

*Машеков С.А., Бекмуханбетова Ш.А., Нугман Е.З.*

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ НОВОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ТОНКИХ ПОЛОС С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ МИНИМАЛЬНОГО НАТЯЖЕНИЯ В МЕЖКЛЕТОВЫХ ПРОМЕЖУТКАХ (Сообщение 2)**

*S.A. Mashekov, S.A. Bekmuhanbetova, E.Z. Nugman*

**AUTOMATIC CONTROL SPEED NEW REGIME ROLL STAND HOT ROLLING MILL THIN STRIPS WITH MINIMUM TENSION IN BETWEEN CELLS INTERVALS (Message 2)**

УДК: 621.313.333

*В статье рассмотрено система автоматического регулирования скоростного режима прокатной клетки нового непрерывного стана горячей прокатки тонких полос с обеспечением минимального натяжения в межклетевых промежутках. Представлена система уравнений механической системы, учитывающая процессы деформации металла при прокатке с обжатием в клетях и позволяющая проводить анализ динамических свойств.*

*The article deals with the automatic control system of high-speed re-benching roll stand of a new continuous hot rolling of thin strips with minimum tension in mezhkletevyh intervals. Shows a system of equations of a mechanical system that takes into account the processes of deformation of the metal during rolling with a reduction in the stands and allows the analysis of dynamic properties.*

Расчет нормальных контактных напряжений и усилия прокатки производили по следующим формулам: - первая клеть: по результатам исследования, с применением множественного регрессионного анализа на основе формулы Симпсона, в работе [1,2] разработана модель для определения усилия прокатки тонких полос в чистовой группе ШСП (широкополосный стан горячей прокатки). В первой клетке, где возникает упругое сжатие полосы длиной  $д_{г1упр}$  и пластическая деформация длиной  $х_{гупр}$ , представляющего зоны скольжение и прилипания, для расчета нормальных контактных напряжений и усилия прокатки использовали вышесказанную модель в виде:

$$P_1 = \alpha_p \sigma_{\phi,пл} Q_p \left( 1 - \frac{q_0 + q_1}{2,3\sigma_{\phi,пл}} \right) l b, \quad (1)$$

где  $q_0$  и  $q_1$  – заднее и переднее удельные натяжения;

$Q_p$  – коэффициент, учитывающий влияние контактного трения, внешних зон и ширины полосы. На основании графических данных Симпсона в работе [1] построили следующую аппроксимацию:

$$Q_p = 0,692 + 0,008 \frac{R}{h_1} + 1,984\epsilon + 0,016\epsilon \frac{R}{h_1} - 2 \cdot 10^{-6} \left( \frac{R}{h_1} \right)^2 - 1,188\epsilon^2, \quad (2)$$

где  $\alpha_p$  – коэффициент адаптации. В работе [3] множественным регрессионным анализом экспериментальных данных получили:

$$\alpha_p = 0,2527 + 13,8433(1 - 0,0205\varepsilon + 0,2485k_i)Q_p \sqrt{\frac{h_1}{R} \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}}, \quad (3)$$

где  $R$  – радиус бочки рабочего вала;

$\varepsilon$  – относительное обжатие;

$h_1$  – толщина переднего конца полосы;

$k_i = l_{ci}/l_x$  – сплющивание;

$$k_i = 1 + 3,95 \cdot 10^{-6} \sigma_{\phi,ли} \frac{R}{h_1} \sqrt{\frac{1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon}}, \quad (4)$$

$l_{ci}$  и  $l_x$  – длина очага деформации с учетом и без учета сплющивания рабочих валков;

- вторая, третья, четвертая клеть: для расчета средних значений нормальных контактных напряжений, возникающих во второй, третьей, четвертой клетях использовали уравнение, приведенное в таблице 2 [1,2].

