный перерасчет.

Ориентировочную проверку на возможность сокращения двух пропусков можно сделать по формуле

$$M_{\kappa\sigma} = \sqrt{\frac{\Sigma M^2 t}{\frac{n-2}{n} T}} < M_n. \quad (171)$$

где значения $\Sigma M^2 t$, период T и число пропусков n следует взять без изменения (т. е. без учета сокращения числа пропусков).

Если полученный $M_{\kappa\sigma}$ равен или незначительно меньше номинального M_n , то двигатель не пройдет по нагреву при сокращенном числе пропусков, так как при перерасчете $\Sigma M^2 t$ будет несколько больше.

Точно так же предварительно нужно проверить возможность распределения обжатий при уменьшенном числе пропусков как по захвату, так и по допускаемому максимальному моменту.

Если расчет вести по горизонтальным строкам, то графы 72 и 81 позволяют контролировать прохождение двигателя по нагреву по мере расчета каждого пропуска из отношения нарастающих сумм $\Sigma M^2 t$ к нарастающей продолжительности прокатки $\Sigma \tau$.

Примеры расчета

Пр и м е р 1. Дан слябинг с валками размерами:

горизонтальных: $D_p = 1050$; $L = 2000$; $l = 700$; $d = 680$;

вертикальных: $D_p = 680$; $L = 1600$; $l = 800$; $d = 450$.

Вертикальные валки находятся спереди.

Каждый горизонтальный валок приводится электродвигателем мощностью 5000 л. с., $n = 0—50—100$ об/мин.

Вертикальные валки приводятся электродвигателем мощностью 2500 л. с., $n = 0—100—275$ об/мин через редуктор с передаточным числом 1,6.

Ускорения, отнесенные к горизонтальным валкам: $a_1 = 35$ об/мин. сек. до $n = 40$ об/мин, $a_2 = 12$ об/мин. сек. при $n > 40$ об/мин; $b = 40$ об/мин. сек.

Расстояние между горизонтальными и вертикальными валками 2,2 м. Все остальные данные приведены в методике расчета, которая написана применительно к данному конкретному примеру.

Рассчитать рациональный режим прокатки сляба размерами $115 \times 1060 \times 7350$ мм из слитка размерами $640 \times 1100 \times 1550$ мм весом 7 т.

Сталь марки 3 кп. Температура начала прокатки 1200° . Число пропусков принимаем 11.

Весь расчет сведен в табл. 12.

Обжатия распределены таким образом, чтобы получить равномерную нагрузку на двигатель. В результате моменты прокатки M_{np} колеблются в узких пределах $174—202$ тм.

Давления на валок нигде не превышают 1150 т, благодаря чему напряжения изгиба в теле горизонтальных валков незначительны (не более 6 кг/мм²).

Для уменьшения числа перестановок вертикальных валков делается только две установки их — 1070 мм перед первым пропуском и 1060 мм перед пятым пропуском. Установка перед первым пропуском делается за время начальной паузы ($T_0 = 10,5$ сек. по работе нажимного устройства горизонтальных валков) и лишь установка перед 5-м пропуском требует паузы в процессе прокатки (1,2 сек. по табл. 8).

На практике операторы делают в процессе прокатки 2—4 перестановки вертикальных валков, что увеличивает паузы с передней стороны стана.

Отсутствие перестановок вертикальных валков позволяет принимать паузы с передней стороны стана равными нулю, т. е. возвращать слиток в вертикальные валки почти не выпуская его из них. Это и было использовано.

Паузы с задней стороны стана приняты по работе нажимного устройства горизонтальных валков в зависимости от обжатия (табл. 8).

Проверка двигателей по нагреву дает $M_{\kappa\sigma}^e = 117$ тм < 143 тм, $M_{\kappa\sigma}^z = 20,5$ тм $< 28,6$ тм и показывает, что прокатка за 11 пропусков вполне возможна и даже при более низкой температуре начала прокатки (1170°).

Дальнейшее сокращение числа пропусков уже вызывает перегрузку двигателей.

