

УДК 621.771.23

Байков Е. В.

МЕТОД РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ ПОЛОСЫ В НЕЙТРАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЯХ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ

Конъюнктурные изменения на рынке металлопродукции вызывают необходимость в постоянном совершенствовании технологии производства, обеспечивающей повышение конкурентоспособности готовой продукции, т. е. улучшении качества при незначительном увеличении (а лучше даже снижении) затрат на производство. Это, в свою очередь, подталкивает к созданию новых и (или) совершенствованию уже существующих технологических процессов и приемов [1], позволяющих повысить конкурентоспособность готовой продукции.

Одним из таких приемов, который применяют для повышения качества при производстве листов, полос и лент, является асимметричная прокатка. Это связано с тем, что при незначительных затратах на реализацию процесса использование асимметрии при прокатке позволяет снизить силу прокатки [2] (и, следовательно, уменьшить разнотолщинность листового проката), воздействовать как на форму листов и полос [3], так и на шероховатость их поверхности [4], а также влиять на текстуру деформации листового материала [5].

Но при назначении режима асимметрии для исключения поломки оборудования прокатного стана надо учитывать то, что при асимметричной прокатке, при прочих равных условиях, крутящий момент, передаваемый шпинделем ведущего вала, больше, чем при симметричной.

Для расчета силовых параметров прокатки в валках разного диаметра (моментов на ведущем и ведомом валках, среднего нормального контактного напряжения) используем теоретические зависимости, предложенные В. Г. Синицыным [6].

$$M_1 = R_1 \cdot \left[l_d \cdot f_y \cdot p_{cp} - 2k_s \cdot \left\{ \left[\frac{\xi_1 \cdot \delta + 1}{\delta + 1} \cdot \left(\frac{H_B}{h} \right)^\delta - 1 \right] \cdot H_B - \frac{\delta \cdot (\xi_1 - 1)}{\delta + 1} \cdot h \right\} \right]; \quad (1)$$

$$M_2 = R_2 \cdot \left[2k_s \cdot \left\{ \left[\frac{\xi_0 \cdot \delta - 1}{\delta - 1} \cdot \left(\frac{H_0}{H_A} \right)^\delta - 1 \right] \cdot H_A \right\} - l_d \cdot f_y \cdot p_p \right]; \quad (2)$$

$$p_{cp} = \frac{k_s}{l_d \cdot f_y} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{H_0}{H_A} \right)^\delta \cdot \left[\frac{(\xi_0 \cdot \delta - 1) \cdot \delta}{\delta - 1} \cdot H_A - (\xi_0 \cdot \delta - 1) \cdot H_B \right] + \\ & + H_B \cdot \left[\frac{\xi_1 \cdot \delta + 1}{\delta + 1} \cdot \left(\frac{H_B}{h} \right)^\delta - 2 \right] - \left(H_A - H_B - H_B \cdot \ln \frac{H_A}{H_B} \right) \cdot \delta - \\ & - \frac{(\xi_0 - 1) \cdot \delta}{\delta - 1} \cdot H_0 - \frac{\delta \cdot (\xi_1 - 1)}{\delta + 1} \cdot h \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где M_1 – момент прокатки на ведущем валке; M_2 – момент прокатки на ведомом валке; p_{cp} – среднее нормальное контактное напряжение; R_1 – радиус ведущего вала; R_2 – радиус ведомого вала; $2 \cdot k_s = (2k_{s0} + 2k_{s1})/2$ – средний вынужденный предел текучести ленты; $2k_{s0} = 1,15\sigma_{m0}$ – вынужденный предел текучести ленты до прокатки; $2k_{s1} = 1,15 \cdot \sigma_{m1}$ – вынужденный предел текучести ленты после прокатки; σ_{m0} – предел текучести ленты до прокатки; σ_{m1} – предел текучести ленты после прокатки; H_0 – начальная толщина ленты;

h – конечная толщина ленты; H_A – толщина ленты в точке, соответствующей положению нейтрального сечения на ведомом валке; H_B – толщина ленты в точке, соответствующей положению нейтрального сечения на ведущем валке; l_d – длина очага деформации; f_y – коэффициент трения при установившемся процессе; $\delta = 2 \cdot l_d \cdot f_y / (H_0 - h)$ – коэффициент, который учитывает геометрические размеры очага деформации и внешнее трение; $\xi_0 = 1 - T_0 / H_0 \cdot B \cdot 2k_{s0}$ – коэффициент заднего натяжения; T_0 – сила заднего натяжения; B – ширина ленты; $\xi_1 = 1 - T_1 / h \cdot B \cdot 2k_{s1}$ – коэффициент переднего натяжения; T_1 – сила переднего натяжения.

