

## ОБ АЛГОРИТМЕ УПРАВЛЕНИЯ НАЖИМНЫМ УСТРОЙСТВОМ ТОЛСТОЛИСТОВОГО СТАНА

Процесс прокатки толстых листов отличается от процесса прокатки блюмов и слябов следующими особенностями:

а) на величину усилий и моментов прокатки значительное влияние оказывает увеличение твердости прокатываемого металла к концу прокатки в результате постепенного снижения температуры и повышения скорости деформирования металла;

б) получение листов заданной толщины усложняется тем, что упругие деформации клетки соизмеримы по величине с толщиной прокатываемых листов;

в) на одном и том же стане приходится прокатывать весьма разнообразный сортамент листов, отличающихся не только размерами, но также химическим составом металла и весом исходных заготовок.

В результате этих особенностей автоматизация нажимных устройств на основе жестких программ, подобных применяемым на слябингах и блюмингах, для толстолистовых станов оказывается малоэффективной [1, 2, 5]. Так, непостоянство размеров и температуры нагрева слитков приводит к тому, что твердость прокатываемого металла от пропуска к пропуску меняется по-разному даже у стали одной и той же марки. В результате программа обжатий, рассчитанная по усредненным значениям твердости металла, не соответствует оптимальным условиям прокатки, и стан испытывает значительные перегрузки или недогрузки по моменту и усилию. Это несоответствие весьма затрудняет получение листов заданной толщины. Большое разнообразие сортамента прокатываемых листов заставляет иметь много программ. Выбор нужной программы из их большого числа приводит к ошибкам и потерям времени.

Недостатков программной автоматки можно избежать, если для управления нажимным устройством использовать самонастраивающуюся систему автоматического управления. Такая система на основании полученной информации о процессе прокатки данного слитка в уже совершенных пропусках, которые можно считать пробными, и определенного алгоритма управления рассчитывает величину обжатия для следующего пропуска таким образом, чтобы выполнить установленные требования—полное использование энергосиловых возможностей стана или получение заданной толщины листа с максимальной точностью. В этой статье процесс прокатки представлен в виде математических уравнений, которые могут быть поло-

жены в основу алгоритма управления нажимным устройством стана при разработке указанной системы.

В общем случае величина обжатий ограничивается в первых пропусках условиями захвата металла валками, затем величиной допустимого момента и впоследствии величиной допустимого усилия прокатки (рис. 1). Оптимальным с точки зрения производительности стана будет такой процесс прокатки, при котором величина обжатия в каждом пропуске имеет значения, определенные из вышеупомянутых граничных условий.

В зоне ограничения по условию захвата (первая зона) обжатие во всех пропусках должно быть равно определяемой из опыта постоянной величине

$$\Delta h = \text{const.} \quad (1)$$

В зонах ограничения по моменту и усилию прокатки величина обжатия в каждом пропуске должна быть такой, чтобы фактический момент

