

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭПЮР КОНТАКТНЫХ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ НА ВЕЛИЧИНУ КОЭФФИЦИЕНТА ПЛЕЧА МОМЕНТА ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ

Василев Я. Д. /д. т. н./, Замогильный Р. А.

Национальная металлургическая академия Украины

Наведено результати аналізу та дослідження впливу параметрів епюр контактних нормальних напружень і осередку деформації на формування і величину коефіцієнта плеча моменту при холодній штабовій прокатці. Встановлено, що вирішальний вплив на точність визначення коефіцієнта плеча моменту при холодній штабовій прокатці надають параметри епюр контактних нормальних напружень і відносний приріст довжини осередку деформації за лінією, що з'єднує центри обертання валків, викликаний пружним радіальним стисненням валків і пружним відновленням штаби. Зроблено висновок про те, що можливості сучасної теорії поздовжньої холодної прокатки забезпечують достатню точність і надійність прогнозування коефіцієнта плеча моменту, що визначається по координаті центру ваги епюр контактних нормальних напружень.

Ключові слова: холодна прокатка, коефіцієнт плеча моменту, контактні напруження, нейтральний кут, сила прокатки.

To be presented results of analysis and investigation of the influence of parameters of the contact stresses and the deformation center on the formation and magnitude of the shoulder moment coefficient for cold strip rolling. It is established that the decisive influence on the accuracy of determining the coefficient of the shoulder of the moment for cold strip rolling is provided by the parameters of the contact normal stresses diagram and the relative increment of the length of the deformation center behind the line connecting the centers of rotation of the rolls caused by elastic radial compression of the rolls and by elastic recovery of the strip. The conclusion is made that the possibilities of the modern theory of longitudinal cold rolling provide sufficient accuracy and reliability of predicting the coefficient of the moment shoulder, determined from the coordinate of the gravity center in the diagrams of contact normal stresses.

Key words: cold rolling; torque shoulder, contact stresses; neutral angle; rolling force.

Приведены результаты анализа и исследования влияния параметров эпюр контактных нормальных напряжений и очага деформации на формирование и величину коэффициента плеча момента при холодной полосовой прокатке. Установлено, что решающее влияние на точность определения коэффициента плеча момента при холодной полосовой прокатке оказывают параметры эпюры контактных нормальных напряжений и относительное приращение длины очага деформации за линией, соединяющей центры вращения валков, вызванное упругим радиальным сжатием валков и упругим восстановлением полосы. Сделан вывод о том, что возможности современной теории продольной холодной прокатки обеспечивают достаточную точность и надежность прогнозирования коэффициента плеча момента, определяемого по координате центра тяжести эпюр контактных нормальных напряжений.

Ключевые слова: холодная прокатка; коэффициент плеча момента, контактные напряжения; нейтральный угол; сила прокатки.

Введение. Крутящие моменты и сила, действующая на валки, являются важнейшими энергосиловыми параметрами процесса холодной прокатки. Они характеризуют технологическую и энергетическую эффективность режимов деформации и определяют возможность и целесообразность их реализации на каждом конкретном стане холодной прокатки [1, 2]. Поэтому исследования возможностей для повышения точности и надежности их прогнозирования является актуальной научно-технической задачей.

Настоящая статья посвящена анализу и исследованию влияния параметров эпюр контактных нормальных напряжений и очага деформации на величину коэффициента плеча момента, оказывающей прямое влияние на точность расчета крутящих моментов при холодной прокатке. Вопросы повышения точности прогнозирования силы при холодной прокатке были рассмотрены ранее [1-5] и в данной работе обсуждаться не будут.

Крутящие моменты при холодной прокатке определяют двумя методами – по силам трения и по силе

прокатки [1, 5-10]. Из-за недостаточной точности определения протяженности кинематических зон очага деформации при холодной прокатке первый метод практического применения не получил. В связи с этим крутящие моменты при холодной прокатке определяют исключительно по силе прокатки, пользуясь формулами [1, 6-9, 11]:

$$M_p = P_c \psi_c l_c + Rb(Q_0 - Q_1) \quad (1)$$

или

$$M_p = 2p_{срc} \psi_c l_c + Rb(Q_0 - Q_1) \quad (2)$$

где M_p , $p_{срc}$, P_c , l_c , ψ_c – крутящие моменты (в дальнейшем моменты прокатки), среднее контактное нормальное напряжение, сила прокатки, длина очага деформации при холодной прокатке и коэффициент плеча момента, рассчитанные с учетом влияния натяжения и упругих деформаций валков и полосы;

R, b – радиусы рабочих валков и ширина полосы; Q_0, Q_1, q_0, q_1 – соответственно сила и напряжение заднего и переднего натяжения при прокатке; h_0, h_1 – толщина полосы на входе и выходе из очага деформации.