Недостатком данной методики является большая трудоемкость при расчете толщины полосы в нейтральных сечениях.

Целью настоящей работы⁴ является разработка инженерного метода расчета толщины полосы в нейтральных сечениях при асимметричной прокатке.

Очаг деформации при прокатке в валках разного диаметра и упругого сжатия валков и полосы рассмотрим по схеме Хитчкока-Целикова (рис. 1).

При учете упругого сжатия валков и полосы в очаге деформации выделяют две зоны: активной деформации l_1 (расстояние от линии, соединяющей центры вращения валков, до плоскости входа металла в валки) и пассивной l_2 (расстояние от линии, соединяющей центры вращения валков, до плоскости выхода металла в валки)

Длину зоны активной деформации l_1 для условия неравенства диаметров валков можно определить по зависимости:

$$l_1 = \sqrt{2 \cdot R_1 \cdot \Delta h^1 + l_2^2} = \sqrt{2 \cdot R_2 \cdot \Delta h^2 + l_2^2}, \quad (4)$$

где Δh^1 , Δh^2 – абсолютное обжатие со стороны ведущего и ведомого валков, соответственно.

Абсолютное обжатие со стороны ведущего и ведомого валков определяем по зависимости Головина-Симса:

$$\Delta h^1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \Delta h; \quad \Delta h^2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \Delta h. \quad (5)$$

Подставив уравнение (5) в уравнение (4) получаем:

$$l_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \Delta h + l_2^2}. \quad (6)$$

Длину зоны пассивной деформации l_2 для условия неравенства диаметров валков можно по зависимости:

$$l_2 = \sqrt{2 \cdot R_1 \cdot (\Delta_1^1 + \Delta_2^1)} = \sqrt{2 \cdot R_2 \cdot (\Delta_1^2 + \Delta_2^2)}, \quad (7)$$

где Δ_1^1 , Δ_2^1 – упругая деформация ведущего и ведомого валков, соответственно; Δ_1^2 , Δ_2^2 – упругая деформация полосы со стороны ведущего и ведомого валков, соответственно.

Используя зависимости Головина-Симса можно записать:

$$\Delta_1^1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \Delta_1; \quad \Delta_2^1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \Delta_1; \quad \Delta_1^2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \Delta_2; \quad \Delta_2^2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \Delta_2. \quad (8)$$

Подставляем уравнения (8) в уравнение (7) получаем:

⁴ Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. Горелика В. С.

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot (\Delta_1 + \Delta_2)}. \quad (9)$$

