

Я.Д. Василев, Д.Н. Самокиш

Национальная металлургическая академия Украины (г. Днепропетровск)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАТЯЖЕНИЯ НА МОЩНОСТЬ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПОЛОСОВОЙ ПРОКАТКИ

В работах [1, 2] было теоретически установлено, что при холодной прокатке с натяжением отношение $W_{с.н}/W_c$, где $W_{с.н}$ и W_c – суммарная мощность при прокатке с натяжением и без натяжения, рассчитанные с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы; всегда меньше единицы. Это означает, что холодная прокатка с натяжением является энергетически более выгодным процессом, чем без него. Исходя из этого и учитывая большую энергоемкость процесса холодной прокатки особую актуальность приобретает получение количественных данных о влиянии натяжения на мощность при холодной прокатке, наличие которых необходимо для определения возможного уменьшения потребляемой мощности путем совершенствования и оптимизации режимов натяжения на действующих станках холодной полосовой прокатки. Этой цели посвящена настоящая работа.

Данные об относительном уменьшении мощности при холодной прокатке с натяжением получали моделированием, используя выражение [2]

$$\frac{W_{с.н}}{W_c} = \left\{ \frac{P_{ср.с.н}}{P_{ср.с}} \frac{\Psi_{с.н}}{\Psi_c} \left(\frac{l_{с.н}}{l_c} \right)^2 + \frac{Rh_0}{2P_{ср.с} \Psi_c l_c^2} \times \right. \\ \left. \times [q_0 \varepsilon + S_{с.н} (1 - \varepsilon) (q_1 - q_0)] \right\} \frac{(1 + S_c)}{(1 + S_{с.н})}, \quad (1)$$

где $P_{ср.с.н}$, $\Psi_{с.н}$, $l_{с.н}$, $S_{с.н}$, $P_{ср.с}$, Ψ_c , l_c , S_c – среднее контактное нормальное напряжение, коэффициент, характеризующий положение точки приложения равнодействующей контактных сил (коэффициент плеча момента), длина очага деформации, опережение при прокатке с натяжением и без натяжения, рассчитанные с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы; R , h_0 и ε – радиус рабочих валков, толщина полосы на входе в очаг деформации и частное относительное обжатие полосы; q_0 и q_1 – заднее и переднее удельные натяжения.

Выражение (1) получено при $V_{1н} = V_1$, где $V_{1н}$ и V_1 – скорость полосы на выходе из очага деформации при прокатке с натяжением и без натяжения.

Моделировали условия холодной прокатки полос отожженной ($\varepsilon_{np} = 0$) и предварительно упрочненной ($\varepsilon_{np} > 0$) стали марки 08кп с натяжением и без натяжения. Упрочнение рассматриваемого материала описывали уравнением $\sigma_{те} = 230 + 34,6(100\varepsilon_{\Sigma})^{0,6}$, где ε_{Σ} – суммарное

относительное обжатие полосы при холодной прокатке, доли ед. Принимали следующие исходные данные: $h_0 = 0,25; 0,50; 1,0; 2,0$ мм; $\varepsilon = 0,01; 0,10; 0,30; 0,40$; $\varepsilon_{np} = 0; 0,50; 0,75; 0,90$; $R = 100; 200; 250; 300$ мм; $f = 0,04; 0,06; 0,08; 0,12$; $q_0/\beta\sigma_{т0} = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$; $q_1/\beta\sigma_{т1} = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$. Расчет параметров процесса холодной прокатки производили по методике, представленной в работах [3, 4], разработанной на кафедре обработки металлов давлением Национальной металлургической академии Украины (г. Днепропетровск). Методика учитывает влияние химического состава и упрочнения материала полосы, температурно-скоростных условий деформации, коэффициента трения, натяжения, асимметричности эпюр контактных нормальных напряжений, упругих деформаций валков и полосы, отличается высокой надежностью и удовлетворительной точностью, подтвержденной результатами многочисленных лабораторных, промышленных и сопоставительных исследований. Это позволило получить точные и надежные расчетные данные о количественном влиянии натяжения на параметры, включая мощность процесса холодной полосовой прокатки. В основу принятой методики положены следующие формулы (модели) для определения [1, 3, 4]:

– длины очага деформации

$$l_{с.н} = x_1 + a + \sqrt{R\Delta h + (x_1 + a)^2}, \quad (2)$$

где

$$a = 0,5\theta_{вP_{ср.с.н}} R(1 - 2\eta) \left[\frac{2(1 - \eta)}{\eta(2 - \eta)} + \frac{2\eta}{1 - \eta^2} - \frac{1}{\eta(1 - \eta)} \right]; \quad (3)$$

$$x_1 = x_{1н} + 6\theta_{вP_{ср.с}} R \left[\frac{\left(1 - \frac{x_{1н}}{l_c}\right) \left(2\eta - 1 + \frac{x_{1н}}{l_c}\right)}{\eta \left(2 - 2\frac{x_{1н}}{l_c} - \eta\right)} + \right. \\ \left. + \frac{\frac{x_{1н}}{l_c} \left(2 - 2\eta - \frac{x_{1н}}{l_c}\right) \left(1 - 2\frac{x_{1н}}{l_c} - \eta\right)}{(1 - \eta)^3} + \frac{1 - \eta - \frac{x_{1н}}{l_c}}{2\eta(1 - \eta)} \right]; \quad (4)$$

$$\eta = 1 - \frac{\gamma_c}{\alpha_c} - \frac{x_1}{l_c}; \quad (5)$$

$$\frac{x_{1п}}{l_c} = \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}\right) \frac{E_{п}}{1,15\sigma_{т1}\xi_1}}}, \quad (6)$$

– среднего напряжения текучести

$$\sigma_{г\text{ср}} = \sigma_{г\text{исх}} k_{\varepsilon\text{ср}} k_{u\text{ср}} k_{t\text{ср}}, \quad (7)$$

– среднего контактного нормального напряжения

$$P_{\text{ср.с.н}} = \frac{1,15}{2(1 - v_{п}^2)} \left[\sigma_{т0}\xi_0 \left(\frac{x_{0п}}{l_c} \right) + \sigma_{т1}\xi_1 \left(\frac{x_{1п}}{l_c} \right) \right] + \\ + \frac{1,15\sigma_{т\text{ср}}\xi_{\text{ср}}}{1 - v_{п}^2} \left[1 + \frac{f l_{\text{с.н}}}{3h_{\text{ср}}} (1 + 0,5\varepsilon) \left(\frac{l_{\text{в}}}{l_c} \right) \right] \left(\frac{l_{\text{в}}}{l_c} \right), \quad (8)$$

– нейтрального угла и опережения

$$\frac{\gamma_c}{\alpha_c} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{(\Delta h + \Delta_{1п}) \left(2 - 3 \frac{x_{1п}}{l_c} \right)}{4 f l_{\text{с.н}} \left(1 - \frac{x_{1п}}{l_c} \right)^2} \right] - \frac{q_0 h_0 - q_1 h_1}{4 f P_{\text{ср.с.н}} l_{\text{с.н}}} - \frac{x_1}{l_c}; \quad (9)$$

$$S_{\text{сн}} = \frac{\left(\frac{\gamma_c}{\alpha_c} + \frac{x_1}{l_c} - \frac{x_{1п}}{l_c} \right)^2}{\left(1 - \frac{x_{1п}}{l_c} \right)^2} \frac{\Delta h + \Delta_{1п}}{h_1} - \frac{\Delta_{1п}}{h_1}, \quad (10)$$

– силы, момента и мощности прокатки

$$P_{\text{с.н}} = p_{\text{ср.с.н}} l_{\text{с.н}} b; \quad (11)$$

$$M_{\text{с.н}} = 2P_{\text{с.н}} \psi_{\text{с.н}} l_{\text{с.н}} + R(h_0 q_0 - h_1 q_1) b; \quad (12)$$

$$W_{\text{с.н}} = M_{\text{с.н}} \omega_{\text{н}}, \quad (13)$$

– коэффициента, характеризующего положение точки равнодействующей при холодной прокатке