Таблица 2

Формулы для расчета средних значений нормальных контактных напряжений [1]

Участок	Формула
Упругий участок длиной $x_{1упр}$	$p_1 = 1,15E_{II} \left\{ \frac{1}{\delta_{i-1}} + \frac{L}{\delta_{i-1}} \left[ \left( \frac{\delta_{i-1} - 1}{(\delta_{i-1} + 1)\delta_{i-1}} - \frac{q_0}{1,15E_{II}} \right) (D^{\delta_{i-1} + 1} - 1) - 2 \ln D \right] \right\},$ <p>где <math>\delta_{i-1} = \frac{\mu_i}{\operatorname{tg} \alpha/2}</math>; <math>D = \frac{E_{II}}{E_{II} - \sigma_{\phi,ли}}</math>; <math>L = \frac{E_{II} - \sigma_{\phi,ли}}{\sigma_{\phi,ли}}</math></p>
Зона прилипания длиной $x_{ли}$	$p_{2,3} = \frac{2\tau_s}{h_{2упр} - h_{1упр}} \left\{ \left[ 1 + \frac{0,5}{\operatorname{tg} \alpha/2} \frac{h_{II}}{(h_{1упр} - h_{II})} \right] [h_{2упр} (\ln h_{2упр} - 1) - h_{1упр} (\ln h_{1упр} - 1)] - \frac{0,25(h_{2упр}^2 - h_{1упр}^2)}{\operatorname{tg} \alpha/2 (h_{1упр} - h_{II})} + \frac{p_{1упр}}{2\tau_s} + \frac{0,5}{\operatorname{tg} \alpha/2} \frac{h_{1упр}}{(h_{1упр} - h_{II})} - \left[ 1 + \frac{0,5}{\operatorname{tg} \alpha/2} \frac{h_{II}}{(h_{1упр} - h_{II})} \right] \ln h_{1упр} (h_{2упр} - h_{1упр}) \right\}$
Упругий участок длиной $x_2$	$p_4 = 1,15E_{II} \left\{ \frac{1}{\delta_i} + \frac{L}{\delta_i + 1} \left[ \left( \frac{\delta_i - 1}{(\delta_i + 1)\delta_i} - \frac{q_1}{1,15E_{II}} \right) (D^{\delta_i + 1} - 1) - 2 \ln D \right] \right\}$

**Примечание.**  $h_{1упр}$  – толщина полосы на границе первого упругого и пластического участков;  $h_{2упр}$  – толщина полосы на границе второго упругого и пластического участков;  $p_{1упр}$  – значение нормального контактного напряжения.

По известным средним значениям напряжений на каждом из трех участков среднее для всего очага деформации нормальное контактное напряжение прокатки вычисляют по формулам:

$$p_{срi} = \frac{1}{l_{ci}} (p_1 x_{1упр} + p_{2,3} x_{ли} + p_4 x_2), \quad (5)$$

- пятая клеть: так как на упругих участках и участках скольжения очага деформации действует закон трения скольжения для оценки контактного (удельного) давления  $p_{ср}$  использовали формулу А.И. Целикова [4]:

$$p_{ср} = 1,15 \left\{ [x_{0i} \sigma_{s0i} h_0 / (d - 2)] [(h_0/h_{II})^{d-2} - 1] + [x_{1i} \sigma_{s1i} h_1 / (d + 2)] [(h_1/h_i)^{d+2} - 1] \right\} / \Delta h, \quad (6)$$

где  $h_0, h_1$  – толщина полосы на входе и на выходе из очага деформации;

$x_{0i} = 1 - q_{0i} / (1,15 \sigma_{s0i})$  – коэффициент, характеризующий влияние переднего натяжения на  $p_{срi}$ ;

$x_{1i} = 1 - q_{1i} / (1,15 \sigma_{s1i})$  – коэффициент, характеризующий влияние заднего натяжения на  $p_{срi}$ ;

$d = 2\mu l_{\pi} \Delta h$  – параметр очага деформации (по Целикову А.И.);  
 $h_n = [x_0/x_1 (h_0)^{d-1} - (h_1)^{d-1}]^{1/2d}$  – толщина полосы в нейтральном сечении (в сечении, при котором меняется знак касательных напряжений);

$q_{0i}, q_{1i}$  – натяжение на входе и на выходе из очага деформации;

$\sigma_{s0i}, \sigma_{s1i}$  – сопротивление пластической деформации на входе и на выходе из очага деформации;

$\mu$  – коэффициент внешнего трения;

$\Delta h = h_0 - h_1$  – абсолютное обжатие.

