

- деформирование с кантовкой на 30 и 60° позволяет сосредоточить интенсивность напряжения в зоне контакта металла с инструментом на начальном этапе обжатия, а при увеличении обжатия перенести зону с максимальной величиной интенсивности напряжения ближе к центральной части заготовки (рисунок 4).

- протяжка на РКМ с кантовкой на 30 и 60° позволяет также сосредоточить интенсивность деформации в зоне контакта металла с инструментом на начальном этапе обжатия, а при увеличении обжатия акцент зоны с максимальной величиной интенсивности деформации перенести ближе к центру заготовки, при этом от поверхности до середины радиуса располагающихся зонах интенсивность деформации распределяется равномерно (рисунок 5).

- в процессе протяжки в плоских бойках в зонах локализации напряжения и деформации температура повышается (рисунок 6), при этом в центральной зоне заготовки температура понижается.

Таким образом, при ковке на РКМ интенсивность напряжения и деформации сосредотачивается в зонах расположенных между поверхностью и половина радиуса заготовки. Поэтому, для получения поковки с равномерной структурой, необходимо использовать совмещенный способ РКМ с другим оборудованием, позволяющие совместно равномерно измельчить структуры исходной заготовки.

Литература:

1. Антощенко Ю.М. Расчет процессовковки. - М.: Машиностроение, 2001, 240 с.
2. Котосов А.В., Шкарлет В.И. Пути совершенствования кузнечных бойков и устройств для ОМД. Экспресс информация. Фрунзе, 1988, №8. 32 с.

Рецензент: д.т.н., профессор Жанбирова Ж.Г.

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 1)

S.A. Mashekov, Sh.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 1)

УДК: 621313333

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 speeding roll stand of a new continuous hot rolling of thin strips to ensure rd minimum tension in mezhklyetevykh 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.

Непрерывная прокатка в предлагаемом стане [1] ведется с заданным натяжением металла на участках между клетями, что устраняет опасность смещения полосы в зазорах между валками в стороны от оси прокатки. Потеря натяжения, так же как и его чрезмерная величина, приводит к аварийным ситуациям с возможными тяжелыми последствиями. Поэтому поддержание заданного натяжения полосы в межклетевом промежутке при возможных возмущениях в переходных и установившихся режимах прокатки является важной задачей систем управления электроприводами и автоматизации стана любой конструкции [2], Натяжение полосы - функция разности скоростей выхода металла из предыдущей клетки и входа металла в следующую клеть. Скорость входа и выхода металла из клетки определяется не только окружной скоростью валков, но и опережением металла.

Опережение, в свою очередь, - это функция натяжения полосы и величины обжатия. При этом величина статического момента приводного двигателя также определяется степенью обжатия в валках данной клетки и зависит от переднего и заднего натяжений. Поэтому изменение натяжения полосы или ее толщины вызывает изменение скорости приводного двигателя в соответствии со степенью жесткости его механической характеристики и сказывается на величине натяжения полосы [2].

Для синтеза оптимальных систем управления приводным электродвигателем рабочих валков для поддержания постоянства заданного межклетевого натяжения полосы при прокатке необходим анализ поведения механической системы смежных клетей при различных возмущениях, основными из которых являются изменение скоростей и межвалковых зазоров клетей [2].

Необходимо отметить, что в стане новой конструкции отсутствует нажимной механизм в первых трех клетях, при этом изменения расстояние между рабочими валками регулируют при настройке клетей жесткими прокладками, расположенными между подушкой опорного валка и верхней поперечиной станины. На основе этого можно отметить, что на величины энергосиловых параметров и скоростной режим прокатки оказывают сильное влияние толщина исходной заготовки и величина единичного обжатия в последних двух клетях. Поэтому при автоматическом регулировании скоростного режима предлагаемого стана необходимо учитывать толщину исходной заготовки и единичные обжатия четвертом и пятом клетях.

Для математического описания принимается ряд допущений [2], позволяющих упростить механическую систему, не изменяя характера протекающих в ней основных динамических процессов: *а)* реальная кинематическая система участка двух смежных клетей сводится к обобщенной двухмассовой системе; *б)* станины клетей абсолютно жесткие; *в)* не учитывается момент инерции полосы; *г)* отсутствует упругое удлинение полосы.

Последнее допущение можно сделать, исходя из следующего. При горячей прокатке величину межклетевых натяжений выбирают так, чтобы напряжения растяжения в металле не превышали 20 - 40 % предела текучести. При удельных натяжениях, не превышающих половины предела текучести прокатываемого материала, относительное удлинение составляет 0,0015 [3,4].