Формулы (1) и (2) записаны для определения крутящих моментов на двух валках при симметричном стационарном процессе прокатки и двусторонней деформации. Вычисление вторых слагаемых в этих формулах трудность не представляет, а для определения параметров p_{cpc} . Вычисление вторых слагаемых в этих формулах трудности не представляет, а для определения параметров p_{cpc}, l_c и P_c имеются хорошо апробированные методики, обеспечивающие их прогнозирование с удовлетворительной точностью [2-5]. Основная проблема при выполнении расчетов по формулам (1) и (2) связана с определением коэффициента плеча момента ψ_c с учетом влияния натяжения и упругих деформаций валков и полосы. Анализ предложенных в литературе [1, 6-9] решений по теоретическому определению коэффициента плеча момента при холодной прокатке показал, что они отличаются низкой точностью и надежностью. Поэтому в инженерной практике и в научных исследова-

ниях при выполнении расчетов крутящих моментов величину коэффициента плеча момента в большинстве случаев не рассчитывают, а выбирают из имеющихся экспериментальных данных, либо назначают, руководствуясь опытом и интуицией. Это приводит к большим погрешностям при выполнении расчетов крутящих моментов на действующих станах холодной прокатки. Здесь уместно отметить, что при современном уровне знаний о процессе прокатки такая практика "определения" коэффициента плеча момента является ошибочной, вредной и недопустимой.

Из литературы известно, что наиболее надежные данные о величине коэффициента плеча момента при холодной прокатке получают при определении данного параметра по координате центра тяжести эпюры контактных нормальных напряжений. Решения для определения коэффициента плеча момента, полученные этим методом содержатся в работах [1, 5-7, 9, 10, 12]. Наиболее корректное из них, учитывающее несовпадение положения максимума на эпюрах контактных нормальных напряжений с нейтральным сечением [13, 14] записываются в виде [1, 5]:

$$\psi_c = \frac{1}{6} \left[\frac{P_0}{p_{cpc}} \left(1 - \frac{\varphi_{maxc}}{\alpha_c} - \frac{x_1}{l_c} \right) \left(1 - \frac{x_{1n}}{l_c} \right) - \frac{P_1}{p_{cpc}} \left(\frac{\varphi_{maxc}}{\alpha_c} + \frac{x_1}{l_c} \right) \left(1 - \frac{x_{0n}}{l_c} \right) + 2 \left(1 + \frac{\varphi_{maxc}}{\alpha_c} + \frac{x_{1n}}{l_c} - 2 \frac{x_1}{l_c} - \frac{x_{0n}}{l_c} \right) \right]. \quad (3)$$

где

$$p_{cpc} = \frac{\beta}{2(1-\nu_n^2)} \left(\sigma_{T0} \xi_0 \frac{x_{0n}}{l_c} + \sigma_{T1} \xi_1 \frac{x_{1n}}{l_c} \right) + \frac{\beta \sigma_{TCP} \xi_{cpc}}{1-\nu_n^2} \left\{ 1 + \frac{fl_\epsilon}{3h_{cp}} \left[1 + \left(\frac{fl_\epsilon}{4h_{cp}} \right)^2 \right] \right\} \frac{l_\epsilon}{l_c}; \quad (4)$$

$$p_0 = \frac{\beta \sigma_{T0}}{1-\nu_n^2} \xi_0; \quad (5)$$

$$p_1 = \frac{\beta \sigma_{T1}}{1-\nu_n^2} \xi_1; \quad (6)$$

$$h_{cp} = 0,5(h_0 + h_1); \quad (7)$$

$$l_c = x_1 + \sqrt{R\Delta h + x_1^2}; \quad (8)$$

$$x_1 = x_{1n} + 6\theta_{\epsilon} p_{cpc} R \left(1 - 2 \frac{x_{1n}}{l_c} \right) \left[4 \frac{x_{1n}}{l_c} \left(1 - \frac{x_{1n}}{l_c} \right) + 1 \right]; \quad (9)$$

$$\theta_{\epsilon} = \frac{1 - \nu^2}{\pi E_{\epsilon}}; \quad (10)$$

$$\frac{x_1}{l_c} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{R \Delta h}{l_c^2} \right); \quad (11)$$

$$\frac{x_{1n}}{l_c} = \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \frac{\epsilon E_n}{1 - \epsilon \beta \sigma_{T1} \xi_1}}}; \quad (12)$$