Расчет режима прокатки слитка 5,58 т на заготовку 240×300 мм — Ст. 3

№ калибра	№ проп./ска	h_1	b_1	Δh	L_1	ρ	t_c	P	M_{np}	n_y	n_m	n_z	N_1	N_p	N_n	N_z
I калибр $D_p = 1000$	0	695	695	—	2,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1	600	695	50	2,2	5,3	218	800	201	45 ¹	45	18	0,7	—	0,135	0,835
	2	540	700	60	2,2	5,4	173	655	135	18	45	45 ²	0,7	0,135	—	0,835
	3	600	540	100	2,2	5,5	224	670	172	47 ¹	47	23 ²	0,7	—	0,22	0,92
	4	530	555	70	2,45	5,6	187	580	128	16	36	20	0,78	0,11	0,17	1,06
	5	460	570	70	2,75	5,7	187	610	134	19	38,5	22	0,88	0,15	0,20	1,23
II калибр $D_p = 900$	6	390	585	70	3,15	5,8	187	635	140	22	54	54 ²	1,00	0,20	—	1,20
	7	505	405	80	3,50	5,9	190	455	102	20 ¹	55,5	50	1,24	0,17	0,52	1,93
	8	420	425	85	4,05	6,0	195	495	113	10 ¹	53	36	1,43	0,04	0,27	1,74
	9	360	440	80	4,55	6,1	190	510	114	20 ¹	57,5	36	1,61	0,17	0,27	2,05
III калибр $D_p = 950$	10	280	456	80	5,65	6,2	190	540	121	20 ¹	72	72 ²	2,00	0,17	—	2,17
	11	366	300	90	6,55	6,3	207	390	94	15 ¹	65	40	2,22	0,09	0,33	2,62
	12	281	320	85	8,00	6,5	201	420	98	20 ¹	75	75 ²	2,68	(2,17)	—	(0,51)
	13	240	300	80	10,0	6,7	195	390	89	25 ¹	75	75 ²	3,36	(2,09)	—	(1,27)
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

¹ По условиям захвата.² По $n_y = n_m = 47$ об/мин.³ $n_3 = n_m$.⁴ $n_3 = n_n$.

Табл. 13 (продолжение)

№ калибра	№ пропуска	t_y	t_p	t_y	t_n	t_z	t_n	t_m	M_y	M_z	$M_y^2 t_y$	$M_z^2 t_z$	$\Delta M_y^2 t_y$	$\Sigma M^2 t$	τ	$M_{кв}$
I калибр $D_p = 1000$	0	—	$a_p = 30^1$	$a_y = 20$	—	$b_z = 20^1$	$b_0 = 30^1$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1	5,0	1,50	—	—	1,35	0,60	1,35	—	129	—	22500	—	22500	3,45	90
	2	1,2	0,60	1,35	—	—	1,50	1,35	177	—	42300	—	—	42300	3,45	118
	3	4,8	1,57	—	—	1,20	0,77	1,20	—	(110)	—	14500	—	14500	3,54	74
	4	1,3	0,53	1,00	—	0,80	0,67	1,80	169	115	28600	10600	—	39200	3,0	121
	5	1,3	0,64	0,98	—	0,83	0,75	1,81	175	122	30000	12400	—	42400	3,2	122
II калибр $D_p = 900$	6	1,3	0,55	1,50	—	—	1,35	1,60	182	—	53000	—	—	53000	3,5	129
	7	4,1	0,50	1,78	—	0,14	1,25	1,92	140	60	34600	500	—	35400	3,67	105
	8	1,5	0,25	2,15	—	0,43	0,90	2,58	152	72	49600	2200	—	51800	3,73	123
	9	1,4	0,50	1,88	—	0,54	0,90	2,42	153	74	44000	3000	1200	48200	3,82	118
III калибр $D_p = 950$	10	1,4	0,50	2,60	—	—	1,80	2,60	161	—	67400	—	14300	81700	4,9	133
	11	3,6	0,38	2,50	—	0,65	1,00	3,13	131	51	42900	1600	4300	48800	4,51	109
	12	1,5	0,50	2,75	0,41	—	1,88	3,16	136	(163) ²	50900	(10900)	13000	74800	5,54	120
	13	3,6	0,63	2,50	1,02	—	1,88	3,52	126	(149) ²	39700	(22600)	11100	73400	6,03	114
—	—	32,0	—	—	—	—	—	28,44	—	—	—	—	—	628200	—	—

¹ С 6 пропуска $a_p = b_0 = b_z = 40$.² θM_n .

Удельная чистая работа прокатки по расчету составила 5,1 квт-ч/т.

Пример 2. Для блюминга 1150 с типовым электроприводом 7000 л. с. $n = 0-50-120$ об/мин рассчитать рациональный режим прокатки блюмса 240×300 мм из слитка размерами $695 \times 695 \times 2200$ мм весом 5,6 т.

Ускорения приняты из табл. на стр. 106.

Маховой момент установки $GD^2 = 450$ тм².

Весь расчет и остальные данные сведены в табл. 13. Прокатку принимаем в 13 пропусков. Обжатия в 1 и 3 пропусках повышены, учитывая конусность слитка. Повышение обжатий по ходу прокатки принято в целях более равномерной нагрузки двигателя.

В 9 пропусках (1, 3, 7—13) скорость захвата лимитируется условиями захвата (рис. 1).

В трех случаях взято наивыгоднейшее соотношение $n_3 = n_y$ (между 1—2, 4—5 и 5—6 пропусками).

Во 2, 6 и 10 пропуске выброс на кантовку произведен при максимальной скорости $n_3 = n_m$.

В 3-м пропуске захват произведен при максимальной скорости $n_y = n_m$, исходя из полного использования предыдущей паузы.

В 12 и 13-м пропусках имеется период постоянной скорости при 75 об/мин. Дальнейшее повышение скорости резко повышает среднеквадратичный момент.

