

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ НА ОПТИМИЗАЦИЮ ПРОГРАММ НАСТРОЕК СТАНА

© 2011 С. Ф. Тлустенко

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Повышение эффективности оптимизации режимов обжатия в автоматизированных прокатных станах связано с разработкой теоретических моделей и принципов систематизации многочисленных факторов с целью выработки управляющими системами необходимых значений перемещений нажимных устройств клетей.

*Прокатный стан, оптимальные обжатия, давление, силы, корректировка положения.*

Устойчивость работы прокатного стана как системы, в состав которой входит  $n$  клетей, обеспечивается правильной математической формализацией всех возможных её состояний в любой момент времени, а также учётом начальных условий и внешних воздействий. Согласно теории управления и устойчивости изучаемые процессы отнесём к классу непрерывных систем и систем с последействием, и соответственно воздействия разделим на управляющие и возмущающие.

Разнообразные неопределённые факторы, действующие на систему, связаны с зависимостью усилий прокатки от начальных размеров заготовки, жёсткости клетей, температуры заготовки, углов захвата, степеней обжатия, упрочнения и др. Тогда текущее состояние системы описывается  $m$ -мерным фазовым вектором  $X$ , возмущения –  $s$ -мерным вектором  $Y$ , управление –  $r$ -мерным вектором  $U$ , где  $m, r, s$  – натуральные числа. Для каждой системы прокатки все вектор-функции определяемы и дифференцируемы для допустимых кусочно-непрерывных реализаций управлений  $U(t)$ , возмущений  $\delta(t)$  и движений  $x(t)$ . Изменение вектора  $x$  во времени определяется векторным дифференциальным уравнением

$$\dot{x}' = f(t, x, u, \delta),$$

где вектор – функция  $f$  задана для  $t_0 \leq t \leq \eta$ ,  $-\infty < x_i < \infty$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), область значений “ $u$ ” и “ $\delta$ ” – заданные множества.

Считаем, что функция  $f$  при каждом фиксированном значении  $t \in [t_0, \eta]$  непрерывна при данных сочетаниях переменных  $x, u, \delta$ . При фиксированных значениях  $x, u, \delta$  функция  $f$  измерима по  $t$ . Также примем, что при  $|x| \leq R$  имеем

$$|f'(t, x^{(1)}, u, \delta) - f(t, x^{(2)}, u, \delta)| \leq \lambda_R^{(4,5)} |x^{(1)} - x^{(2)}|$$

для всех  $|x^{(1)}| \leq R$ ,  $|x^{(2)}| \leq R$ , и для всех возможных значений  $t, x, u, \delta$  выполняется неравенство

$$|f(t, x, u, \delta)| \leq \lambda_R^{(4,5)} (1 + |x|),$$

где  $\lambda_R^{(4,5)}$  – заданная по условиям прокатки постоянная,  $R$  – дискретно-непрерывные подобласти значений  $x$ .

Проведём анализ различных вариантов сочетаний указанных переменных с целью выбора оптимальных способов коррекции параметров прокатки в условиях автоматизации процессов.

Если коррекция процесса производится в случае определяющего влияния на точность межклетевых сил подпора или натяжения, то система автоматического управления должна реагировать на отклонения за счёт изменения параметров, определяющих значения поправочных коэффициентов  $C_{\sigma i}^j$  на размеры проката в зависимости от нали-

чия и соотношения сил натяжения и подпора:

$$\Delta B_{\sigma i}^j = \Delta B_{\max}^0 \cdot C_{\sigma i}^j,$$

где  $\Delta B_{\max}^0$  и  $\Delta B_{\sigma i}^j$  - абсолютное уширение при отсутствии межклетевых сил и при их наличии.

$$C_{\sigma 0}^H = 1 - \frac{\sigma_0 / 2k}{4,6 \frac{\mu}{\Delta h} \cdot l_{OT} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1}} - \text{при заднем}$$

натяжении;

$$C_{\sigma i}^H = 1 - \frac{\sigma_i / 2k}{5,29 \cdot \frac{\mu}{\Delta h} \cdot (l_{OT} + l_{OP}) \cdot \ln \frac{h_0}{h_1}} - \text{при}$$

переднем натяжении;

$$l_{OT} = \frac{1}{2} \left( l_o + \frac{\Delta h}{2\mu} \right) - \text{длина зоны отставания};$$

$$l_{OP} = \frac{1}{2} \left( l_o - \frac{\Delta h}{2\mu} \right) - \text{длина зоны опережения},$$

где  $l_o$  - длина дуги захвата;  $\mu$  - коэффициент трения;  $h_o, h_i$  - толщина проката на входе и выходе очага деформации:

$$K = \sigma_s / 2,$$

где  $\sigma_s$  - напряжение пластической деформации.