$$\frac{x_{0n}}{l_c} = \left(1 - \frac{x_{1n}}{l_c} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\beta \sigma_{T0} \xi_0}{\epsilon E_n + \beta \sigma_{T1} \xi_1 (1 - \epsilon)}} \right]; \quad (13)$$

$$l_{\epsilon} = l_c - x_{0n} - x_{1n}; \quad (14)$$

$$\frac{l_{\epsilon}}{l_c} = 1 - \frac{x_{0n}}{l_c} - \frac{x_{1n}}{l_c}; \quad (15)$$

$$\xi_0 = 1 - \frac{q_0}{\beta \sigma_{T0}}; \quad (16)$$

$$\xi_1 = 1 - \frac{q_1}{\beta \sigma_{T1}}; \quad (17)$$

$$\xi_{cp} = 1 - \frac{q_{cp}}{\beta \sigma_{Tcp}} = 1 - \frac{0,5(q_0 + q_1)}{\beta \sigma_{Tcp}}; \quad (18)$$

$\nu_{\epsilon}, \nu_n, E_{\epsilon}, E_n$ – коэффициенты Пуассона и модули упругости материала валков и полосы; $\beta, \sigma_{T0}, \sigma_{T1}$ – коэффициент Лодэ и предел текучести материала полосы соответственно на входе и выходе из очага деформации; l_{ϵ} – протяженность (длина) пластического контакта полосы с валком; x_{0n}, x_{1n} – приращение длины очага деформации, вызванное упругим сжатием и упругим восстановле-

нием полосы; x_1 – приращение длины очага деформации за линией, соединяющей центры вращения валков, вызванное упругим радиальным сжатием валков и упругим восстановлением полосы; p_0, p_1 – контактное нормальное напряжение на границе упруго-пластического контакта полосы с валком соответственно в зоне отставания и в зоне опережения; $p_{cpc}, \Delta h, \epsilon$ – среднее

контактное нормальное напряжение при холодной полосовой прокатке, рассчитанное с учетом влияния натяжения и упругих деформаций валков и полосы, частное абсолютное и относительное обжатие полосы при прокатке; q_{cp} , σ_{Tcp} , h_{cp} – средние значения напряжения натяжения, напряжения текучести и толщины полосы в очаге деформации; f , α_c , φ_{max} – коэффициент трения, угол контакта полосы с валком и угол, характеризующий положение максимума на эпюрах контактных нормальных напряжений, рассчитанные с учетом влияния натяжения и упругих деформаций валков и полосы; ξ_0 , ξ_1 , ξ_{cp} – коэффициенты, характеризующие влияние заднего и переднего

напряжения натяжения и его средней величины соответственно на p_0 , p_1 и p_{cp} .

В настоящее время аналитические решения для определения параметра φ_{max}/α_c не предложены [13]. Поэтому при выполнении расчетов по формуле (3) полагали, как это следует из традиционной теории продольной прокатки [6-9], что положение максимума на эпюрах контактных нормальных напряжений совпадает с положением нейтрального сечения, т. е. принимали $\varphi_{max}/\alpha_c = \gamma_c/\alpha_c$. Расчет γ_c/α_c осуществляли по формуле, учитывающей влияние натяжения, коэффициента трения, неравномерности распределения контактных напряжений и упругих деформаций валков и полосы [1]:

$$\frac{\gamma_c}{\alpha_c} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\left(\Delta h + A_{1n} \left(2 - 3 \frac{x_{1n}}{l_c} \right) \right)}{4nfl_c \left(1 - \frac{x_{1n}}{l_c} \right)^2} \right] - \frac{q_0 h_0 - q_1 h_1}{4fp_{cpc} l_c} - \frac{x_1}{l_c}, \quad (19)$$

где

$$A_{1n} = \frac{\beta \sigma_{T1}}{E_n} \xi_1 h_1; \quad (20)$$

Δ_{1n} , γ_c – упругое восстановление полосы и нейтральный угол при холодной прокатке, рассчитанный с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы, натяжения и неравномерности распределения контактных напряжений.

