

**В. А. Николаев**

Запорожская государственная инженерная академия, Запорожье

**ПРОДОЛЬНЫЕ И НОРМАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ ПОЛОС**

На основе равенства мощностей внутренних и внешних сил получены зависимости для расчета среднего нормального контактного напряжения при несимметричной прокатке полос.

**Ключевые слова:** полосовая прокатка, растягивающее напряжение, энергетический баланс, критическое сечение, скорость деформации, сопротивление сдвига, продольное скольжение, скоростная несимметрия

Несимметричные процессы представляют интерес для практического использования в связи с возможностью снижения энергосиловых параметров при прокатке полос в горячем и холодном состояниях. Об этом свидетельствуют результаты многочисленных теоретических и экспериментальных исследований [1-10 и др.]. В соответствии с этими исследованиями показано, что применение валков с разными диаметрами или окружными скоростями обеспечивает снижение энергосиловых параметров полосовой прокатки на ~10-25 %. Использование указанного несимметричного процесса позволяет получить заданный изгиб переднего конца полосы на выходе из клетей станов горячей и холодной прокатки металла. При любом несимметричном процессе (разные окружные скорости валков, коэффициенты трения на контактных поверхностях очага деформации, наклон полосы к одному из валков при входе в очаг деформации) наблюдается различие величин опережения полосы со стороны одного и другого валков, а также возникновение внутренних растягивающих напряжений, изменяющих схему объемного напряженного состояния деформируемого металла.

Известно, что угол критического сечения в очаге деформации является регулятором энергетического баланса процесса прокатки [2]. Исходя из этого в работах [4-6, 8, 9, 12] предложены решения, позволяющие по изменению величин углов критического сечения в несимметричном процессе (по сравнению с симметричным процессом), определять величины внутренних продольных напряжений и средних нормальных контактных напряжений в несимметричном процессе. Однако, при большой разнице окружных скоростей валков, когда  $\gamma_x \geq 0,5$ , полученные выражения не имеют конечного решения ( $\gamma_x$  – угол критического сечения, например, на холостом валке). Более рациональным является решение задачи расчета силовых параметров при использовании в качестве характеристики условий контактного трения величин опережения на одном и другом валках.

В работах [13] получено решение для расчета

средних нормальных контактных напряжений при прокатке в калибрах простой формы на основе равенства мощностей внутренних и внешних сопротивлений течению металла. Для условий прокатки широкополосной стали суммарная мощность прокатки равна ( $B = 1$ )

$$N = \tau_s \left( \int_0^{l_d} H_x dx + \psi_1 \int_0^{l_d} V_{ck} dx \right), \quad (1)$$

где  $\tau_s$  – сопротивление чистого сдвига;  $H_x$  – интенсивность скоростей деформации в вертикально-продольной плоскости очага деформации;  $l_d$  – длина дуги контакта;  $\psi_1$  – отношение контактных сил трения к сопротивлению среза металла;  $V_{ck}$  – скорость скольжения в симметричном (несимметричном) процессах.

В выражении (1) первое слагаемое учитывает влияние мощности внутренних сопротивлений вдоль очага деформации, а второе – мощность контактных сил трения в очаге деформации. Интенсивность деформации  $H_x$  из работы [13] равна

$$H_x \approx 4 V_h k \frac{x}{l_d^2}, \quad k = 1 - 1/\mu, \quad (2)$$

где  $V_h$  – скорость полосы на выходе;  $\mu$  – коэффициент вытяжки;  $x$  – продольная координата.

Скорости продольного скольжения металла относительно валков определяются выражениями с учетом зон отставания и опережения:

$$V'_{ck} = V \cdot \cos \alpha - V_H, \quad V''_{ck} = V_h - V, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – угол контакта;  $V$  – окружная скорость валков;  $V_H$  и  $V_h$  – скорости полосы на входе в очаг деформации и на выходе из валков соответственно;  $V'_{ck}$ ,  $V''_{ck}$  – скорости скольжения соответственно в зонах отставания и опережения.