Следовательно, основным регулируемым параметром может быть степень деформации металла при прокатке и связанная с ней вытяжка, или относительное удлинение проката.

Алгоритмы расчёта режимов обжатий при подготовке программного обеспечения для управления прокатным станом, в состав которого входит некоторое количество клетей, связана с учётом разного рода ограничений. На практике невозможно использовать единый чётко сформулированный принцип распределения обжатий с учётом всех

технологических факторов. Задача заключается в разработке способа перераспределения обжатий по клетям, то есть перемещения нажимных устройств клетей по заданному закону определения подачи управляющих импульсов тока в зависимости от фактической толщины проката. Учитываемые факторы разделим на условно-постоянные (допустимая выработка валков, точность проката, марка стали, геометрические размеры слитка, заданная начальная температура слитка, угол захвата и др.) и переменные (фактические температура, химсостав, толщина заготовки, механические свойства, а также соотношение межклетевых сил и их влияние на точность проката, характер перераспределения абсолютных обжатий по переходам и др.).

Сопоставляя изменения давлений в клетях стана, представляется возможным определить причины этих изменений.

Рассмотрим соотношения, определяющие величины давления металла на валки в зависимости от входной толщины металла  $H$ , его механических свойств  $\eta$  и начальной величины зазора между валками  $S_0$  (при отсутствии металла).

При заданной величине начального зазора  $S_0$  между валками и входной толщине  $H$  выходная толщина  $h$  определяется точкой пересечения прямой  $P = C(h - S_0)$ , определяющей величину упругой деформации  $(h - S_0)$  клетки под действием сил давления в валках  $P$ , и зависимостью величины давления от обжатия  $f(H - h) = P$ . Последняя функция является нелинейной, и её аналитическое выражение имеет весьма сложный вид. Для конкретных изделий и условий прокатки при необходимости уточняются методики определения величин давления металла на валок с учётом сил трения и влияния межклетевых сил на соотношение обжатия и уширения заготовки при непрерывной прокатке.

В качестве критерия эффективности деформации и связанного с ним давления прокатки можно использовать отношение объёма металла, смещённого в продольном направлении, к объёму, смещённому по высоте.

При этом в программе управления станом учитываются как геометрические, так и силовые параметры условий прокатки в зависимости от сочетания доминирующих факторов для различных изделий и процессов. Например, для полосы

$$P_i = (p_0)_i \left[ 0,315 \mu_i S_i + \sqrt{1 + (0,315 \mu_i S_i)^2} (b_{cp})_i \sqrt{D_i \Delta h_i / 2} \right],$$

где  $(p_0)_i$  - полезное давление прокатки;  $P_i$  - эффективное давление металла;  $\mu_i$  - коэффициент трения при прокатке в  $i$ -ом проходе;  $S_i$  - коэффициент, характеризующий размеры очага деформации;  $D_i$  - катающий диаметр валка;  $\Delta h_i$  - абсолютное обжатие в  $i$ -ом проходе.

Графическое и аналитическое представление зависимости  $P(H)$  с увеличением числа учитываемых факторов существенно усложняется.

На рис. 1 приведены графические зависимости параметров, позволяющие найти выходную толщину  $h$ .

При изменении входной толщины  $H$  на  $\Delta H$  зависимость  $P = f(H - h)$  сдвигается по оси  $H$  на величину  $\Delta H$  и точка, соответствующая давлению  $P$ , оказывается сдвинутой на  $x\Delta H$ . Если пренебречь изменением кривизны зависимости  $P = f(H - h)$  в пределах изменения  $\Delta H$ , то кривая новой зависимости  $P = f(H + \Delta H - h)$  образует в районе рабочей точки треугольник  $abc$ , основание которого равно  $x\Delta H$ . Полагая, что  $\tan \beta$  угла наклона касательной кривой  $P = f(H - h)$  в рабочей точке к оси абсцисс, определяющий модуль жесткости прокатываемого металла, равен  $K$ , можно найти все стороны этого треугольника, так как  $\tan \alpha$  угла наклона прямой  $P = C(h - S_0)$  известен и равен  $\tan \alpha = C$  - модуль жесткости клетки. Искомые величины в этом треугольнике являются: высота  $bd$ ,