Для расчета усилия прокатки во втором, третьем, четвертом и пятом клетях использовали известную формулу [1,2]

$$P = p_{cpi} \cdot l_{ci} \cdot b, \quad (7)$$

где  $b$  – ширина прокатываемой полосы;

Длина контактной поверхности (длина дуги захвата) вычисляется по следующей формуле (без учёта сплющивания валков):

$$l = \sqrt{R \cdot \Delta L},$$

где  $h - H = \Delta h$  – разница толщины полосы металла на входе и выходе из клетки

Натяжение в межклетевом промежутке определяется по формуле Д.П. Морозова. Для промежутка между клетями  $i$  и  $i + 1$  формула будет иметь вид

$$\frac{dT_{i,i+1}}{dt} = \frac{E \cdot Q_{i,i+1}}{L_{i,i+1}} (\vartheta'_{i+1} - \vartheta_i) \quad (8)$$

где  $E$  – модуль упругости прокатываемого материала;  $Q_{i,i+1}$  – поперечное сечение полосы на участке между клетями  $i$  и  $i + 1$ ;  $L_{i,i+1}$  – длина межклетевого промежутка;  $v_i$  – скорость металла на выходе из клетки  $i$ ;  $\vartheta'_{i+1}$  – скорость металла на входе в  $i + 1$  клеть.

Исходя из уравнения постоянства секундных объемов для клеток непрерывного стана, физическая сущность которого заключается в том, что количество металла, проходящего в единицу времени через любое сечение, должно быть одинаково, определяется скорость металла на входе в  $i + 1$  клеть [4]:

$$\vartheta'_{i+1} h_{i,i+1} = \vartheta'_{i+1} \cdot h'_{i+1}. \quad (9)$$

Следовательно, формула позволяющий определить скорость металла в любом сечении  $\vartheta'_{i+1}$  будет иметь вид

$$\vartheta'_{i+1} = \vartheta_{i+1} \cdot \frac{h_{i+1}}{h'_{i+1}}, \quad (10)$$

где  $h'_{i+1}$  – толщина полосы в любом сечении очага деформации.

Время  $\tau$  необходимое для прохождения полосой расстояние между клетями  $i$  и  $i+1$  со скоростью  $v_i$  в большинстве случаев можно принять

$$\tau_i = \frac{L_{i,i+1}}{v_{i0}}, \quad (11)$$

где  $v_{i0}$  – «фиксированная» скорость выхода металла из  $i$  клетки, в рассматриваемом случае это скорость выхода металла из клетки  $i$ , определяемая скоростью валков клетки и опережением для клетки  $i$ .

Уравнение движения для прокатной клетки имеет вид

$$M_{\partial s} = M_{np} + M_{mp} + M_{x.x} \pm M_n \pm M_{\partial}, \quad (12)$$

где  $M_{np}$  – момент прокатки, необходимый для осуществления деформации металла в очаге деформации;  $M_{mp}$  – момент добавочных сил трения, возникающих от действия давления металла на валки в подшипниках валков и в других частях кинематической системы клетки;  $M_{x.x}$  – момент холостого хода, требующийся для привода стана при холостом ходе;  $M_n$  – момент от действия приложенного к полосе натяжения;  $M_{\partial}$  – динамический момент, необходимый для преодоления инерционных усилий вращающихся частей кинематической цепи клетки;

$$M_{\partial} = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (13)$$

где  $J$  – суммарный момент инерции вращающихся масс, приведенный к валу электродвигателя;  $d\omega/dt$  – ускорение привода.

Выражение для момента прокатки имеет вид

$$M_{np} = 2 \cdot P \cdot \psi \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h}, \quad (14)$$

где  $P$  – полное давление металла на валки;  $\psi$  – коэффициент плеча момента, равный отношению длины плеча момента к длине дуги захвата; согласно экспериментальным данным,  $\psi = 0,45 - 0,5$  для горячей прокатки.

Момент дополнительных сил трения в линии привода клетки стана представляет собой сумму

$$M_{mp} = M_{mp1} + M_{mp2} + M_{mp3} + M_{mp4}, \quad (15)$$

где  $M_{mp1}$ ,  $M_{mp2}$ ,  $M_{mp3}$ ,  $M_{mp4}$  – момент сил трения соответственно в подшипниках валков, колесах, шестернях, цепной передаче.

Для упрощения расчетов принимают:

$$M_{mp} = (0,33 \div 0,18)M_{np} + (1,33 \div 1,18)M_{mp1}. \quad (16)$$

$M_{mp1}$  для четырехвалкового стана с приводом через рабочие валки определяют по формуле

$$M_{mp1} = P \cdot d_{on} \cdot f_n \cdot \frac{D_p}{D_{on}}, \quad (17)$$

где  $P$  – полное давление металла на валки;  $d_{on}$  – диаметр шейки опорного валка;  $f_n$  – коэффициент трения в подшипниках опорных валков;  $D_p$ ,  $D_{on}$  – диаметры бочек соответственно рабочего и опорных валков.