Из формулы (3) видно, что величина коэффициента плеча момента ψ_c , зависит от параметров

эпюры контактных нормальных напряжений (p_0/p_{cpc} , p_1/p_{cpc} , φ_{max}/α_c) и очага деформации (x_{0n}/l_c , x_{1n}/l_c , x_1/l_c) при холодной прокатке. Поэтому для удобства анализа и дальнейшего исследования влияния параметров эпюры контактных нормальных напряжений и очага деформации на величину коэффициента плеча момента при холодной прокатке формулу (3) представили в виде:

$$\psi_c = \frac{1}{6} \left[2 + \frac{p_0}{p_{cpc}} \left(1 - \frac{x_{1n}}{l_c} \right) + \frac{\gamma_c}{\alpha_c} \left(2 - \frac{p_0}{p_{cpc}} - \frac{p_1}{p_{cpc}} \right) - \frac{x_1}{l_c} \left(4 + \frac{p_0}{p_{cpc}} + \frac{p_1}{p_{cpc}} \right) + \left(\frac{p_0}{p_{cpc}} \frac{x_{1n}}{l_c} + \frac{p_1}{p_{cpc}} \frac{x_{0n}}{l_c} \right) \left(\frac{\gamma_c}{\alpha_c} + \frac{x_1}{l_c} \right) + 2 \left(\frac{x_{1n}}{l_c} - \frac{x_{0n}}{l_c} \right) \right]; \quad (21)$$

$$\psi_c = a_0 + a_1 + a_2 + a_3 + a_4; \quad (22)$$

где

$$a_0 = \frac{1}{6} \left[2 + \frac{p_0}{p_{cpc}} \left(1 - \frac{x_{1n}}{l_c} \right) \right]; \quad (23)$$

$$a_1 = \frac{1}{6} \left[\frac{\gamma_c}{\alpha_c} \left(2 - \frac{p_0}{p_{cpc}} - \frac{p_1}{p_{cpc}} \right) \right]; \quad (24)$$

$$a_2 = -\frac{1}{6} \left[\frac{x_1}{l_c} \left(4 + \frac{p_0}{p_{cpc}} + \frac{p_1}{p_{cpc}} \right) \right]; \quad (25)$$

$$a_3 = \frac{1}{6} \left[\left(\frac{\gamma_c}{\alpha_c} + \frac{x_1}{l_c} \right) \left(\frac{p_0}{p_{cpc}} \frac{x_{1n}}{l_c} + \frac{p_1}{p_{cpc}} \frac{x_{0n}}{l_c} \right) \right]; \quad (26)$$

$$a_4 = \frac{1}{3} \left(\frac{x_{1n}}{l_c} - \frac{x_{0n}}{l_c} \right). \quad (27)$$

Аналогичным путем записали также формулу (3) для случая прокатки идеально пластической полосы

в идеально жестких валках, т. е. без учета влияния упругих деформаций валков и полосы:

$$\psi_c = \frac{1}{6} \left[2 + \frac{p_0}{p_{cp}} + \frac{\gamma}{\alpha} \left(2 - \frac{p_0}{p_{cpc}} - \frac{p_1}{p_{cpc}} \right) \right] = \frac{1}{3} \left(\frac{x_{1n}}{l_c} - \frac{x_{0n}}{l_c} \right). \quad (28)$$

Согласно этой формулы величина коэффициента плеча момента при прокатке идеально пластической полосы в идеально жестких валках определяется значениями трех параметров эпюры контактных нормальных напряжений: γ/α , p_0/p_{cpc} и p_1/p_{cpc} .

При симметричной тонколистовой прокатке без натяжения параметр γ/α всегда меньше 0,5 и находится в диапазоне 0,10...0,45, а значения параметров p_0/p_{cpc} и p_1/p_{cpc} обычно меньше 1,0, причем $p_0/p_{cpc} < p_1/p_{cpc}$ и как правило не превышают 0,6...0,8. Исключением в этом смысле являются значения параметра p_1/p_{cpc} , которые при холодной прокатке относительно толстых полос из интенсивно упрочняющихся сталей и сплавов с низкими коэффициентами трения могут увеличиваться до 1,1...1,4. Таким образом, величина слагаемого $1/6(2 + p_0/p_{cpc})$ в правой части формулы (28) составляет 0,35...0,45, в то время

формуле (28) могут достигать 0,45...0,48 и стремятся к 0,5, что логично.

Из изложенного следует, что значения коэффициента плеча момента, вычисляемые по формуле (28) определяются исключительно величиной слагаемого $1/6(2 + p_0/p_{cpc})$ и от величины нейтрального угла γ/α практически не зависят или зависят слабо. Это подтверждается результатами моделирования коэффициента ψ по формуле (28), представленными на рис. 1. Моделировали условия холодной прокатки жесткопластических полос толщиной 0,3 и 3,0 мм из стали 08кп без натяжения с коэффициентами трения 0,05 и 0,10 в идеально жестких валках диаметром 300 мм. Как следует из рис.1 в самом худшем случае (кривая 1) при увеличении параметра γ/α с 0,146 до 0,342 т. е. в 2,34 раза значения коэффициента плеча момента ψ увеличивались с 0,417 до 0,460 или менее, чем на 10 %. В остальных случаях прокатки (кривая 2...4) зафиксированный рост коэффициента ψ оказался значительно меньше и находился в диапазоне 2...6 %. Это означает, что с уменьшением толщины прокатываемой полосы и с увеличением коэффициента трения влияние параметра γ/α на величину коэффициента плеча момента ψ ослабевает.