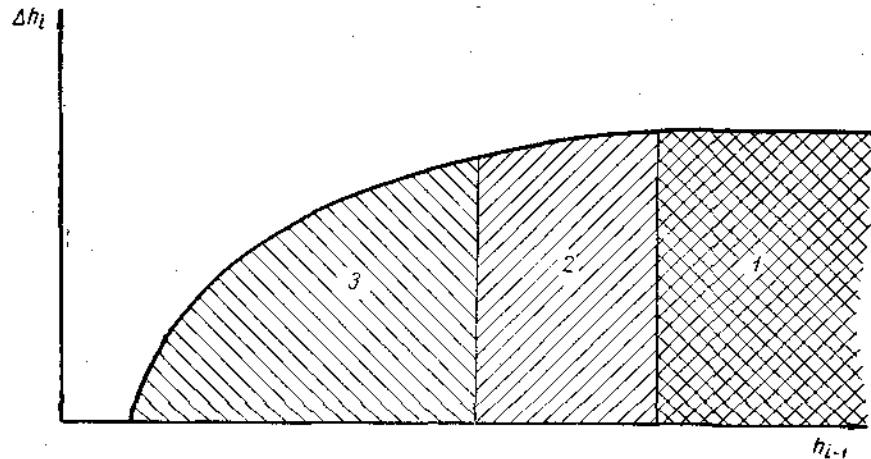


Рис. 1. Зоны ограничений величины обжатия при прокатке толстых листов: 1 — по условию захвата; 2 — по величине наибольшего допустимого момента прокатки; 3 — по величине наибольшего допустимого усилия прокатки.

или усилие прокатки были равны наибольшим допустимым значениям момента  $M_{\text{дп}}$  и усилия  $P_{\text{дп}}$ , определяемым мощностью двигателя и прочностью прокатных валков.

Усилие прокатки  $P_i$  в  $i$ -ом пропуске на толстолистовом стане, где можно пренебречь сплющиванием валков, определяется по уравнению

$$P_i = \rho_i \cdot b_i \sqrt{r \Delta h_i}, \quad (2)$$

где  $\rho_i$  — удельное давление металла на валки,  $\text{кг/мм}^2$ ;  
 $b_i$  — ширина прокатываемого листа в  $i$ -ом пропуске, мм;  
 $\Delta h_i$  — обжатие за пропуск, мм;  
 $r$  — радиус вала, мм.

Теоретические исследования ряда авторов [3, 6, 4] показали, что удельное давление можно представить в виде произведения

$$\rho_i = 1,15 \bar{\sigma}_i \cdot f(\Delta h_i, h_{i-1}), \quad (3)$$

где  $\bar{\sigma}_i$  — средняя твердость металла в  $i$ -ом пропуске;  
 $\Delta h_i = h_{i-1} - h_i$  — обжатие;  
 $h_i$  — выходная толщина прокатываемого листа в пропуске;  
 $h_{i-1}$  — входная толщина в этом пропуске.

Чтобы рассчитать величину обжатия для  $i+1$ -го пропуска на основании полученной информации о процессе прокатки в  $i$ -м и  $i-1$ -м пропусках, возьмем отношение усилий прокатки в двух смежных пропусках

$$\frac{P_{i+1}}{P_i} = \frac{\bar{\sigma}_{i+1}}{\bar{\sigma}_i} \cdot \frac{\sqrt{\Delta h_{i+1}}}{\sqrt{\Delta h_i}} \cdot \frac{f(\Delta h_{i+1}, h_i)}{f(\Delta h_i, h_{i-1})}$$

или

$$\frac{P_{i+1}}{P_i} = \frac{\bar{\sigma}_{i+1}}{\bar{\sigma}_i} \cdot F(\Delta h_{i+1}, h_i, h_{i-1}), \quad (4)$$

где  $F(\Delta h_{i+1}, h_i, h_{i-1})$  определяется только геометрией зоны деформации и со свойствами прокатываемого металла не связана;  $h_i$  и  $h_{i-1}$  известны из совершенных пропусков.

Среднее сопротивление деформации  $\bar{\sigma}$  зависит от химического состава металла, температуры его, скорости и степени деформации. Однако, как показали исследования авторов, увеличение  $\bar{\sigma}$  по мере уменьшения тол-