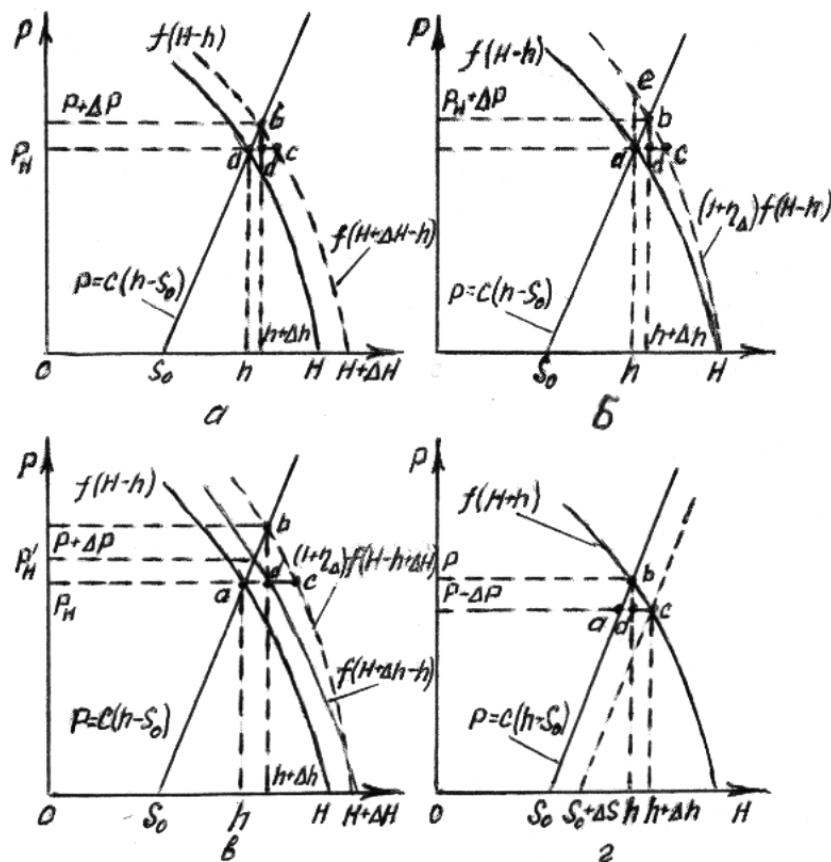


Рис. 1. Графики, иллюстрирующие зависимость  $\Delta P$  и  $\Delta h$  от толщины на входе в клеть, механических свойств металла и начального зазора между валками

определяющая приращение давления  $\Delta P$ , и отрезок  $ad$ , определяющий приращение выходной толщины:

$$bd = \Delta P = \frac{CK}{C+K} \chi \Delta H;$$

$$ad = \Delta h = \frac{K}{C+K} \chi \Delta H.$$

Разделив левую и правую части на  $\lambda_n h = H$ , где  $\lambda_n$  – номинальное удлинение металла в клети, найдём

$$\Delta h = \frac{K}{C+K} \lambda_n \chi \Delta H,$$

где  $\Delta h$  – относительное изменение выходной толщины;  $\Delta H$  – относительное изменение входной толщины.

Рассмотрим теперь, как влияет изменение механических свойств металла на давление металла на валки и выходную толщину. Обозначим относительное изменение пластических свойств металла через  $\eta_\Delta$  и примем, что это изменение вызывает увеличение функции  $f(H-h)$  в  $(1+\eta_\Delta)$  раз;  $p' = (1+\eta_\Delta)f(H-h)$ , т.е. при одном и том же обжатии давление металла на валки увеличивается в  $(1+\eta_\Delta)$  раз. На рис. 1, б приведен график, позволяющий определить приращение выходной толщины металла и приращение давления на валки. Если бы выходная толщина не изменилась, то ухудшение механических свойств металла вызывало бы увеличение давления на  $\eta_\Delta P_n$  (высота  $ae$  треугольника  $aec$ ). В этом треугольнике тангенс угла в вершине  $c$  равен

$$K' = \operatorname{tg} \beta' = (1+\eta_\Delta) \operatorname{tg} \beta = (1+\eta_\Delta) K.$$