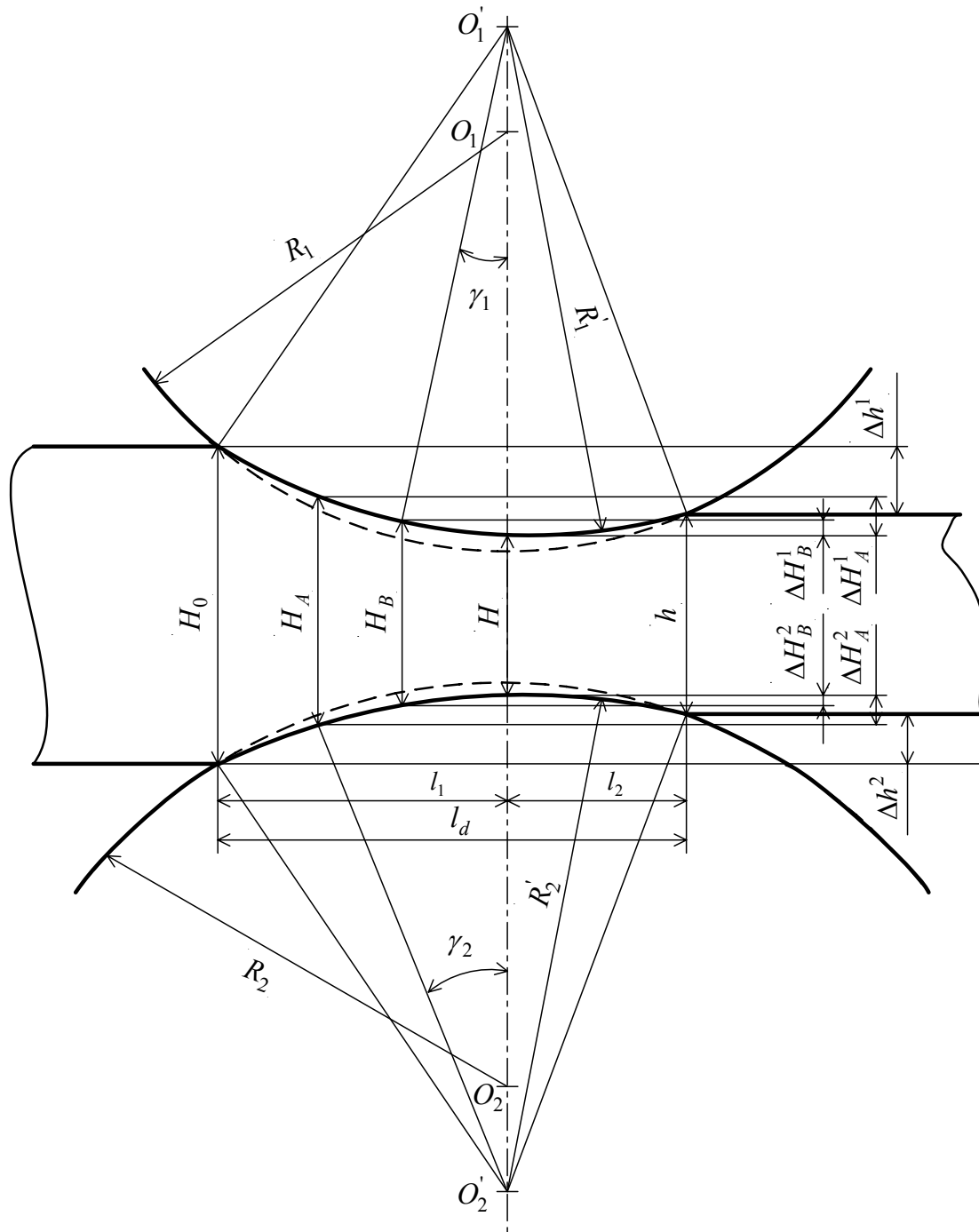


Рис. 1. Схема очага деформации при прокатке в валках неодинакового диаметра и углом сжатия валков и полосы

В уравнении (9) подставляем известные из теории упругости значения Δ_1 , Δ_2 и среднее нормальное контактное напряжение сжимаемых цилиндров. В результате получаем выражение для определения l_2 при прокатке в валках разного диаметра:

$$l_2 \approx 4 \cdot p_{cp} \cdot \frac{2 \cdot R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \left(\frac{1 - \mu_g^2}{\pi \cdot E_g} - \frac{1 - \mu_n^2}{\pi \cdot E_n} \right). \quad (10)$$

Как видно из схемы очага деформации (см. рис. 1) толщины ленты в точках, соответствующих положению нейтральных сечений на ведущем и ведомом валках, можно определить по следующим уравнениям:

$$H_B = H + \Delta H_B^1 + \Delta H_B^2; \quad (11)$$

$$H_A = H + \Delta H_A^1 + \Delta H_A^2, \quad (12)$$

где H – толщина полосы на линии, соединяющей центры вращения валков; H_B, H_A – толщина полосы в нейтральных сечениях на ведущем и ведомом валках, соответственно; $\Delta H_B^1, \Delta H_B^2$ – абсолютное обжатие полосы после нейтрального сечения на ведущем валке со стороны ведущего и ведомого валков, соответственно; $\Delta H_A^1, \Delta H_A^2$ – абсолютное обжатие полосы после нейтрального сечения на ведомом валке со стороны ведущего и ведомого валков, соответственно.

Толщину полосы на линии осей валков определяем через длину зоны пассивной деформации l_2 :

$$H = h - \frac{l_2^2 \cdot (R_1' + R_2')}{2 \cdot R_1' \cdot R_2'}, \quad (13)$$

где R_1', R_2' – условные радиусы деформированной дуги захвата ведущего и ведомого валков, соответственно.