Максимальные значения скоростей скольжения в указанных зонах соответственно равны

$$\left. \begin{aligned} V'_{\text{ск}} &= V \cdot \cos \alpha \left( 1 - \frac{1}{1 + S_{\text{от}}} \right); \\ V''_{\text{ск}} &= V S \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $S$  и  $S_{\text{от}}$  – опережение и отставание полосы соответственно.

Расчеты [4, 14] показывают, что скорость течения металла в зоне отставания при тонких и средних по толщине полосах изменяется по линейной зависимости, а в зоне опережения – по параболической). Решая с учетом выражения (4), получим для симметричного процесса

$$V'_{\text{ск}} = V \left( 1 - \frac{1}{1 + S_{\text{от}}} \right) \frac{1}{l_d} \int_{l_\gamma}^{l_d} x dx = 0,5 V \frac{S_{\text{от}}}{1 + S_{\text{от}}} \left( 1 - \frac{\gamma^2}{\alpha^2} \right); \quad (5)$$

в зоне опережения

$$V''_{\text{ск}} = VS \frac{1}{l_d} \int_0^{l_\gamma} \left( 1 - \frac{x^2}{l_d^2} \right) dx = VS \frac{\gamma}{\alpha} \left( 1 - 0,33 \frac{\gamma^2}{\alpha^2} \right), \quad (6)$$

где  $l_\gamma$  и  $\gamma$  – длина зоны опережения и угол критического сечения соответственно.

Средняя скорость скольжения по длине дуги контакта с учетом выражений (5) и (6) равна

$$V_{\text{ск}} = 0,5 V S_{\text{от}} \left[ \frac{1 - \gamma^2 / \alpha^2}{1 + S_{\text{от}}} + \frac{2S}{S_{\text{от}}} \frac{\gamma}{\alpha} \left( 1 - 0,33 \frac{\gamma^2}{\alpha^2} \right) \right]. \quad (7)$$

Мощность деформации из выражения (1) с учетом [13] и уравнений (2) и (7) для одного валка при ширине  $B=1$  будет равна

$$N = \tau_s V \left\{ \frac{\Delta h}{H} h_{\text{cp}} + \psi_1 S_{\text{от}} l_d \left[ \frac{0,5 (1 - \gamma^2 / \alpha^2)}{1 + S_{\text{от}}} + \frac{S}{S_{\text{от}}} \frac{\gamma}{\alpha} \left( 1 - 0,33 \frac{\gamma^2}{\alpha^2} \right) \right] \right\}. \quad (8)$$

С другой стороны, известно, что мощность сопротивления течению металла в валках в горизонтальной плоскости (по направлению прокатки) равна

$$N_C = \sigma_H v_h h / 2, \quad (9)$$

где  $\sigma_H$  – напряжение сопротивления течению металла;  $h$  – толщина полосы после прокатки.

Приравняв выражения (8) и (9) при  $\tau_s = 0,5 \sigma_\phi$ ,  $v_h = V(1+S)$ ,  $\psi_1 = 2f_n$  [13] после преобразований получим для симметричной прокатки

$$m_c = \frac{\sigma_H}{\sigma_\phi} = \frac{1}{1+S} \left\{ \frac{\Delta h}{H} \frac{h_{\text{cp}}}{h} + f_n S_{\text{от}} \frac{l_d}{h} \left[ \frac{(1 - \gamma^2 / \alpha^2)}{1 + S_{\text{от}}} + \frac{S}{S_{\text{от}}} \frac{2\gamma}{\alpha} \left( 1 - 0,33 \frac{\gamma^2}{\alpha^2} \right) \right] \right\}, \quad (10)$$

где  $\sigma_\phi$  – сопротивление металла деформации;  $f_n$  – показатель трения.

В выражении (10) величины  $S$  и  $S_{\text{от}}$  определяют теоретически или экспериментально. При симметричной прокатке величины опережения и отставания полосы со стороны обоих валков одинаковы.