Решая треугольник, найдём  $ae = ac \operatorname{tg} \beta$  или

$$ac = \frac{ae}{\operatorname{tg} \beta'} = \frac{\eta_\Delta}{1+\eta_\Delta} \cdot \frac{P_n}{K}.$$

Так же, как и ранее, по известным углам  $\alpha$  и  $\beta'$  и стороне  $ac$  найдём

$$bd = \Delta P = \frac{CK}{C+K} \cdot \frac{\eta_\Delta}{1+\eta_\Delta} P_n;$$

$$ad = \Delta h = \frac{1}{C+K} \cdot \frac{\eta_\Delta}{1+\eta_\Delta} P_n.$$

Учитывая, что  $1+\eta_\Delta \approx 1$ , можем принять

$$\Delta P = \frac{C}{C+K} h_\Delta P_n; \Delta h = \frac{\eta_\Delta}{C+K} P_n.$$

Разделив в выражении для  $\Delta h$  левую и

правую части на  $h = \frac{H}{\lambda_n}$ , получим

$$\Delta h = \frac{\eta_\Delta}{C+K} \lambda_n \frac{P_n}{H}.$$

В реальных условиях прокатки изменение давления может происходить одновременно как из-за изменения входной толщины, так и из-за изменения механических свойств или условия прокатки металла. На рис. 1, б приведён график, иллюстрирующий приращение  $\Delta P$  и  $\Delta h$  для этого случая. Отрезок  $ad$ , определяющий величину  $\Delta h$ , является частью основания  $ac$  треугольника  $abc$ . Это основание имеет две составляющие: первая, обусловленная приращением входной толщины на  $\Delta H$ , равна  $\chi \Delta H$ ; вторая обусловлена изменением механических свойств металла и равна

$$\frac{\eta_\Delta}{1+\eta_\Delta} \cdot \frac{P_n}{K}.$$

Следовательно:

$$ac = \chi \Delta H + \frac{\eta_\Delta}{1+\eta_\Delta} \cdot \frac{P_n}{K}$$

или приближённо

$$ac = \chi \Delta H + \eta_\Delta \cdot \frac{P_n}{K}.$$

В треугольнике  $abc$  помимо  $ac$  известны тангенсы углов в вершине  $a$  -  $tg \alpha = C$  и в вершине  $C$  -  $tg \beta = (1 + \eta_{\Delta})K$ , что позволяет найти

$$bd = \Delta P = \frac{CK(1+\eta_{\Delta})}{C+K(1+\eta_{\Delta})} \cdot \left( \chi \Delta H + \frac{\eta_{\Delta}}{1+\eta_{\Delta}} \cdot \frac{P_H}{K} \right).$$

Принимая  $1 + \eta_{\Delta} \approx 1$ , получим

$$\Delta P = \frac{CK}{C+K} \cdot \chi \Delta H + \frac{C}{C+K} \cdot \eta_{\Delta} P_H;$$

$$ad = \Delta h \approx \frac{CK'}{C+K} \cdot \chi \Delta H + \frac{1}{C+K} \cdot h_{\Delta} P_H,$$

так как  $1 + \eta_{\Delta} \approx 1$ .

Следовательно:

$$\Delta h = \frac{K}{C+K} \cdot \chi \Delta H + \frac{1}{C+K} \cdot \eta_{\Delta} P_H = \Delta h_{\Delta H} + \Delta h_{\eta_{\Delta}},$$

т. е. при одновременном воздействии изменений входной толщины и пластических свойств прокатываемого металла изменение выходной толщины имеет две составляющие: одну, обусловленную приращением входной толщины

$$\Delta h_{\Delta H} = \frac{K}{C+K} \cdot \chi \Delta H,$$

и вторую, обусловленную изменением механических свойств металла:

$$\Delta h_{\eta_{\Delta}} = \frac{1}{C+K} \cdot \eta_{\Delta} P_H.$$

Изменение выходной толщины и давления металла на валки может быть вызвано изменением начального положения нажимного устройства на некоторую величину  $\Delta S$ . На рис 1, г приведен график, позволяющий установить зависимость между  $\Delta S$ ,  $\Delta P$  и  $\Delta h$ . Как следует из графика, основание  $ac$  треугольника  $abc$  равно  $\Delta S$ .