При начальной паузе $T = 5$ сек. среднеквадратичный момент получился 105 тм, т. е. больше номинального $M_n = 100$ т¹.

Однако, принимая во внимание неравномерность темпа и мелкие задержки, которые практически имеют место в пределах до 10% (коэффициент использования стана), при среднем цикле прокатки 66,5 сек. двигатель не будет перегружен.

¹ $\Sigma M_p^2 t_p + \Sigma M_0^2 t_0 = 36\,800$ (тм)² сек. не входят в табл. 13 и вычислены отдельно.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Тягунов, Расчет и увеличение производительности реверсивных станов. Труды УПИ, сб. 19, Metallurgizdat, 1944.
2. В. А. Тягунов, Рациональная калибровка листовых станов, Metallurgizdat, 1944.
3. Проф. А. П. Виноградов, Определение производительности блюминга, Домез, 9, 1932.
4. Г. Фокс, Некоторые данные по блюмингам США, Домез, 6, 1935.
5. М. Л. Зарошинский, Производительность блюминга. Сталь, 3, 1939.
6. А. А. Александров, К расчету производительности блюминга, Сталь, 11—12, 1940.
7. М. Л. Зарошинский, Прокатка стали, Metallurgizdat, 1948.
8. В. А. Тягунов, Рациональные режимы обжатий при прокатке тонких листов, Metallurgizdat, 1949.
9. А. А. Александров, Блюминги и слябинги, Metallurgizdat, 1949.
10. Н. А. Тищенко, Рациональный электропривод автоматического блюминга, «Вестник электропромышленности», 9, 1940.
11. Б. П. Зувев, Передовые методы работы вальцовщиков Кузнецкого блюминга, г. Сталинск, 1951.
12. Передовые методы труда новаторов черной металлургии. Сборник, Metallurgizdat, 1952.
13. А. Ф. Головин, Прокатка, ч II, ОНТИ, 1934.
14. В. А. Тягунов, Режимы прокатки на реверсивных станах. Труды УПИ, сб. 45, Машгиз, 1953.
15. Материалы по теории прокатки. ч. I, Metallurgizdat, 1934.
16. В. А. Тягунов, Анализ формул расчета удельных давлений. Труды УПИ, сб. 48, Машгиз, 1953.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Условные обозначения, принятые в книге	5
Введение	8
Глава I. Режим обжатий	11
Условия захвата	—
Мощность двигателя	17
Прочность рабочих валков	20
Качество металла	27
Число пропусков и схема обжатий при прокатке блюмсов	29
Число пропусков и схема обжатий при прокатке слэбов	35
Глава II. Режим скоростей	37
Схемы скоростей прокатки в одноклетевых станах	38
Схемы прокатки в реверсивных станах, имеющих непрерывно-связанные клетки	44
Схемы скоростей слэбинга	45
Взаимосвязь пауз и машинного времени	49
Паузы в реверсивных станах	57
Глава III. Динамический режим	68
Соотношение между моментом прокатки (M_d) и моментами двигателя (M_n и $M_{\max}$) при наивыгоднейшей схеме скоростей (тип I)	—
Соотношение между моментом прокатки и моментами двигателя при прокатке с постоянной скоростью (тип II) (схемы скоростей)	75
Сравнение прокатки при постоянной скорости (тип II) прокаткой без периода постоянной скорости (тип I)	79
Соотношение между моментом прокатки и моментами двигателя при смешанной схеме скоростей (тип III)	81
Глава IV. Теоретические методы расчета режимов прокатки	87
Метод А. П. Виноградова	—
Метод Г. Фокса	90
Метод М. Л. Зарошинского	91
Метод А. А. Александрова	95
Метод Н. А. Тищенко	98
Первоначальный метод автора	102
Глава V. Практические методы обобщения передового опыта	103
Метод КМК	—
Метод ММК	111
Глава VI. Расчет наивыгоднейших режимов работы реверсивных станов	113
Методика расчета	—
Примеры расчета	130
Литература	135

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать	По вине
39	3 сн.	N_y	N_{y2}	корр.
40	14 св.	(t_m) мин.	(t_m) мин	авт.
44	3 св.	v	a	тип.
45	ф-ла (44)	γ_3	λ_3	корр.
		b	b_2	авт.
47	ф-ла (47)	p_{32}^2	p_{32}^2	корр.
48	4 сн.	p_2	p_{32}	тип.
50	1, 2 сн.	везде вместо p_y и p_3 нужно p_x		авт.
55	5 св.	25,7	26,7	"
62	17 св.	$2 v_6$	$2 v_3$	корр.
91	18 сн.	$\frac{p_{3k}}{b} = \frac{p_{yк}}{a}$	$\frac{p_{3k}}{b} + \frac{p_{yк}}{a}$	авт.
130	13 сн.	бисле	числе	тип.
130	12 сн.	чольше	больше	"

В. А. Тягунов