Участок двух смежных клеток находится в составе клеток нового непрерывного стана. Стальная полоса последовательно прокатывается через клетки i и $i + 1$ с постоянным обжатием в первых трех клетях и с изменяемым обжатием в четвертой и пятой клетях (рисунок 1). Валки клеток приводятся в движение одним двигателем через общую цепную передачу, индивидуальную муфту и накрест лежащие диаметром одинаковые колеса и шестерни имеющую зубчатую передачу [1]. Угловые скорости рабочих валков клеток ω_i, ω_{i+1} . Линейные скорости выхода металла из клеток соответственно v_i, v_{i+1} . Линейная скорость входа металла в клетку $i + 1$: v_{i+1} . Заднее натяжение полосы для клетки $i - T_{i+1}$, переднее натяжение для $i + 1$ клетки. Натяжение полосы в межклетевом промежутке - T_H . Приведенные моменты инерции главных линий клеток J_i, J_{i+1} . Толщина полосы на входе и выходе клетки соответственно. Толщина металла на выходе клетки $i + 1$: h_{i+1} . Толщина полосы на входе в клетку $i + 1$ равна толщине металла на выходе клетки i с учетом транспортного запаздывания. Длина межклетевого промежутка $L_{i, i+1}$.

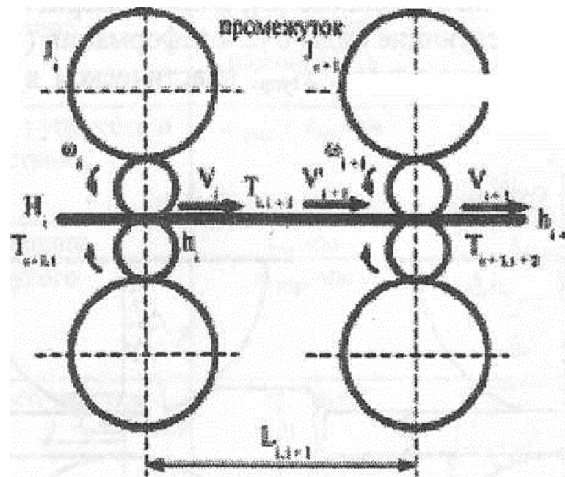


Рис.1. Структурная схема участка двух смежных прокатных клеток

При прокатке скорость металла на выходе из клетки, как правило, больше окружной скорости валков. Это явление называют опережением, и объясняется оно удлинением полосы при прокатке с обжатиями в клетях [5]. В общем случае скорость металла на выходе клетки и линейная скорость рабочих валков клетки связаны выражением

$$v = v_a \cdot (1 + S), \quad (1)$$

где v – скорость металла на выходе из клетки; v_a – линейная скорость рабочего вала; S – опережение.

Величина опережения является функцией ряда параметров, в частности переднего и заднего натяжений (до клетки и после нее)

$$S = S_0 + \xi \cdot (T_1 - T_0), \quad (2)$$

где S – опережение; S_0 – опережение металла при прокатке без натяжения; ξ – постоянный коэффициент, характеризующий зависимость между опережением и разностью переднего и заднего натяжений клетки, определяется для разных параметров геометрии прокатываемых полос по экспериментальным графикам и таблицам; T_0 , T_1 – переднее и заднее натяжение полосы для клетки.

Линейная скорость рабочего вала связана с угловой скоростью выражением:

$$v_a = \omega \cdot R, \quad (3)$$

где R – радиус рабочего вала; ω – угловая скорость рабочего вала клетки.

Выражение для скорости полосы, выходящей из клетки имеет следующий вид:

$$v = \omega \cdot R \cdot [1 + S_0 + \xi \cdot (T_1 - T_0)] \quad (4)$$

Для вычисления опережения металла, выходящего из клетки, необходимо знать опережение металла при прокатке без натяжения. Расчет этого параметра производится по формуле Дрездена

$$S_0 = \frac{R}{h} \cdot \gamma^2, \quad (5)$$

где h – толщина металла на выходе из клетки; γ – нейтральный угол.

На рисунке 2,а показана схема, поясняющая формулу опережения при прокатке. Здесь H – толщина металла на входе клетки, h_γ – толщина металла в нейтральном сечении, h – толщина металла на выходе из клетки, v – скорость выхода металла из клетки, v_a – линейная скорость рабочих валков, v_γ – скорость металла в нейтральном сечении, α – угол захвата металла валками.