Решая треугольник  $abc$ , найдём

$$bd = -\Delta P = \frac{CK}{C+K} \cdot \Delta S;$$

$$\begin{aligned} \Delta h = dc = ac - ad &= \Delta S - \frac{K}{C+K} \cdot \Delta S = \\ &= \frac{C}{C+K} \cdot \Delta S = \Delta S - \frac{\Delta P}{C}. \end{aligned}$$

При малых значениях  $\Delta S$ ,  $\Delta H$  и  $\eta_{\Delta}$  результирующее изменение толщины полосы на выходе из клетки может быть принято равным сумме изменений, обусловленных каждой из составляющих в отдельности:

$$\sum \Delta h = \frac{K}{C+K} \cdot \chi \Delta H + \frac{\eta_{\Delta}}{C+K} \cdot P_H + \frac{C}{C+K} \cdot \Delta S;$$

$$\sum \Delta P = \frac{CK}{C+K} \cdot \chi \Delta H + \frac{C\eta_{\Delta}}{C+K} \cdot P_H - \frac{CK}{C+K} \cdot \Delta S.$$

Примем, что при прокатке данного сляба в первой клетке месдозы этой клетки зафиксировали превышение номинального для полосы данного типоразмера давления на величину  $\Delta P_1$ . При неизменном положении нажимного устройства ( $\Delta S_1 = 0$ ) это увеличение давления может быть вызвано как увеличением входной толщины относительно номинального значения, так и отклонением механических свойств металла от номинальных. При увеличении давления на  $\Delta P_1$  выходная толщина увеличится на

$$\frac{\Delta P_1}{C_1} = \Delta h_1 = \Delta H_2.$$

Пусть при прокатке этого же сляба во второй клетке давление на валки будет превышать номинальное на  $\Delta P_2$ .

Согласно изложенному выше

$$\Delta P_2 = \frac{C_2 K_2}{C_2 + K_2} \cdot \chi_2 \frac{\Delta P_1}{C_1} + \frac{C_2}{C_2 + K_2} P_H \eta_{\Delta},$$

где индекс 2 указывает на номинальные параметры прокатки во 2-й клетке.

Решая полученное уравнение относительно неизвестной  $\eta_{\Delta}$ , получим

$$\eta_{\Delta} = \frac{C_2 + K_2}{C_2 P_{H_2}} \cdot \Delta P_2 - \frac{K_2}{C_1} \frac{\chi_2}{P_{H_2}} \Delta P_1.$$

Таким образом, на основании замера отклонения давления металла на валки в первой и второй клетях черновой группы от номинальных для полосы данного типоразмера значений определяется относительное отклонение механических свойств прокатываемого металла от номинальных. По замеренной величине  $\Delta P_2$  (при неизменной величине  $\Delta S_2$ ) находится  $\Delta h_2 = \frac{\Delta P_2}{C_2}$ , которое является приращением входной толщины металла в третьей клетке:

$$\Delta H_3 = \Delta h_2 = \frac{\Delta P_2}{C_2}.$$

По величинам  $\Delta H_3$  и  $\eta_{\Delta}$  легко найти требуемое перемещение верхнего вала  $\Delta S_3$  третьей клетки, при котором толщина металла, выходящего из этой клетки, была бы номинальной ( $\Delta h_3 = 0$ ).

Согласно изложенному выше

$$\begin{aligned} \Delta h_3 = & \frac{K_3}{C_3 + K_3} \cdot \chi_3 \frac{\Delta P_2}{C_2} + \frac{C_2 + K_2}{C_2 P_{H_2}} \times \\ & \times \left( \Delta P_2 - \frac{C_2}{C_2 + K_2} \frac{K_2}{C_1} \chi_2 \Delta P_1 \right) \times \\ & \times \frac{P_{H_3}}{C_3 + K_3} + \Delta S_3 \frac{C_3}{C_3 + K_3} = 0, \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} -\Delta S_3 = & \frac{1}{C_2 C_3} \times \\ & \times \left[ \left( K_3 \chi_3 + \frac{C_2 + K_2}{P_{H_2}} \Delta P_3 \right) \Delta P_2 - \frac{C_2}{P_{H_2}} \frac{K_2}{C_1} \chi_2 \Delta P_1 \right]. \end{aligned}$$

Корректировка положения верхнего вала третьей клетки осуществляется сразу по завершении прокатки сляба во второй клетке и, следовательно, к моменту захода металла в третью клетку обжатие в ней уже уточнено и обеспечивает выходную толщину, равную номинальной.