как произведение $\frac{\gamma}{\alpha} \left(2 - \frac{p_0}{p_{cpc}} - \frac{p_1}{p_{cpc}} \right)$ всегда меньше величины $1/6(\gamma/\alpha)$. Следовательно, расчетные значения коэффициента плеча момента ψ по

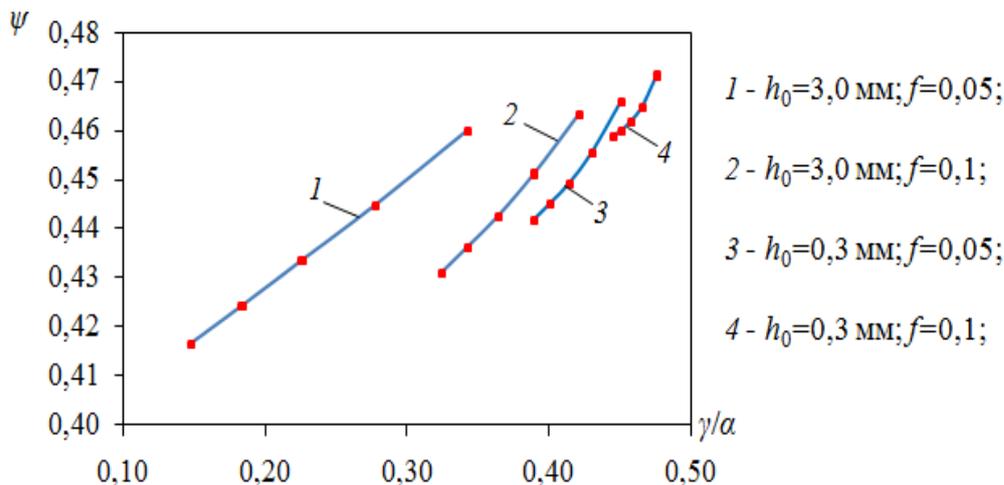


Рис. 1. Зависимости $\psi=\psi(\gamma/\alpha)$, построенные по результатам моделирования параметров холодной прокатки полос из стали 08кп без учета влияния упругих деформаций валков и полосы

При холодной прокатке с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы величина коэффициента плеча момента ψ_c зависит как от параметров эпюры контактных нормальных напряжений, так и от параметров очага деформации. Это вытекает из анализа формулы (21). В рассматриваемых условиях прокатки на величину коэффициента плеча момента ψ_c , помимо γ_c/α_c , ρ_0/ρ_{cpc} и ρ_1/ρ_{cpc} , влияют также параметры x_1/l_c , x_{1n}/l_c и x_{0n}/l_c , прежде всего параметр x_1/l_c , характеризующий приращение длины очага деформации за линией, соединяющей центры вращения валков в результате радиального упругого сжатия валков и упругого восстановления полосы [1]. Количественное влияние параметра x_1/l_c на величину коэффициента плеча момента ψ_c , определяемое слагаемым a_2 , рассчитывается по выражению (25). Знак "-" перед этим выражением указывает на то, что в результате приращения длины очага деформации за линией, соединяющей центры вращения валков, центр тяжести эпюры контактных нормальных напряжений смещается в сторону сечения выхода металла из очага деформации, что приводит к очень существенному уменьшению коэффициента плеча момента ψ_c при холодной прокатке. Учитывая, что величина в скобках выражения (25) всегда больше 5,0...5,5 и принимая во внимание, что значения параметра x_1/l_c находятся в диапазоне от 0 до 0,5 имеем $a_2 = -0,10...0,45$. Влияние упругого сжатия полосы (параметр x_{0n}/l_c) на величину коэффициента плеча момента ψ_c при холодной прокатке пренебрежимо мало, ввиду малости параметра x_{0n}/l_c ($x_{0n}/l_c \leq 0,001...0,03$). Более существенным является влияние упругого восстановления полосы (параметр x_{1n}/l_c) на величину коэффициента ψ_c . По данным работы [1] значения x_{1n}/l_c при холодной прокатке обычно находятся в диапазоне 0,05...0,15 и