Скорость полосы в нейтральном сечении равна скорости валков. Нейтральный угол определяется по формуле И.М. Павлова

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{2f_y} \right), \quad (6)$$

где α – угол захвата металла рабочими валками клетки; f_y – коэффициент трения металла о валки. Угол захвата рассчитывается по формуле

$$\alpha = \sqrt{\frac{H - h}{R}}. \quad (7)$$

Проанализировав результаты, полученные в работе [6], и закономерности изменения диаметров рабочих валков нового стана нами было приняты следующие виды очага деформации (рисунок 3):

- первая клеть: упругого сжатия полосы длиной $x_{1упр}$; пластической деформации длиной $x_{пл}$, представляющего зоны скольжения и прилипания;

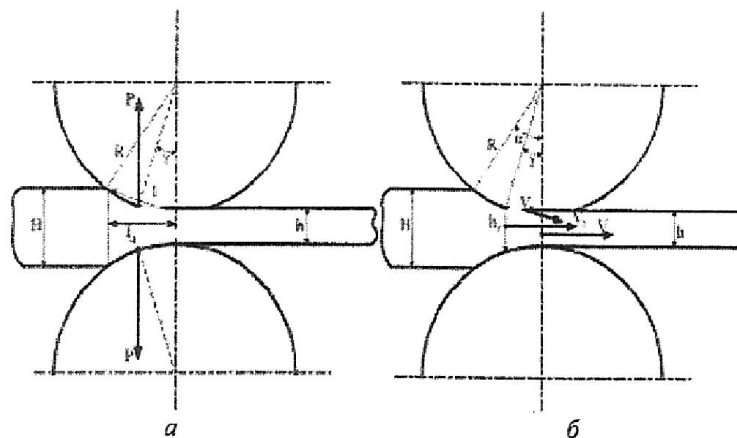


Рис. 2. Схемы к формуле опережения и расчёту контактной поверхности и давления металла на валки

- второй, третий, четвертый клетки: упругого сжатия полосы длиной $x_{1упр}$; пластической деформации длиной $x_{пл}$, представляющего целиком зону прилипания, упругого восстановления части толщины полосы на выходе из очага деформации длиной x_2 ;

- пятая клеть: упругого сжатия полосы длиной $x_{1упр}$; пластической деформации длиной $x_{пл}$, представляющего целиком зону скольжения и упругого восстановления части толщины полосы на выходе из очага деформации длиной x_2 .

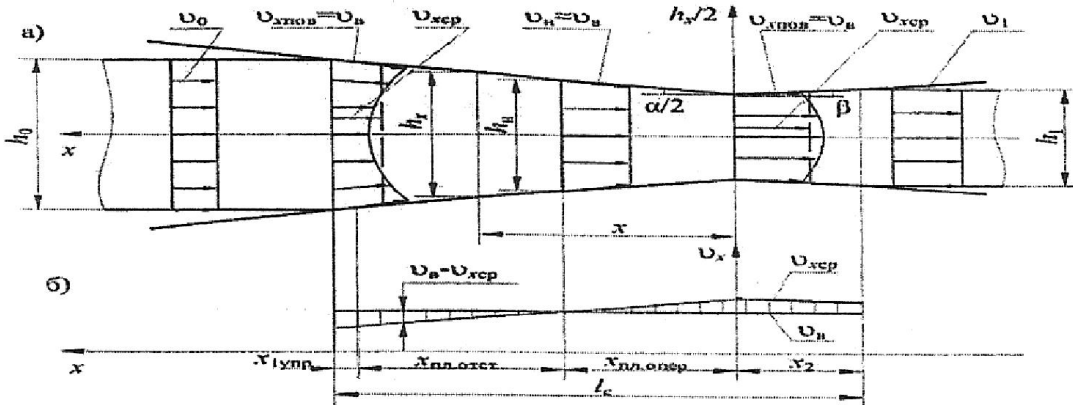


Рис.3. Схема очага деформации рабочих клеток нового стана горячей прокатки и график изменения скоростей полосы

Несмотря на то, что при прокатке во второй, третьей, четвертой клетки на пластическом участке из-за явления прилипания скорость поверхностного слоя полосы постоянна, относительно средней по толщине скорости полосы $v_{хсп}$ выполняются условия:

- при $h_x > h_n$ $v_{хсп} < v_в$;
- при $h_x < h_n$ $v_{хсп} > v_в$.

где h_n – толщина полосы в нейтральном сечении.

Поэтому по отношению к средней скорости по толщине полосы пластический участок состоит из двух зон – отставания длиной $x_{пл.отст}$ и опережения длиной $x_{пл.опер}$.

Протяженность первого упругого и пластических участков очага деформации определяется по формулам, приведенным в таблице 1 [6].