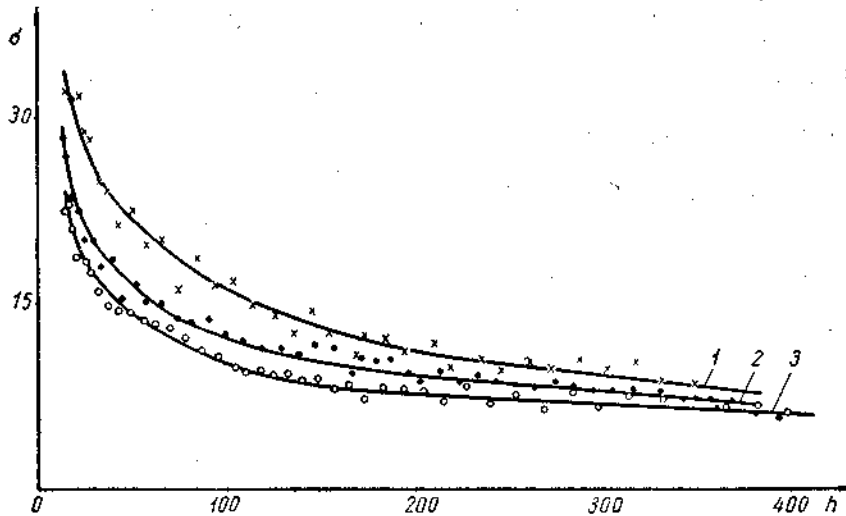


Рис. 2. Изменение среднего сопротивления деформации стали при прокатке: 1 — сталь СХЛ-4; 2 — сталь О9Г2; 3 — ст. 3.

щины листа в процессе прокатки происходит по монотонной кривой, так как температура металла и скорость деформации от пропуска к пропуску с уменьшением толщины меняются постепенно. На рис. 2 показаны кривые изменения  $\bar{\sigma}$  у слитков марок стали СХЛ-4, О9Г2 и ст. 3.

В связи с тем, что температура и химический состав слитков не могут быть строго постоянными, у каждого слитка имеется своя монотонная кривая изменения  $\bar{\sigma}$ . Как видно из рис. 3, кривые изменения  $\bar{\sigma}$  даже для одной марки стали ст. 3 для разных слитков различны.

Для расчета обжатий необходима не вся кривая, а только ряд точек на ней, каждая из которых соответствует определенному пропуску и отстоит друг от друга на расстоянии, равном величине обжатия в данном пропуске.

Отношение значений твердости металла в соседних пропусках  $\frac{\bar{\sigma}_{i+1}}{\bar{\sigma}_i}$  опре-

делим из условия монотонности кривой  $\bar{\sigma} = \sigma(h)$ . Аппроксимируем участок кривой между  $i+1$ -м и  $i-1$ -м пропусками прямой линией и рассмотрим два

подобных треугольника, образованных приращениями твердости металла относительно твердости в  $i-1$ -м пропуске (рис. 4). Из подобия треугольников

$$\frac{\Delta \bar{\sigma}_{i+1}}{\Delta \sigma_i} = \frac{\Delta h_i + \Delta h_{i+1}}{\Delta h_i} = 1 + \frac{\Delta h_{i+1}}{\Delta h_i}, \quad (5)$$

где

$$\Delta \bar{\sigma}_{i+1} = \bar{\sigma}_{i+1} - \bar{\sigma}_{i-1}, \quad (6)$$