Коэффициент трения в подшипниках валков (подшипников жидкостного трения) равен  $f_n = 0,003 - 0,005$ .

Момент холостого хода клетки определяется как сумма приведенных моментов трения вращающихся деталей клетки (валков, шестерен, колес) при нагрузке на подшипники от их собственной массы [4]. На основании практических данных принимают

$$M_{x,x} = (0,05 \div 0,08) \cdot M_{нд}, \quad (18)$$

где  $M_{нд}$  – номинальный момент двигателя главного привода клетки.

Момент от приложенного к прокатываемой полосе натяжения определяется по формуле

$$M_n = (T_0 - T_1) \cdot R, \quad (19)$$

здесь  $T_0$ ,  $T_1$  – соответственно заднее и переднее натяжение.

Для определения динамического момента необходимо знать момент инерции вращающихся частей клетки, приведенных к валу двигателя:

$$J = \frac{G_i \cdot r_i^2}{i_n}, \quad (20)$$

где  $G_i$ ,  $r_i$  – масса элемента и радиус инерции вращающихся элементов кинематической схемы клетки;  $i_n$  – коэффициент приведения к валу двигателя (коэффициент редукции).

Представленное математическое описание механической системы позволяет проводить исследование и анализ динамических характеристик, необходимых для синтеза оптимальной системы управления приводами прокатных клеток предлагаемого стана. Исследование данной системы можно проводить на ЭВМ с помощью различных математических пакетов, например, MatLab.

Вышеописанное математическое описание механической системы (см. сообщения 1, 2) можно использовать в следующей последовательности:

- измерение удельного натяжения с помощью бесконтактных датчиков и толщины прокатываемой полосы между клетями с помощью рентгеновских и радиоизотопных измерителей толщины, охватывающих диапазон толщин от 2 мкм до 12 мм (например, использование рентгеновского измерителя толщины для тонколистовых станов горячей прокатки типа ИТТ-5688 с диапазоном измерения толщин от 1,2 до 12 мм, или радиоизотопного измерителя толщины ИТ-5555 с диапазоном измерения толщин от 2 мкм до 0,1 мм, или радиоизотопного измерителя толщины ИТ-5465 для измерения толщин от 0,03 до 1,2 мм, или радиоизотопного измерителя толщины ИТ-5460 для диапазона 0,4 – 3,0 мм).

- используя ЭВМ расчет энергосиловых параметров прокатки по вышеописанной методике и регулирования толщины полосы на непрерывном стане горячей прокатки новой конструкции. Для регулирования толщины полосы необходимо использовать система автоматического регулирования профиля и формы полосы (САРПФ). Принцип действия системы основан на противоизгибе валков на величину, обеспечивающую устранение коробоватости и волнистости полосы. Сигналы от ЭВМ и от бесконтактных датчиков удельного натяжения, расположенных на выходе раската из клетки, поступают на вход блока усиления и логической обработки полосы, где происходит их усиление и сравнение в соответствии с заданным алгоритмом;

- расчет параметров процесса прокатки и моментов приводного двигателя клеток и по сформированным сигналам регулирование скоростного режима непрерывной группы клеток стана новой конструкции;

- расчет параметров процесса прокатки и по сформированным сигналам регулирование скоростного режима четвертой и пятой клетей нового стана за счет передвижение конусообразных колес и шестерен гидроприводным агрегатом (в четвертой и пятой клетки колеса и шестерни сделаны с малой конусностью).

**Литература:**

1. Моделирование процесса горячей прокатки широких полос с учетом зоны прилипания в очаге деформации / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // Труды седьмого Конгресса прокатчиков. Москва. -2007. - С. 484-492.
2. Расчет усилий горячей прокатки тонких полос с учетом напряженно-деформированного состояния в зоне прилипания очага деформации /Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // Производство проката. № 4. -2007. - С. 7-15.
3. Новый метод энергосилового расчета широкополосных станов горячей прокатки /Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // Вестник ЧТУ. № 3. 2008. - С. 19-26.
4. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. М.: Metallurgia, 1980. 318 е., ил.

**Рецензент: д.т.н., профессор Поветкин В.В.**

---