Таблица 1

Структурные параметры очагов деформации [6]

Наименование	Обозначение, размерность	Формула
Сумма длин первого упругого и пластического участков,	$x_{1упр} + x_{пл}$, мм	$\sqrt{\frac{D_p}{2} \Delta h_i + x_2^2}$
Длина очага деформации	$l_{об}$, мм	$x_{1упр} + x_{пл} + x_2$
Длина первого упругого участка	$x_{1упр}$, мм	$\frac{\Delta h_{1упр} (x_{1упр} + x_{пл})}{\Delta h_i + \Delta h_{2упр}}$
Длина пластического участка	$x_{пл}$, мм	$\sqrt{\frac{D_p}{2} \Delta h_i + x_2^2} - x_{1упр}$
Длина зоны опережения пластического участка	$x_{пл.опер}$, мм	$\frac{(h_{н1} - h_i + \Delta h_{2упр})}{2 \operatorname{tg}(\alpha/2)}$
Длина зоны отставания пластического участка	$x_{пл.отст}$, мм	$x_{пл} + x_{пл.опер}$

Тангенсы углов $\alpha/2$ и β	$tg(\alpha/2)$	$\frac{\Delta h_i + \Delta h_{2\text{упр}}}{2(x_{1\text{упр}} + x_{н.д})}$
	$tg\beta$	$\frac{\Delta h_{2\text{упр}}}{2x_2}$

Примечание: D_p – диаметр бочки рабочего вала; Δh_i – абсолютное обжатие в i -й клетке; $\Delta h_{1\text{упр}}$, $\Delta h_{2\text{упр}}$ – максимальные величины абсолютных упругих деформаций полосы по толщине на участках с длинами $x_{1\text{упр}}$ и x_2 .

Протяженность второго упругого участка определяется по формуле Герца [6]:

$$x_2 = 8 p_{cp} R \left(\frac{1 - \nu_B^2}{\pi E_B} - \frac{1 - \nu_{II}^2}{\pi E_{II}} \right), \quad (8)$$

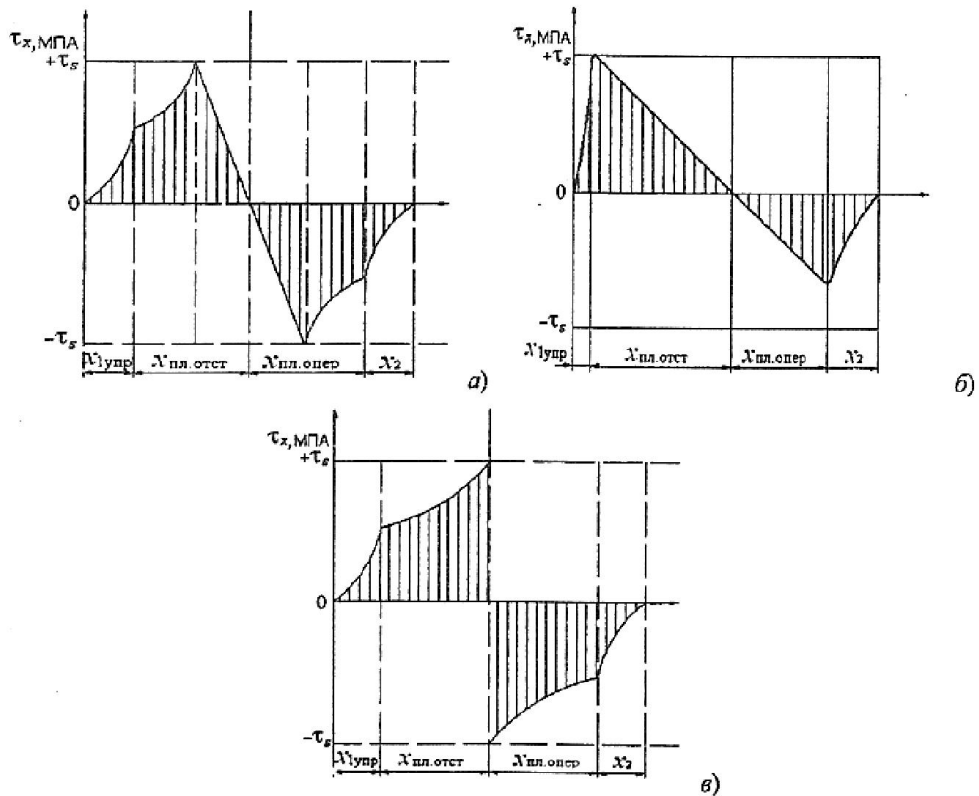
где p_{cp} – среднее значение нормальных контактных напряжений; R – радиус бочки рабочего вала; ν_B , ν_{II} – коэффициент Пуассона материала валков и полосы; E_B , E_{II} – модуль упругости материала валков и полосы.