$$\Delta \bar{\sigma}_i = \bar{\sigma}_i - \bar{\sigma}_{i-1}. \quad (7)$$

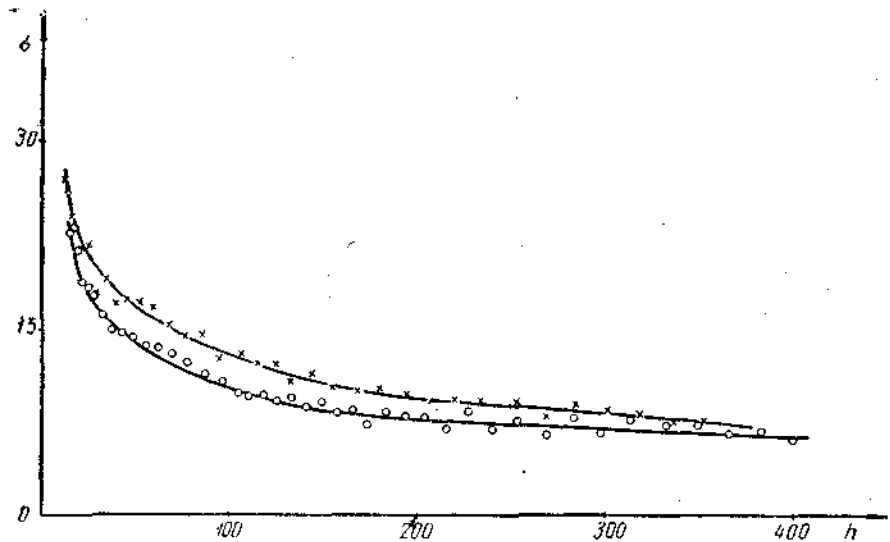


Рис. 3. Изменение среднего сопротивления деформации ст. 3 двух слитков разных партий.

В уравнение (4) подставим  $\bar{\sigma}_{i+1}$  из (6) и  $\Delta \bar{\sigma}_{i+1}$  из (5):

$$\frac{P_{i+1}}{P_i} = \left[ \frac{\bar{\sigma}_{i-1}}{\bar{\sigma}_i} + \frac{1 + \frac{\Delta h_{i+1}}{\Delta h_i}}{\bar{\sigma}_i} \Delta \bar{\sigma}_i \right] F_{i+1}, \quad (8)$$

где для краткости обозначения принято

$$F_{i+1} = F(\Delta h_{i+1}, h_i, h_{i-1}).$$

После подстановки значения  $\Delta \bar{\sigma}_i$  из (7) и соответствующих преобразований уравнение (8) принимает вид

$$\frac{P_{i+1}}{P_i} = \left[ 1 + \frac{\Delta h_{i+1}}{\Delta h_i} \left( 1 - \frac{\bar{\sigma}_{i-1}}{\bar{\sigma}_i} \right) \right] F_{i+1}. \quad (9)$$

Из уравнения (4) для  $i$ -го пропуска

$$\frac{\bar{\sigma}_{i-1}}{\bar{\sigma}_i} = \frac{F_i}{P_{i-1}},$$

где для краткости обозначения принято

$$F_i = F(\Delta h_i, h_{i-1}, h_{i-2}),$$

После подстановки в уравнение (9) имеем

$$\frac{P_{i+1}}{P_i} = \left[ 1 + \frac{\Delta h_{i+1}}{\Delta h_i} \left( 1 - \frac{F_i}{P_i/P_{i-1}} \right) \right] \cdot F_{i+1}. \quad (10)$$

Уравнение (10) позволяет находить величину обжатий в зонах ограничения по моменту и по усилию прокатки, а также рассчитывать усилие прокатки в последнем пропуске так, чтобы получать лист требуемой толщины.

Момент прокатки  $M_i$  выражается через усилие уравнением

$$M_i = 2P_i(x_i \sqrt{r \cdot \Delta h_i + r_{шк} \cdot \eta}), \quad (11)$$

где  $x_i$  — коэффициент, зависящий от точки приложения усилия прокатки на длине дуги захвата;

$r_{шк}$  — радиус шейки вала;

$\eta$  — коэффициент трения в подшипниках вала.

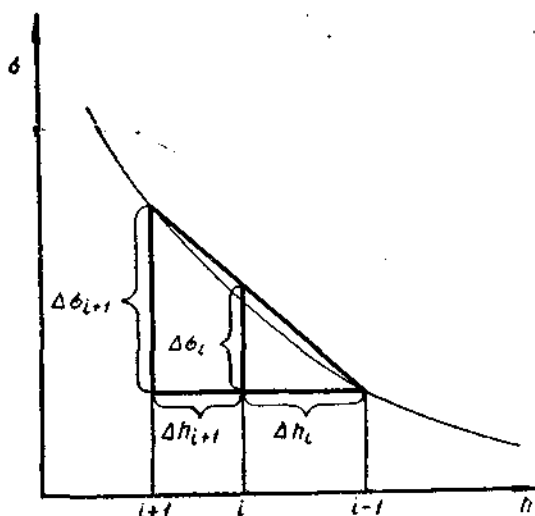


Рис. 4. Треугольники приращений среднего сопротивления деформации в смежных пропусках.