$$\psi_{\text{с.н}} = \frac{1}{6} \left[\frac{p_0}{p_{\text{ср.с.н}}} \left(1 - \frac{\gamma}{\alpha_c} - \frac{x_1}{l_c} \right) \left(1 - \frac{x_{1п}}{l_c} \right) - \right. \\ \left. - \frac{p_1}{p_{\text{ср.с.н}}} \left(\frac{\gamma_c}{\alpha_c} + \frac{x_1}{l_c} \right) + 2 \left(1 + \frac{\gamma_c}{\alpha_c} + \frac{x_{1п}}{l_c} - 2 \frac{x_1}{l_c} - \frac{x_{0п}}{l_c} \right) \right]; \quad (14)$$

$$p_0 = \frac{1,15\sigma_{т0}\xi_0}{1 - v_{п}^2}; \quad (15)$$

$$p_1 = \frac{1,15\sigma_{т1}\xi_1}{1 - v_{п}^2}; \quad (16)$$

здесь $x_{0п}$, $x_{1п}$ — протяженность участков контакта полосы с валком, определяемая упругими сжатием и вос-

становлением полосы; $l_{\text{в}}$, $\theta_{\text{в}}$ и $\omega_{\text{н}}$ — длина пластичного контакта полосы с валком ($l_{\text{в}} = l_c - x_{0п} - x_{1п}$), упругая постоянная материала рабочих валков и угловая скорость при прокатке с натяжением; h_0 , h_1 и Δh — толщина полосы на входе, на выходе из очага деформации и абсолютное обжатие полосы при прокатке; $v_{п}$ и $E_{п}$ — коэффициент Пуассона и модуль упругости материала полосы; f , b и $\Delta_{1п}$ — коэффициент трения при прокатке, ширина и упругое восстановление полосы; γ_c и α_c — нейтральный угол и угол контакта полосы с валками, подсчитанные с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы; p_0 и p_1 — нормальные напряжения на границах упругопластического контакта полосы с валком соответственно в зонах отставания и опережения; x_1 — приращение длины очага деформации за линией, соединяющей центры валков, вызванное упругим сжатием валков и упругим восстановлением полосы; η и $h_{\text{ср}}$ — относительная длина зоны отставания и средняя толщина полосы в очаге деформации; $\sigma_{т\text{исх}}$ — предел текучести материала полосы после горячей прокатки; $\sigma_{т0}$ и $\sigma_{т1}$ — предел текучести материала полосы на входе и выходе из очага деформации; $k_{\varepsilon\text{ср}}$, $k_{u\text{ср}}$ и $k_{t\text{ср}}$ — коэффициенты, учитывающие влияние средние значения степени, скорости и температуры деформации на напряжение текучести; ξ_0 , ξ_1 и $\xi_{\text{ср}}$ — коэффициенты, учитывающие влияние заднего, переднего и среднего натяжений на параметры процесса.

Из выражения (1) следует, что относительное уменьшение мощности при прокатке с натяжением определяется уровнем и характером изменения параметров $p_{\text{ср.с.н}}/p_{\text{ср.с.}}$, $\psi_{\text{с.н}}/\psi_{\text{с.}}$, $l_{\text{с.н}}/l_{\text{с.}}$, $(1 + S_{\text{с.н}})/(1 + S_{\text{с.н}})$ в аналогичных условиях прокатки, а также абсолютными значениями исходной толщины полосы, частного относительного обжатия и радиуса рабочих валков. В ходе моделирования было выявлено, что заднее и передние удельные натяжения оказывают неодинаковое количественное влияние на указанные выше параметры. Поэтому результаты моделирования представляли в виде графических зависимостей от относительного заднего $q_0/\beta\sigma_{т0}$ и переднего $q_1/\beta\sigma_{т1}$ натяжений (β — коэффициент Лодэ), или их соотношения.

На рис. 1, 2 в качестве примера приведены зависимости, построенные по результатам моделирования условий холодной прокатки относительно толстой ($h_0 = 2,0$ мм; $R/h_0 = 150$) ненаклепанной ($\varepsilon_{\text{пп}} = 0$) полосы с большим коэффициентом трения ($f = 0,12$) (рис. 1) и относительно тонкой ($h_0 = 0,25$ мм; $R/h_0 = 1200$) предварительно наклепанной ($\varepsilon_{\text{пп}} = 0,9$) полосы с малым коэффициентом трения ($f = 0,04$) (рис. 2), отражающие особенности и закономерности взаимодействия металла с инструментом соответственно в первых и последних клетях (пропусках) непрерывных (реверсивных) станов.