При несимметричной прокатке, например, при скоростной несимметрии, опережение и отставание полосы со стороны одного и другого валков различны [1-5]. Это различие обусловлено действи-

ем в очаге деформации уравновешенных внутренних продольных напряжений. Действие этих напряжений А. А. Королев [1] сравнивает с действием на полосу переднего и заднего внешних натяжений. Так, действие ведущего валка на участке полосы у ведомого валка подобно действию переднего натяжения, а со стороны ведомого валка на участке полосы у ведущего валка подобно действию заднего натяжения. Вследствие такого взаимодействия валков опережение со стороны ведомого валка всегда больше, чем у ведущего [1-5].

Таким образом, изменение опережения полосы со стороны валков при несимметричной прокатке, по сравнению с симметричным процессом, является результатом действия внутренних продольных растягивающих напряжений. Изменение опережений на валках является результатом соответствующего изменения углов критического сечения и, следовательно, скоростей скольжения на контакте металла и валков. Поскольку угол критического сечения является регулятором энергетического баланса процесса прокатки [2], то очевидно, что изменение величин опережений на парных валках и, следовательно, скоростей скольжения может быть использовано для расчета напряжений  $\sigma_H$  при несимметричной прокатке. По аналогии с решением [5, 6] суммарное изменение скоростей скольжения в очаге деформации в результате действия внутренних растягивающих напряжений определим из выражения

$$V''_{ск.нс} = V''_{ск.м} - V''_{ск.б}, \quad (11)$$

где  $V''_{ск.м}$ ,  $V''_{ск.б}$  — скорости скольжения в зоне опережения соответственно на валках с меньшей и

большей окружными скоростями.

Из выражения (6) величины  $V''_{ск.м}$  и  $V''_{ск.б}$  соответственно равны

$$\left. \begin{aligned} V''_{ск.м} &= V S_M \frac{\gamma_M}{\alpha} \left( 1 - 0,33 \frac{\gamma_M^2}{\alpha^2} \right); \\ V''_{ск.б} &= V S_B \frac{\gamma_B}{\alpha} \left( 1 - 0,33 \frac{\gamma_B^2}{\alpha^2} \right), \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

где  $S_B$  и  $S_M$  — опережение соответственно на большем и меньшем валках;  $\gamma_B$  и  $\gamma_M$  — углы критического сечения соответственно на большем и меньшем валках.

Суммарное изменение скорости скольжения в очаге деформации на валках меньшем и большем при несимметричной прокатке  $V''_{ск.нс}$  составит

$$V''_{ск.нс} = V S_M \frac{\gamma_M}{\alpha} \left( 1 - 0,33 \frac{\gamma_M^2}{\alpha^2} \right) \left( 1 - \frac{S_B}{S_M} \frac{\gamma_B}{\gamma_M} \frac{1 - 0,33 \frac{\gamma_B^2}{\alpha^2}}{1 - 0,33 \frac{\gamma_M^2}{\alpha^2}} \right).$$

В приведенном выражении вторая составляющая в скобках близка к единице и поэтому

$$\Delta V''_{ск} \cong V S_M \frac{\gamma_M}{\alpha} \left( 1 - 0,33 \frac{\gamma_M^2}{\alpha^2} \right). \quad (13)$$

Принимая во внимание, что изменение скорости скольжения при несимметричной прокатке происходит в результате воздействия внутренних растягивающих напряжений, уменьшающих напряжение сопротивления течению металла, то, по аналогии с выражением (10), получим

$$m_{nc} = \frac{\sigma_{nc}}{\sigma_{\phi}} = \frac{1}{1+S} \left[ \frac{\Delta h}{H} \frac{h_{cp}}{h} + f_{\pi} S_{от} \frac{l_d}{h} (A-B) \right], \quad (14)$$

где

$$A = \frac{1 - \frac{\gamma^2}{\alpha^2}}{1 + S_{от}} + \frac{S}{S_{от}} \frac{2\gamma}{\alpha} \left( 1 - 0,33 \frac{\gamma^2}{\alpha^2} \right); \quad (15)$$

$$B = \frac{S_m}{S_{от}} \frac{2\gamma_m}{\alpha} \left( 1 - 0,33 \frac{\gamma^2}{\alpha^2} \right), \quad (16)$$

где  $S_{от}$  — отставание полосы в симметричном процессе.