Условный радиус деформированной дуги захвата каждого из валков определяем по формуле Дж. Х. Хитчкока (J. H. Hitchcock) [7]:

$$R_i' = R_i \cdot \left[1 + \frac{16 \cdot p_{cp} \cdot l_d \cdot (1 - \mu_e^2)}{\pi \cdot E_e \cdot \Delta h} \right]. \quad (14)$$

Используя зависимость Головина-Симса находим абсолютные обжатия полосы после нейтральных сечений со стороны ведущего и ведомого валков.

$$H_B = H + R_1' \cdot (1 - \cos \gamma_1) \cdot \left(1 + \frac{R_1'}{R_2'} \right); \quad (15)$$

$$H_A = H + R_2' \cdot (1 - \cos \gamma_2) \cdot \left(1 + \frac{R_2'}{R_1'} \right). \quad (16)$$

Нейтральный угол на каждом из валков, с учетом неравенства диаметра валков, определяем по условия равновесия сил в очаге деформации:

$$\sin \gamma_1 = \frac{1}{2 \cdot R_1'} \cdot \left(l_1 - \frac{R_2' \cdot \Delta h}{(R_1' + R_2') \cdot f_y} - l_2 + \frac{\sigma_0}{p_{cp} \cdot f_y \cdot B} \right); \quad (17)$$

$$\sin \gamma_2 = \frac{1}{2 \cdot R_2'} \cdot \left(l_1 - \frac{R_1' \cdot \Delta h}{(R_1' + R_2') \cdot f_y} - l_2 + \frac{\sigma_1}{p_{cp} \cdot f_y \cdot B} \right). \quad (18)$$

При создании асимметрии разницей скоростей вращения валков уравнения (15) и (16) будут иметь следующий вид:

$$H_B = H + R'_0 \cdot (1 - \cos \gamma_1) \cdot \left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right); \quad (19)$$

$$H_A = H + R'_0 \cdot (1 - \cos \gamma_2) \cdot \left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right). \quad (20)$$

При отсутствии упругого сплющивания валков и полосы формулы (15), (16), (19) и (20) примут вид:

$$H_B = h + R_1 \cdot (1 - \cos \gamma_1) \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right); \quad (21)$$

$$H_A = h + R_2 \cdot (1 - \cos \gamma_2) \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right); \quad (22)$$

$$H_B = h + R \cdot (1 - \cos \gamma_1) \cdot \left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right); \quad (23)$$

$$H_A = h + R \cdot (1 - \cos \gamma_2) \cdot \left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right). \quad (24)$$

ВЫВОДЫ

Предложен инженерный метод расчета толщины полосы в нейтральных сечениях при асимметричной холодной прокатке. Применение данного метода позволит упростить расчет среднего контактного нормального давления и моментов прокатки на ведущем и ведомом валках по методике В. Г. Сеницына.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов А. Опыт производства сортовых заготовок для длинномерного проката / А. Смирнов, Е. Штепан, Е. Смирнов // *Металл.* – 2005. – № 1. – С. 44–50.
2. Влияние кинематической асимметрии на силу прокатки в чистовых рабочих клетях толстолистовых станов / А. Н. Кулик, А. В. Данько, К. Ю. Юрков, А. А. Файчак // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні* : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 269–273.
3. Агеев Л. М. Управляющие воздействия на форму полосы при прокатке / Л. М. Агеев // *Труды 4 Конгресса прокатчиков.* – Магнитогорск, 2002. – Т. 1 – С. 192–197.
4. Управление шероховатостью лент с помощью несимметричной прокатки / В. Е. Лунев, И. Г. Шубин, М. И. Румянцев [и др.] // *Производство проката.* – 2003. – № 6. – С. 28–29.
5. Влияние сдвиговой прокатки на текстуры деформации фольги из алюминия высокой чистоты / Lu Aiqiang, Jiang Qiwi, Wang Fu [and ect.] // *Jinshu xuebao – Acta met. sin.* – 2002. – 38. – № 9. – С. 974–978.
6. Сеницын В. Г. Несимметричная прокатка листов и лент / В. Г. Сеницын. – М. : *Металлургия*, 1984. – 167 с.
7. Климено В. М. Кинематика и динамика процессов прокатки / В. М. Клименко, А. М. Онищенко. – М. : *Металлургия*, 1984. – 232 с.

Байков Е. В. – ст. преподаватель ДонНТУ.

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

E-mail: baykov_ev@mail.ru