Из рис. 1, 2 видно, что суммарная мощность при холодной прокатке с одним и с двумя одинаковыми относительными удельными натяжениями всегда

меньше мощности прокатки без натяжения. Прокатка с одним задним натяжением (рис. 1, д и 2, д, кривые 2) обеспечивает более существенное уменьшение потребляемой мощности, чем прокатка с одним передним натяжением (рис. 1, д и 2, д, кривые 1). Наибольшее уменьшение мощности достигается при прокатке с двумя одинаковыми относительными удельными натяжениями (рис. 1, д и 2, д, кривые 3). При прокатке тонких предварительно наклепанных полос с одним задним натяжением наблюдается почти такое же уменьшение потребляемой мощности, как и при прокатке с двумя одинаковыми относительными удельными натяжениями (рис. 2, д кривые 2 и 3). Более высокая энергетическая эффективность процесса прокатки с одним задним натяжением объясняется тем, что воздействие заднего натяжения распространяется на зону отставания, которая занимает большую часть очага деформации. Кроме того, при прокатке с одним задним, или с превалирующим задним, натяжением уменьшается коэффициент плеча момента (рис. 1, в и 2, в, кривые 2) и происходит более существенное уменьшение параметра $p_{\text{ср.с.н}}/p_{\text{ср.с}}$ (рис. 1, а и 2, а, кривые 2).

Зависимости $p_{\text{ср.с.н}}/p_{\text{ср.с}} = \varphi(q/\beta\sigma_T)$ (рис. 1, а и 2, а) свидетельствуют об очень сильном влиянии натяжения на среднее контактное нормальное напряжение. Например, при прокатке с двумя одинаковыми ($q_0/\beta\sigma_{T0} = q_1/\beta\sigma_{T1} = 0,5$) относительными натяжениями, равными 0,5, значение параметра $p_{\text{ср.с.н}}/p_{\text{ср.с}}$ уменьшается до 0,4 – 0,5 (рис. 1, а и 2, а, кривые 3). Это означает, что в таких условиях прокатки величина $p_{\text{ср.с.н}}$ уменьшается в 2,0 – 2,5 раза по сравнению с прокаткой без натяжения. Поэтому можно утверждать, что уровень и характер изменения параметра $p_{\text{ср.с.н}}/p_{\text{ср.с}} = \varphi(q/\beta\sigma_T)$ оказывает решающее влияние на уровень и характер уменьшения мощности при прокатке с натяжением.

Большое влияние на мощность при прокатке с натяжением оказывает и уменьшение длины очага деформации (площади контактной поверхности). Зависимости $p_{\text{ср.с.н}}/p_{\text{ср.с}} = \varphi(q/\beta\sigma_T)$, $l_{\text{с.н}}/l_{\text{с}} = \varphi(q/\beta\sigma_T)$, как и $W_{\text{с.н}}/W_{\text{с}} = \varphi(q/\beta\sigma_T)$, $\psi_{\text{с.н}}/\psi_{\text{с}} = \varphi(q/\beta\sigma_T)$, имеют аналогичный убывающий характер изменения. Только в этом случае при прокатке с одним передним натяжением наблюдается более значительное уменьшение длины очага деформации (рис. 1, б и 2, б, кривые 1), чем при