Опережение при скоростной несимметрии определяют по выражениям [3, 5-7] соответственно для ведущего и ведомого валков:

$$\left. \begin{aligned} S_{\phi} &= S'_{\phi} + 0,5 \left( \frac{V_m}{V_{\phi}} - 1 \right); \\ S_m &= S'_m + 0,5 \left( \frac{V_{\phi}}{V_m} - 1 \right), \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где  $S'_{\phi}$  и  $S'_m$  — опережение при симметричной прокатке соответственно в валках с большей и меньшей скоростью;  $V_{\phi}$  и  $V_m$  — соответственно большая и меньшая окружные скорости при несимметричной прокатке.

Как следует из выражений (17), при скоростной несимметрии величина опережения, по сравнению с симметричным процессом, увеличивается на валке с меньшей скоростью и уменьшается со стороны валка с большей скоростью. Выражения (17) пригодны также для расчета опережений в валках с большим ( $R$ ) и меньшим ( $r$ ) радиусами. Опережение в симметричном процессе теоретически рассчитывают по известным выражениям [7, 14]. В выражении (14) присутствует показатель трения  $f_{\pi}$ , который определяется из выражения [3, 7]

$$f_{\pi} = 1,6f - 0,018, \quad (18)$$

где  $f_{\pi}$  — коэффициент трения по закону трения Амонтона.

Коэффициент трения  $f$  и длину дуги контакта с учетом упругих деформаций валков и полосы (холодная прокатка) определяют по известным моделям [7, 15].

Среднее нормальное контактное напряжение определим из условий равновесия горизонтальных составляющих сил, действующих на очаг деформации [7, 14].

$$P \cdot \sin \varphi_0 - T_1 \cdot \cos \varphi_1 + T_2 \cdot \cos \varphi_2 = \sigma_{nc} h / 2, \quad (19)$$

где  $P$  — усилие деформации;  $T_1$  и  $T_2$  — силы трения соответственно в зонах отставания и опережения;  $\varphi_i$  — углы приложения равнодействующих сил.

Представим выражение (19) через контактные напряжения, принимая ширину полосы  $B = 1$  (закон трения Г. Амонтона),  $\sin \varphi_0 \approx \alpha / 2$ ,  $\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2 \approx 1$  и после преобразований получим

$$p_{\text{cp}} \frac{R\alpha^2}{2} - fp_{\text{cp}} R(\alpha - \gamma) + fp_{\text{cp}} R\gamma = \sigma_{\text{nc}} h / 2$$

или

$$\frac{p_{\text{cp}}}{\sigma_{\text{nc}}} = \frac{1}{\frac{\Delta h}{h} \left[ 1 + \frac{2f}{\alpha} \left( \frac{2\gamma}{\alpha} - 1 \right) \right]}, \quad (20)$$

где  $f$  и  $\gamma$  — для условий симметричной прокатки.

С учетом выражений (10), (14) и (19), отношение средних нормальных контактных напряжений при несимметричном и симметричном процессах равно

$$n = \frac{p_{\text{cp,nc}}}{p_{\text{cp}}} = \frac{m_{\text{н.с}}}{m_{\text{с}}}; \quad p_{\text{cp,nc}} = n p_{\text{cp}}, \quad (21)$$

где  $m_{\text{н}}$  и  $m_{\text{н.с}}$  — коэффициенты соответственно из выражений (10) и (14);  $p_{\text{cp}}$  и  $p_{\text{cp,nc}}$  — средние нормальные контактные напряжения соответственно для симметричного и несимметричного процессов.