С учетом особенностей напряженно-деформированного состояния при прокатке полосы на новом стане предложена следующая модель напряжений трения (см. рисунок 4):

- первая клеть: на упругих участках и участках скольжения очага деформации действует закон трения скольжения [6]:

$$\tau_x = \mu p_x, \quad (9)$$

μ – коэффициент трения.



a – первая клеть; $б$ – вторая, третья, четвертая клетки; $в$ – пятая клеть

Рис. 4. График изменения касательных контактных напряжений в очаге деформации

На участке, представляющем собой зону прилипания, касательные напряжения изменяются линейно от максимального значения $\tau_{max} = \tau_s$ до минимального значения $\tau_x \geq -\tau_s$, проходя через значение $\tau_x = 0$ в нейтральном сечении, в соответствии с выражением:

$$\tau_x = \tau_s \left(\frac{h_x - h_n}{h_{1, \text{скол}} - h_n} \right), \quad (10)$$

где $h_{1, \text{скол}}$ – толщина полосы на границе участков скольжения и прилипания;

- второй, третий, четвертый клеть: на участках очага деформации длиной $x_{1, \text{упр}}$ и x_2 действует закон трения скольжения (9), а на пластическом участке, представляющем собой зону прилипания, касательные напряжения изменяются линейно от максимального значения $\tau_{\text{max}} = \tau_s$ до минимального значения $\tau_x \geq -\tau_s$, проходя через значение $\tau_x = 0$ в нейтральном сечении, в соответствии с выражением [6]:

$$\tau_x = \tau_s \left(\frac{h_x - h_n}{h_{1, \text{упр}} - h_n} \right), \quad (11)$$

где $h_{1, \text{упр}}$ – толщина полосы на границе первого упругого и пластического участков;

- пятая клеть: на упругих участках и участках скольжения очага деформации действует закон трения скольжения (9).

Характерная особенность условий трения в зоне прилипания состоит в том, что в ней нормальные и касательные контактные напряжения практически не зависят от коэффициента трения скольжения, а зависят от сопротивления чистому сдвигу материала полосы и разности между скоростью полосы $u_{\text{хр}}$ (средней в каждом поперечном сечении) и окружной скоростью бочки валков u_b .

Помимо модели касательных напряжений, большое значение для расчета контактных напряжений имеет модель сопротивления деформации полосы. Сопротивление деформации для случая горячей прокатки можно определить по формуле С. Экелунда:

$$\sigma_{\phi, \text{пл}} = k_0 + \eta \cdot u, \quad (12)$$

где k_0 – удельное сопротивление при статическом сжатии; η – вязкость прокатываемого металла; u – скорость деформации.

Величины k_0 и η применительно к горячей прокатке также определяют по формуле С. Экелунда:

$$k_0 = 9,81 \cdot (14 - 0,01 \cdot t) \cdot (1,4 + C + Mn + 0,3Cr), \quad (13)$$

где t – температура прокатки; C – содержание углерода (в процентах); Mn – содержание марганца; Cr – содержание хрома.

Вязкость прокатываемого металла η определяется по формуле

$$\eta = 0,01 \cdot (14 - 0,1 \cdot t) \cdot C_1 \quad (14)$$

где C_1 – коэффициент, зависящий от скорости прокатки, например, для скоростей прокатки менее 6 м/с $C_1 = 1$.

Для подсчета средней скорости деформации при прокатке применяется формула А.И. Целикова:

$$u = \frac{v}{l} \cdot \frac{\Delta h}{H}, \quad (15)$$

где v – скорость прокатки; l – длина очага деформации; $\Delta h/H$ – относительное обжатие.

Литература:

1. Решение о выдаче инновационного патента на изобретение по заявке 2010/1046.1 от 17.01.2011 г / Машеков С.А., Нуртазаев А.Е., Нугман Е.З. и др. Непрерывный стан для прокатки тонких полос из стали и сплавов.
2. Мещеряков В.Н., Диденко Е.Е. Математическое описание механической системы двух смежных клетей чистой группы непрерывного стана горячей прокатки. Электротехнические комплексы и системы управления, 2010, №3. С.8-13.
3. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации / Н.Н. Дружинин. - М.: Металлургия, 1975. – 336 с.
4. Стефанович В.Л. Автоматизация непрерывных и полунепрерывных широкополосных станов горячей прокатки / В.Л. Стефанович. - М.: Металлургия, 1975. - 208 с.
5. Куприн М.И., Куприна М.С. Основы теории прокатки. - М.: Металлургия, 1971. - 240 с.
6. 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.

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