Взяв отношение моментов прокатки в двух смежных пропусках и выразив отношение  $\frac{P_{i+1}}{P_i}$  из (10), получим

$$\frac{M_{i+1}}{M_i} = \frac{x_{i+1} \sqrt{r \Delta h_{i+1} + r_{шк} \eta}}{x_i \sqrt{r \Delta h_i + r_{шк} \eta}} \cdot \left[ 1 + \frac{\Delta h_{i+1}}{\Delta h_i} \left( 1 - \frac{F_i}{P_i/P_{i-1}} \right) \right] \cdot F_{i+1}. \quad (12)$$

Если разложить первый сомножитель в ряд Тейлора и допустить, что коэффициенты  $x$  в смежных пропусках одинаковые, то с погрешностью не более 2% справедливо равенство

$$\frac{x_{i+1} \sqrt{r \Delta h_{i+1} + r_{шк} \eta}}{x_i \sqrt{r \Delta h_i + r_{шк} \eta}} \cong \sqrt{\frac{\Delta h_{i+1}}{\Delta h_i}}.$$

После подстановки этого приближенного значения первого сомножителя в уравнение (12) имеем

$$\frac{M_{i+1}}{M_i} = \sqrt{\frac{\Delta h_{i+1}}{\Delta h_i}} \cdot \left[ 1 + \frac{\Delta h_{i+1}}{\Delta h_i} \left( 1 - \frac{F_i}{P_i/P_{i-1}} \right) \right] \cdot F_{i+1}. \quad (13)$$

В зоне ограничения по моменту прокатки величина обжатия в каждом пропуске должна быть такой, чтобы фактический момент прокатки был равен постоянной величине  $M_{дп}$ , рассчитанной из условий нормальной загрузки главного двигателя.

Полагая в уравнении (13)  $M_{i+1} = M_{дп}$ , находим значение  $\Delta h_{i+1}$  в зоне ограничения по моменту. Значение момента  $M_i$  можно определить по величине тока главного двигателя или из уравнения (11).

Полагая в уравнении (10)  $P_{i+1} = P_{дп}$ , находим значение  $\Delta h_{i+1}$  в зоне ограничения по усилию прокатки. Усилие прокатки известно непосредственно, если прокатный стан снабжен соответствующим силоизмерительным устройством.

Наконец, уравнение (10) позволяет определить усилие в последнем пропуске из условия получения заданной толщины листа. В этом случае требуемое обжатие известно, следовательно, усилие  $P_{i+1} < P_{дп}$  находится из уравнения (10) путем подстановки в это уравнение известного значения  $\Delta h_{i+1} = \Delta h_n$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. Фауссен. Система автоматического управления нажимным и винтами блюминга — слябинга с самоустанавливающейся программой. Тр. I Международного конгресса ИФАК, т. 6, М., Изд-во АН СССР, 1961.
2. Л. Н. Брэмли, С. С. Карлайл, Р. Б. Симс. Некоторые направления автоматизации прокатного производства. Тр. I Международного конгресса ИФАК, т. 6, М., Изд-во АН СССР, 1961.
3. М. Я. Бровман. Исследование деформации металла при прокатке на непрерывно-заготовочных станах. Сообщ. АН Грузинской ССР, т. 26, № 1, 1960.
4. Д. И. Суяров, М. А. Беняковский. Настройка листопрокатных станов. Свердловск, Metallurgizdat, 1960.
5. K. Burdick. Digital Computer Runs Hot Plate mill Control Engineering, № 1, 1960, p. 126—130.
6. R. B. Sims. The Calculation of Roll Force and Torque in Hot Rolling Mills. Proceedings of the Institution of mechanical Engineers, vol. 168, № 6, 1954.