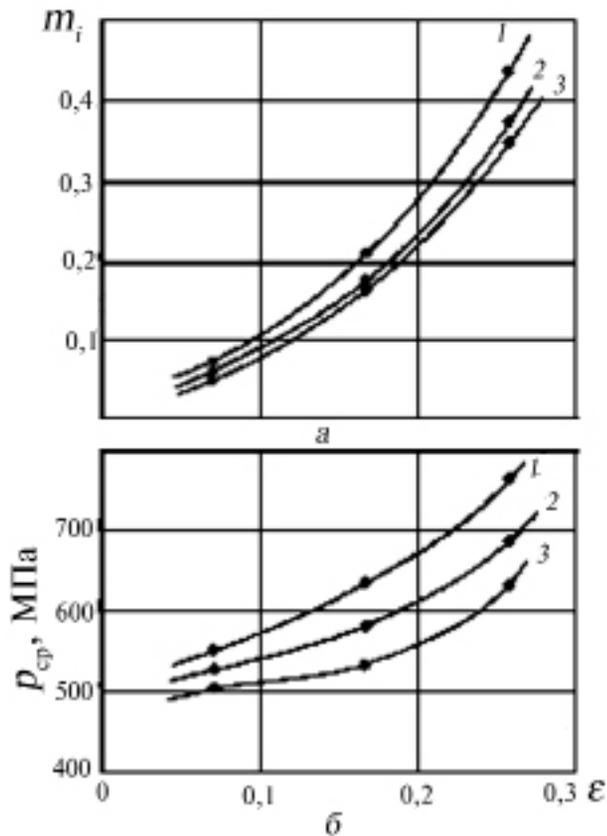
Оценка модели расчета среднего нормального контактного напряжения выполнена по экспериментальным данным при симметричной прокатке полос из СТ08кп на стане с диаметром валков  $D = 250$  мм. [4, табл. 8]. Прокатывали полосы толщиной  $H = 1,41$  мм и шириной  $B \approx 24,8$  мм со скоростью  $V = 0,3$  м/с с использованием технологической смазки эмульсол  $T$ . В опытах измеряли длину дуги контакта с учетом упругих деформаций валков и полосы, усилие прокатки и опережение. По опережению и усилию рассчитывали угол критического сечения, коэффициент трения и среднее нормальное контактное напряжение. Опытные данные использовали для расчета напряжений сопротивлению продольному течению металла по выражениям (10) и (14), а также среднего нормального контактного напряжения для условий несимметричной прокатки по выражению (21).

Опытные и расчетные параметры представлены на рисунке и в таблице.

#### Влияние скоростной несимметрии на среднее нормальное контактное напряжение

$h$ , мм	$\varepsilon$	$S$ , %	$\gamma/\alpha$	$f$	$p_{\text{cp,оп}}$ , МПа	Расчетные $p_{\text{cp,nc}}$ при $V_6/V_M$	
						1,07	1,16
1,3	0,078	0,85	0,319	0,032	560	533	503
1,18	0,162	2,02	0,324	0,052	638	586	536
1,05	0,255	3,6	0,323	0,062	760	697	635

Как следует из рисунка *a*, при использовании несимметричного скоростного режима деформации полосы, возникновение внутренних продольных напряжений растяжения обуславливает уменьшение относительного сопротивления продольному течению металла, выраженному через параметр  $m_i = m_{\text{н.с}}$ . Самые высокие значения  $m_i = m_{\text{с}}$  имеют место в симметричном процессе прокатки, когда  $m_{\text{с}}$  изменяется в пределах от 0,087 до 0,418 (кривая 1). При этом среднее нормальное контактное напряжение с увеличением относительного обжатия повышается от  $p_{\text{cp,оп}} = 560$  до 760 МПа (рисунок, *б*; кривая 1). В случае применения различия скоростей валков ( $V_6/V_M > 1$ ) происходит уменьшение и параметра  $m_{\text{н.с}}$  (рисунок, *a*) и среднего нормального контактного напряжения (рисунок, *б*; кривые 2, 3). Увеличение скоростной несимметрии повышает значения продольных растягивающих напряжений и, вместе с этим, средних нормальных контактных напряжений. При скоростной несимметрии, равной  $V_6/V_M = 1,16$  средние нормальные напряжения  $p_{\text{cp,nc}}$  снижаются в зависимости от обжатия, на ~10-16%. Исходя из структуры формул (8), (10) и (14) заметим, что применение несимметричного скоростного процесса обеспечивает также снижение мощности прокатки, что подтверждается данными [2, 10].