Из-за уменьшения начального зазора между валками и ухудшенными по сравнению с номинальными механическими свойствами металла давление металла на валки в третьей клетке будет превышать номинальное. Это превышение может отличаться от расчётного из-за некоторого снижения температуры металла за время прокатки, т. е. из-за дополнительного ухудшения его механических свойств. Поэтому после прокатки сляба в третьей клетке и измерения  $\Delta P_3$  необходимо произвести новый расчёт  $\eta_{\Delta}$  и по уточненному значению  $\eta_{\Delta}$  рассчитать требуемое перемещение  $\Delta S_4$  верхнего вала четвертой клетки, при котором толщина металла на выходе из этой клетки не отклонялась бы от номинальной.

В общем виде уравнения для  $\Delta P$  в двух последовательно расположенных клетях имеют вид:

$$\Delta P_i = \frac{C_i K_i}{C_i + K_i} \cdot \chi_i \Delta H_{i-1} + \frac{C_i \eta_{\Delta i}}{C_i + K_i} \cdot P_{H_i} - \frac{C_i K_i}{C_i + K_i} \cdot \Delta S_i;$$

$$\Delta h_i = \frac{K_i}{C_i + K_i} \cdot \chi_i \Delta H_{i-1} + \frac{\eta_{\Delta i}}{C_i + K_i} \cdot P_{H_i} + \frac{C_i}{C_i + K_i} \cdot \Delta S_i;$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{i+1} = & \frac{C_{i+1} K_{i+1}}{C_{i+1} + K_{i+1}} \cdot \chi_{i+1} \Delta h_i + \frac{C_{i+1} \eta_{\Delta i}}{C_{i+1} + K_{i+1}} \cdot P_{H_{i+1}} - \\ & - \frac{C_{i+1} K_{i+1}}{C_{i+1} + K_{i+1}} \cdot \Delta S_{i+1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta h_{i+1} = & \frac{K_{i+1}}{C_{i+1} + K_{i+1}} \cdot \chi_{i+1} \Delta h_i + \frac{\eta_{\Delta i}}{C_{i+1} + K_{i+1}} \cdot P_{H_i} + \\ & + \frac{C_{i+1}}{C_{i+1} + K_{i+1}} \cdot \Delta S_{i+1}. \end{aligned}$$

Решая совместно приведённые уравнения, находим

$$\eta_{\Delta i} = \frac{C_{i+1}K_{i+1}}{C_{i+1}} \frac{\Delta P_{i+1}}{P_{n_{i+1}}} - \frac{K_{i+1}\chi_{i+1}}{C_i} \frac{\Delta P_i}{P_{n_{i+1}}} - \frac{K_{i+1}\chi_{i+1}}{C_i} \Delta S_i + \frac{K_{i+1}}{P_{n_{i+1}}} \Delta S_{i+1}$$

или, обозначив коэффициенты через  $a, b, e, d$ , получим

$$\eta_{\Delta i} = a\Delta P_{i+1} - b\Delta P_i - e\Delta S_i + d\Delta S_{i+1} + \Delta h_{i+1} = \frac{\Delta P_{i+1}}{C_{i+1}} + \Delta S_{i+1}.$$

Для  $(i+2)$ -й клетки можем записать

$$\Delta h_{i+1} = \frac{K_{i+1}\chi_{i+2}}{C_{i+2} + K_{i+2}} \left( \frac{\Delta P_{i+1}}{C_{i+1}} + \Delta S_{i+1} \right) + \frac{P_{n_{i+2}}\eta_{\Delta i}}{C_{i+2} + K_{i+2}} + \frac{C_{i+2}}{C_{i+2} + K_{i+2}} \Delta S_{i+2},$$