только при холодной прокатке с малыми частными относительными обжатиями ($\epsilon < 0,1$) и при дрессировке ($\epsilon < 0,01...0,025$) увеличиваются до 0,20...0,25 и более. Величина нейтрального угла при холодной прокатке (параметр γ_c/α_c) обычно не превышает 0,10...0,35 и с увеличением параметра R/h_0 (где h_0 – толщина полосы на входе в очаг деформации) уменьшается вплоть до нуля и даже приобретает отрицательные значения [1]. По этой причине даже при небольших значениях параметров ρ_0/ρ_{cpc} ($\rho_0/\rho_{cpc} = 0,50...0,75$) и ρ_1/ρ_{cpc} ($\rho_1/\rho_{cpc} = 0,60...0,85$) максимальная величина слагаемого a_1 всегда меньше $1/6(\gamma/\alpha)$. Сумма ($\gamma_c/\alpha_c + x_1/l_c$) в слагаемом a_3 представляет собой относительную протяженность зоны опережения при холодной прокатке, рассчитанную с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы, поэтому она не может быть больше 0,5 (обычно 0,35...0,45). С учетом сказанного слагаемые $a_0...a_4$ формулы (21), определяющие величину коэффициента плеча момента ψ_c при холодной прокатке, приобретают следующие наиболее вероятные значения: $a_0 = 0,40...0,45$; $a_1 \leq 0,01...0,05$; $a_2 \leq 0,10...0,38$; $a_3 \leq 0,001...0,005$; $a_4 \leq 0,01...0,03$. Это означает, что рассчитанные по формуле (21) значения коэффициента плеча момента ψ_c при холодной прокатке могут составлять 0,05...0,40 и менее.

Из приведенных данных следует, что наибольшее влияние на величину коэффициента плеча момента ψ_c при холодной прокатке оказывают слагаемые a_0 и a_2 , зависящие от уровня отношения ρ_0/ρ_{cpc} , т. е. от параметров эпюры контактных нормальных напряжений, а также от уровня относительного приращения длины очага деформации за линией, соединяющей центры вращения валков x_1/l_c , т. е. от параметров очага деформации. Остальные параметры очага деформации и эпюры контактных нормальных

напряжений, в том числе параметр γ/α , характеризующий положение нейтрального сечения в очаге деформации оказывают слабое влияние на величину коэффициента плеча момента ψ_c при холодной прокатке. Здесь необходимо отметить особую роль параметра x_1/l_c при формировании коэффициента плеча момента в условиях холодной прокатки. При холодной полосовой прокатке упругие деформации валков и полосы оказывают решающее влияние на длину очага деформации и на все остальные параметры процесса. По этой причине значительная часть очага деформации, а, следовательно, и эпюры контактных нормальных напряжений смещены в сторону сечения выхода металла из валков и находятся за линией, соединяющей центры вращения валков. В сторону сечения выхода полосы из валков также и центр тяжести эпюры контактных нормальных напряжений, что приводит к уменьшению плеча момента и коэффициента плеча момента, причем чем больше величина параметра x_1/l_c , тем меньше коэффициент плеча момента. Это означает, что параметр x_1/l_c выполняет роль своеобразного регулятора расхода энергии, а также стабильности и устойчивости процесса холодной прокатки.

Для сопоставления результатов выполненного анализа с данными о параметрах процесса холодной прокатки на промышленных станах были выполнены расчеты режимов деформации и энергосиловых параметров на шестиклетевом жестепрокатном стане 1400 и на четырехклетевом стане 1680. Расчеты производили по методике, разработанной на кафедре обработки металлов давлением Национальной металлургической академии Украины (г. Днепр), учитывающей особенности и закономерности упруго-пластического, фрикционного, силового, кинематического и теплового взаимодействия тонкой полосы с валками [1, 2, 5]. В ходе выполнения расчетов, наряду с общепринятыми параметрами определяли также протяженность участков упругого и пластического контакта полосы с валками и значения контактных нормальных напряжений на границах перехода металла из упругого состояния в пластическое и наоборот в очаге деформации. Расчет коэффициента плеча момента ψ_c и его слагаемых $a_0...a_4$ осуществляли по формулам (21)-(27). Результаты расчетов представлены в таблице.