Влияние скоростной несимметрии на относительное напряжение  $\sigma_{\mu}$  сопротивления течению металла в продольном направлении  $m_i$  (а) и среднее нормальное напряжение  $p_{cp}$  (б) при  $V_b/V_w$ : 1 — 1,0; 2 — 1,07; 3 — 1,16 (условия прокатки в таблице)

## Выводы

На основе равенства мощностей внутренних и внешних сил с учетом ранее установленных закономерностей изменения опережения при несимметричном процессе и физических параметров прокатки получена системная модель, позволяющая установить качественный характер и количественную оценку воздействия скоростной несимметрии на энергосиловые параметры прокатки. Установлено, что при скоростной несимметрии в пределах 16 % средние нормальные контактные напряжения, по сравнению с симметричной прокаткой, снижаются на 10-15 %.



## Литература

1. Королев А. А. Новые исследования деформации металла при прокатке. — М.: Машгиз, 1953. — 257 с.
2. Выдрин В. Н. Динамика прокатных станов. — Свердловск: Metallurgizdat, 1960. — 247 с.
3. Чекмарев А. П., Нефедов А. А., Николаев В. А. Теория продольной прокатки. — Харьков, ХГУ, 1965. — 206 с.
4. Николаев В. А., Скороходов В. Н., Полухин В. П. Несимметричная тонколистовая прокатка. — М.: Metallurgiya, 1993. — 192 с.
5. Николаев В. А. Теория и технология несимметричной прокатки / В. А. Николаев, В. Л. Мазур, А. К. Голубченко, Е. В. Бинкевич — М.: Агенство «Информарт», 1996. — 262 с.
6. Николаев В. А. Теория и практика процессов прокатки. — Запорожье, ЗГИА, 2002. — 232 с.
7. Николаев В. А. Теория прокатки. — Запорожье, ЗГИА, 2007. — 228 с.
8. Николаев В. А. Влияние несимметрии на силовые условия прокатки // Metallургическая и горнорудная пром-сть. — 2005. — № 4. — С. 43-46.
9. Николаев В. А. Силовые параметры в несимметричных условиях прокатки // Изв. вузов. Чер. металлургия. — 2007. — № 3. — С. 20-22.
10. Пименов А. Ф. Освоение технологии несимметричной горячей прокатки на НШС 2000 ЧерМК / А. Ф. Пименов, Ю. В. Липухин, А. И. Трайно и др. // Сталь. — 1988. — № 6. — С. 37-42.
11. Экспериментальное исследование неустановившегося процесса прокатки в клети с одним холостым валком / В. П. Холодный, В. К. Звонарев, А. В. Устинов и др. // Metallurgiya и коксохимия. — 1982. — № 78. — С. 75-78.
12. Николаев В. А. Удельные давления при прокатке в валках разного диаметра // Изв. вузов. Чер. металлургия. — 1970. — № 1. — С. 87-90.
13. Николаев В. А. Мощность и средние контактные напряжения при сортовой прокатке металла // Metallургическая и горноруд. пром-сть, 2005. — № 2. — С. 40-43.
14. Целиков А. И., Гришков А. И. Теория прокатки. — М.: Metallurgiya, 1970. — 358 с.
15. Николаев В. А. Оценка точности формул для расчета среднего нормального контактного напряжения при холодной прокатке // Изв. вузов. Чер. металлургия. — 2004. — № 11. — С. 36-38.

**НИКОЛАЄВ В. О.** Поздовжні та нормальні напруги в зоні деформації при несиметричній прокатці смуг

З умов рівності потужностей внутрішніх та зовнішніх сил одержано рішення для розрахунку напруг несиметричної прокатки.

**NIKOLAIV V.** Longitudinal and normal stresses at the source of deformation at asymmetrical strip rolling

The calculation for internal stress at asymmetrical rolling was received on the base of capacities equality internal and external forces.