откуда величина перемещения  $\Delta S_{i+2}$ , обеспечивающая отсутствие отклонения толщины от номинала  $\Delta h_{i+1} = 0$ , будет равна

$$-\Delta S_{i+2} = \frac{K_{i+1}\chi_{i+2}}{C_{i+2} + K_{i+2}} \left( \frac{\Delta P_{i+1}}{C_{i+1}} + \Delta S_{i+1} \right) + \frac{P_{n_{i+2}}}{C_{i+2} + K_{i+2}} \eta_{\Delta i}$$

или, подставляя  $\eta_{\Delta i}$ , получим

$$-\Delta S_{i+2} = A_{i+1}\Delta P_{i+1} - B_{i+1}\Delta P_i - E_{i+1}\Delta S_{i+1} + D_{i+1}\Delta S_{i+1},$$

где

$$A_{i+1} = \frac{K_{i+1}\chi_{i+2}}{C_{i+1}C_{i+2}} + \frac{C_{i+1}K_{i+1}}{C_{i+1}C_{i+2}} \frac{P_{n_{i+2}}}{P_{n_{i+1}}};$$

$$B_{i+1} = \frac{\chi_{i+1}P_{n_{i+2}}}{C_{i+2}C_{i+1}P_{n_1}}; E_{i+1} = \frac{K_{i+1}\chi_{i+1}}{C_{i+2}} \frac{P_{n_{i+2}}}{P_{n_{i+1}}};$$

$$D_{i+1} = \frac{K_{i+2}\chi_{i+2}}{C_{i+2}} + \frac{K_{i+1}}{C_{i+2}} \frac{P_{n_{i+2}}}{P_{n_{i+1}}}$$

являются постоянными коэффициентами для данной программы настройки стана. Также постоянными коэффициентами являются множители, стоящие перед  $\Delta P_{i+1}$ ,  $\Delta P_i$ ,  $\Delta S_i$  и  $\Delta S_{i+1}$  в выражении для  $\eta_{\Delta i}$ .

Для удобства и быстроты расчёта  $\eta_{\Delta i}$  и  $\Delta S_{i+2}$  все эти коэффициенты могут храниться в памяти вместе с командами для перемещений нажимных устройств, уставками регуляторов толщины и т. п.

После прокатки сляба в последней клетке черновой группы по замеренной величине  $\Delta P$  уточняется значение  $\eta_{\Delta i}$ , используемое для подстройки обжатий металла в клетках чистовой группы. Для этой подстройки необходимо ещё учесть ухудшение пластических свойств металла за время его нахождения на рольганге между черновой и чистовой группами.

Зависимость механических свойств металла как зависимость сопротивления металла деформации от температуры может быть принята экспоненциальной, что при небольших изменениях температуры, имеющих место при движении раскатанного сляба по рольгангу между черновой и чистовой группами, позволяет считать эту зависимость линейной. Также линейной можно считать зависимость падения температуры от времени. Так как потеря тепла металлом происходит через поверхность, то чем толще металл, тем меньше среднее по его сечению падение температуры и ухудшение механических свойств. Исходя из приведённых выше до-

пущений, найдём, что величина  $\eta_{\Delta}^*$  при выходе металла в первую чистовую клетку будет равна

$$\eta_{\Delta}^* = r \frac{\tau}{H} + \eta_{\Delta},$$

где  $\tau$  – время, затраченное металлом на перемещение от валков последней клетки чер-

новой группы до валков первой клетки чистовой группы;  $r$  – коэффициент пропорциональности, устанавливаемый экспериментально;  $H$  – толщина полосы при выходе из черновой группы;  $\eta_{\Delta}$  – величина отклонения пластических свойств металла, измеренная при выходе металла из последней клетки черновой группы.

Величина  $\eta_{\Delta}^*$  преобразуется в перемещение нажимных устройств клеток чистовой группы, обеспечивая предварение в работе регуляторов толщины.

Для расчёта величины перемещений нажимных устройств клеток черновой группы и для расчёта величины  $\eta_{\Delta}$  металла на выходе из последней клетки этой группы измеряются отклонения давлений в клетях от номинальных значений.

Так как в процессе прокатки сляба в каждой из клеток черновой группы давление, измеряемое месдозами, не остаётся постоянным, то возникает задача получения среднего за время прокатки одного сляба давления металла на валки, определения  $\Delta P$  на интегрирующем аналоговом устройстве и преобразования информации в цифровую форму.