Приведенные в таблице данные о количественном влиянии параметров очага деформации и параметров контактных нормальных напряжений на величину коэффициента плеча момента при холодной прокатке подтверждают целесообразность выполненного анализа. Они свидетельствуют о том, что решающее влияние на величину коэффициента плеча момента при холодной прокатке оказывают слагаемые a_0 и a_2 формулы (22), зависящие от уровня контактных нормальных напряжений (параметр $\rho_0/\rho_{срc}$) и от относительного приращеня длины очага деформации за линией, соединяющей центры вращения валков, вызванного радиальным упругим сжатием валков и упругим восстановлением полосы (параметр x_1/l_c). Остальные параметры

упруго-пластического очага деформации и эпюры контактных нормальных напряжений, в том числе параметр γ_c/α_c , оказывают слабое влияние на величину коэффициента плеча момента. Поэтому можно заключить, что точность прогнозирования коэффициента плеча момента, а следовательно и точность момента прокатки, зависит прежде всего от точности расчета параметров эпюры контактных нормальных напряжений, длины упруго-пластического очага деформации и протяженности его упругих составляющих. Как следует из представленных в таблице данных расчет отдельных составляющих коэффициента плеча момента по формулам (23)-(27) с последующим их суммированием или его суммарного значения по формуле (21) дают одинаковые результаты. Видно также, что выявленные закономерности формирования коэффициента плеча момента ψ_c при прокатке жести (режим 1, см. табл.) и тонких полос (режим 2, см. табл.) от толщины полосы и параметров технологии холодной прокатки не зависят. И завершая обсуждения полученных данных необходимо отметить, что арсенал возможностей современной теории продольной прокатки обеспечивает достаточную точность и надежность прогнозирования коэффициента плеча момента, а, следовательно, и крутящих моментов при холодной прокатке, подтверждая тем самым преимущества метода определения данного параметра по силе прокатки.

ВЫВОДЫ

1. Приведены результаты анализа и исследования влияния параметров эпюры контактных нормальных напряжений и очага деформации на формирование и величину коэффициента плеча момента при холодной полосовой прокатке. Получены количественные данные о влиянии этих параметров на величину коэффициента плеча момента при холодной полосовой прокатке и отмечены преимущества определения данного параметра по координате центра тяжести эпюры контактных нормальных напряжений.

2. Установлено, что решающее влияние на точность определения коэффициента плеча момента при холодной полосовой прокатке оказывают параметры эпюры контактных нормальных напряжений и относительное приращение длины очага деформации за линией, соединяющей центры вращения валков, вызванное упругим радиальным сжатием валков и упругим восстановлением полосы. Показано, что положение нейтрального сечения в очаге деформации оказывает слабое влияние на точность определения коэффициента плеча момента. при холодной полосовой прокатке.

2. Сделан вывод о том, что возможности современной теории продольной холодной прокатки обеспечивают достаточную точность и надежность прогнозирования коэффициента плеча момента, определяемого по координате центра тяжести эпюры контактных нормальных напряжений.

Таблица. Результаты расчета режимов деформации, энергосиловых параметров и коэффициента плеча момента при холодной прокатке полос на непрерывных станах

№ кл	h_0 , мм	ϵ	q_1 , Н/мм ²	V_s , м/с	f	l_c , мм	$\rho_{фрс}$, Н/мм ²	Значения относительных параметров					Слагаемые формулы (22)					ψ_c	
								$\frac{\rho_0}{\rho_{фрс}}$	$\frac{\rho_1}{\rho_{фрс}}$	$\frac{V}{\alpha}$	$\frac{x_{0п}}{l_c}$	$\frac{x_{1п}}{l_c}$	$\frac{x_1}{l_c}$	σ_0	σ_1	σ_2	σ_3		σ_4
<p>Режим 1. Прокатка жести 0,18x855 мм из подката 2,41x855 мм на шестиклетевом стане 1400 "Arcelor Mittal Timirtau"; сталь 08кп; $\sigma_t=265+34,6(100\epsilon)^{0,6}$; $q_{01}=25$ Н/мм²; $R_1=R_2=...=R_6=R_0=300$ мм; $t_{0п}=t_{конт}=40$ °С; технологическая смазка – 2 % эмульсия пальмового масла</p>																			
1	2,41	0,166	151	2,83	0,074	13,6	491	0,603	0,763	0,348	0,003	0,081	0,174	0,426	0,037	-0,156	0,004	0,026	0,337
2	2,01	0,403	139	4,67	0,080	18,5	646	0,580	0,864	0,195	0,002	0,055	0,144	0,425	0,018	-0,131	0,002	0,018	0,331
3	1,20	0,400	143	7,87	0,047	15,1	747	0,751	0,814	0,134	0,003	0,058	0,184	0,451	0,010	-0,171	0,002	0,018	0,311
4	0,72	0,403	181	12,91	0,045	12,5	807	0,761	0,717	0,145	0,003	0,056	0,221	0,453	0,013	-0,202	0,003	0,018	0,285
5	0,43	0,326	151	19,17	0,057	10,2	925	0,636	0,665	0,127	0,003	0,068	0,300	0,432	0,015	-0,265	0,003	0,021	0,207
6	0,29	0,379	35	30,40	0,043	10,2	1099	0,571	0,663	0,080	0,003	0,066	0,342	0,422	0,010	-0,298	0,003	0,021	0,158
<p>Режим 2. Прокатка полосы 0,80x1250 мм из подката 2,5x1250 мм на четырехклетевом стане 1680 ОАО "Запорожсталь"; сталь 08кп; $\sigma_t=275+34,6(100\epsilon)^{0,6}$; $q_{01}=20$ Н/мм²; $R_1=252,5$ мм; $R_2=240$ мм; $R_3=245$ мм; $R_4=255$ мм; $t_{0п}=40$ °С; $t_{конт}=50$ °С; технологическая смазка – 4% эмульсия эмульсола ОМ</p>																			
1	2,70	0,388	185	3,55	0,101	18,8	650	0,455	0,701	0,291	0,002	0,052	0,126	0,405	0,041	-0,108	0,002	0,017	0,356
2	1,65	0,260	200	5,14	0,048	12,4	569	0,805	0,889	0,132	0,003	0,072	0,166	0,458	0,007	-0,157	0,003	0,023	0,333
3	1,22	0,262	218	6,93	0,046	11,2	612	0,832	0,858	0,134	0,004	0,073	0,187	0,462	0,007	-0,178	0,003	0,023	0,318
4	0,90	0,114	40	7,95	0,073	8,4	709	0,747	1,039	0,052	0,008	0,132	0,314	0,441	0,002	-0,303	0,007	0,041	0,188