### Выводы

1. Применение математической модели для решения многоэкстремальных задач получения сигналов, адекватных изменению величин обжатий, позволяет обеспечить однозначность срабатывания систем обратной связи в автоматических устройствах регулирования толщины проката.

2. Установлены соотношения между диапазоном изменений варьируемых параметров заготовок и параметров процессов прокатки.

3. Обоснована целесообразность учёта не только параметров заготовки, но и сил межклетевого натяжения в построении схем регуляторов и создания программ для управляющих контроллеров.

### Библиографический список

1. Гарбер Э. А., Павлов С. И., Кузнецов В. В., Тимофеева М. А., Кожевникова И. А., Дилигенский Е. В. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология). - М.: институт «Черметинформация», Череповец: ЧТУ. - 2004. - 416 с.
2. Груздев А. П. Теория прокатки: Учебник для вузов. - М.: Metallurgy, 2002. - 240 с.
3. Дилигенский Е. В. Влияние нестабильных технологических факторов прокатки на плоскостность холоднокатаных полос // Производство проката. - 2008. - №11. - С. 9-13.
4. Ауцингер Д., Джумлиджа Г., Ниджунис Т., Шайлингер А., Видлер М, Пош Г., Пеер Л. Применение современных технологических методов для улучшения профиля и плоскостности горячекатаной полосы // Сталь. - 2003. - №12. - С. 37-40.
5. Батин Ю. Т. Исследование процесса прокатки с натяжением и подпором на гладкой точке // Непрерывная прокатка: Сб. науч. Тр. ЧИМ. - Т. 23. - М.: Metallurgy, 1966. - С. 54-57.
6. Якидзава Т. Новая система автоматического регулирования контура толстого листа при прокатке // Кавасаки СЭЙТЕЦУ ШХО. - 1979. - Т. 11. №2. - С. 168-181.

### References

1. Garber, E.A. Cold rolling mills (theory, equipment, technology) [Text] / E.A. Garber, S.I. Pavlov, V.V. Kuznetsov, M.A. Timofeyeva, I.A. Kozhevnikova, Ye.V. Diligensky. - M.: Institute "Chermetinformation"; Cherepovets: ChSU, 2004. - 416 p.
2. Gruzdev, A.P. Theory of rolling [Text]: textbook for institutions of higher education / A.P. Gruzdev. - M.: Metallurgy, 2002. - 240 p.
3. Diligensky, Ye.V. Influence of unstable technological factors of rolling on the flat surface accuracy of cold-rolled strips [Text] / Ye.V. Diligensky // Production of rolled stock. - 2008. - №11. - PP. 9-13.
4. Auztinger, D. Application of modern technological methods for the improvement of profile and flat surface accuracy of hot-rolled strip

- [Text] / D. Auztinger, G. Dzhumlidzha, T. Nidzhuis, A. Shaylinger, M. Vilder, G. Posh, L. Peer // Steel. - 2003. - №12. - PP. 37-40.
5. Batin, Yu.T. Analysis of the rolling process with tension and support on a smooth point [Text] / Yu.T. Batin // Continuous rolling: collection of papers. - M.: Metallurgy, 1966. - Vol.23. - PP. 54-57.
6. Yakidzava, T. New system of automated regulation of thick sheet profile in rolling [Text] / T. Yakidzava. - 1979. - Vol.11. - N.2. - PP. 168-181.

## ANALYSIS OF THE EFFECT OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ROLLING ON THE OPTIMIZATION OF ROLLING MILL ADJUSTMENT PROGRAMS

© 2011 S. F. Tlustenko

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

Increasing the efficiency of optimization of reduction regimes in automated rolling mills is connected with the development of theoretical models and principles of systematization of numerous factors for the purpose of obtaining the necessary values of the displacement of pressure devices of the stands by controlling systems.

*Rolling mill, optimal reduction, pressure, forces, adjustment of position.*

### Информация об авторе

**Тлустенко Станислав Федотович**, кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [titan250@mail.ru](mailto:titan250@mail.ru). Область научных интересов: разработка теории автоматизации прокатного производства, построение алгоритмов оптимального управления.

**Tlustenko Stanislav Fedotovitch**, candidate of technical science, associate professor of the department of plastic working of metals, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), [titan250@mail.ru](mailto:titan250@mail.ru). Area of research: developing the theory of rolling automation, constructing algorithms of optimal control.