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Василев Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки / Я.Д. Василев. – М.:, Metallurgia, 1995. – 368 с.
2. Василев Я.Д. Единая методика расчета энергосиловых и температурно-скоростных параметров процесса холодной полосовой прокатки/ Я.Д. Василев, Д.Н. Самокиш, А.В. Дементенко, М.И. Завгородний // Черная металлургия: Бюл. ин-та "Черметинформация" – 2014. – № 1. – с. 50-58.
3. Василев Я.Д. Экспериментальная проверка точности и работоспособности единой методики расчета, энергосиловых и температурно-скоростных параметров процесса холодной полосовой прокатки / Я.Д. Василев, Д.Н. Самокиш, А.В. Дементенко, М.И. Завгородний // Черная металлургия: Бюл. ин-та "Черметинформация" – 2014. – № 2. – с. 65-73.
4. Василев Я.Д. Определение среднего контактного нормального напряжения при холодной прокатке тонких и особо тонких полос / Я.Д. Василев, А.В. Дементенко, Д.В. Коноводов, М.И. Завгородний // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – №4. – С. 46-50.
5. Василев Я.Д. Основы теории продольной холодной прокатки. Пластическая деформация металлов. Коллективная монография / Я.Д. Василев. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. – С.107-125.
6. Целиков А.И. Теория продольной прокатки/А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. – М.: Metallurgia, 1980. – 320 с.
7. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. 2-е изд., перераб. и доп. / А.А. Королев. – М.: Metallurgia, 1985. – 376 с.
8. Робертс В. Холодная прокатка стали: Пер. с англ. / В. Робертс. – М: Metallurgia, 1982. – 544 с.
9. Теория прокатки. Справочник/А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. – М.: Metallurgia, 1982. – 335 с.
10. Василев Я.Д. Теоретическое определение крутящего момента при прокатке с использованием новой модели напряжений трения / Я.Д. Василев, М.И. Завгородний, Р.А. Замогильный // Тематический сборник. "Пластическая деформация металлов. ТОМ II", Днепропетровск: ПП "Акцент", 2014. – С. 27-31.
11. Дружинин Н. Н. Непрерывные станы как объект автоматизации / Н. Н. Дружинин. – М.: Metallurgia, 1975. – 336 с.
12. Химич Г.Л. Оптимизация режимов холодной прокатки на ЭЦВМ / Г.Л. Химич, М.Б. Цалюк. – М.: Metallurgia, 1973. – 256 с.
13. Василев, Я. Д. Исследование положения максимума контактных нормальных напряжений относительно нейтрального сечения при холодной прокатке / Я. Д. Василев, М. И. Завгородний, Д. Н. Самокиш // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 4. – С. 21-24.
14. Василев Я.Д. Определение нейтрального угла при холодной прокатке с использованием уточнённой модели напряжений трения // Я.Д. Василев, М. И. Завгородний, Д. Н. Самокиш, Р. А. Замогильный // Обработка металлов давлением 2013. – № 3 (36), С. 81-86.