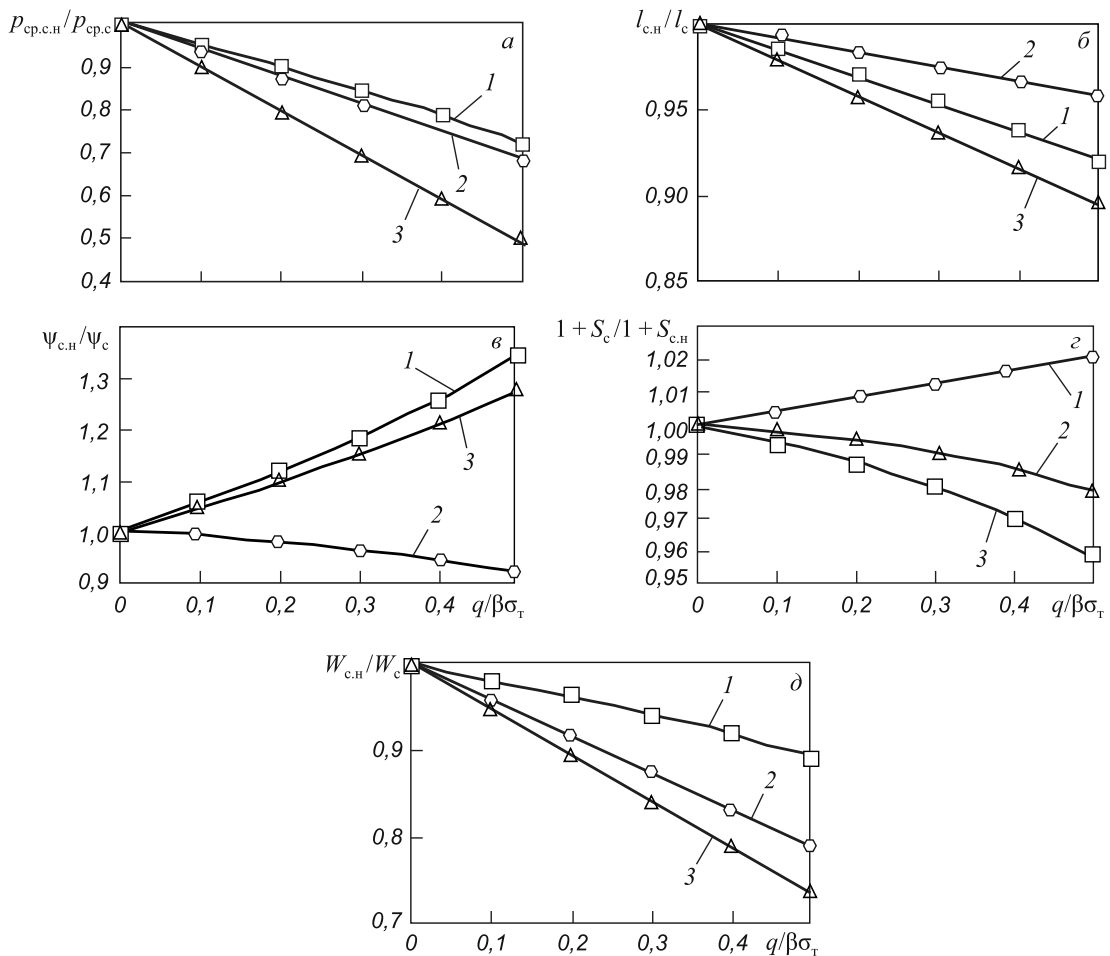


Рис. 1. Зависимости $p_{\text{ср.с.н}}/p_{\text{ср.с}} = \varphi(q/\beta\sigma_T)$ (а), $l_{\text{с.н}}/l_{\text{с}} = \varphi(q/\beta\sigma_T)$ (б), $\psi_{\text{с.н}}/\psi_{\text{с}} = \varphi(q/\beta\sigma_T)$ (в), $(1 + S_c)/(1 + S_{\text{с.н}}) = \varphi(q/\beta\sigma_T)$ (г) и $W_{\text{с.н}}/W_{\text{с}} = \varphi(q/\beta\sigma_T)$ (д), построенные по результатам моделирования условий холодной прокатки ненаклепанной ($\varepsilon_{\text{нр}} = 0$) полосы толщиной 2,0 мм из стали марки 08кп ($R/h_0 = 150$; $f = 0,12$; $\varepsilon = 0,3$):
1 – при $q_0/\beta\sigma_{T0} = 0$; $q_1/\beta\sigma_{T1} \neq 0$; 2 – при $q_0/\beta\sigma_{T0} \neq 0$; $q_1/\beta\sigma_{T1} = 0$; 3 – при $q_0/\beta\sigma_{T0} = q_1/\beta\sigma_{T1}$

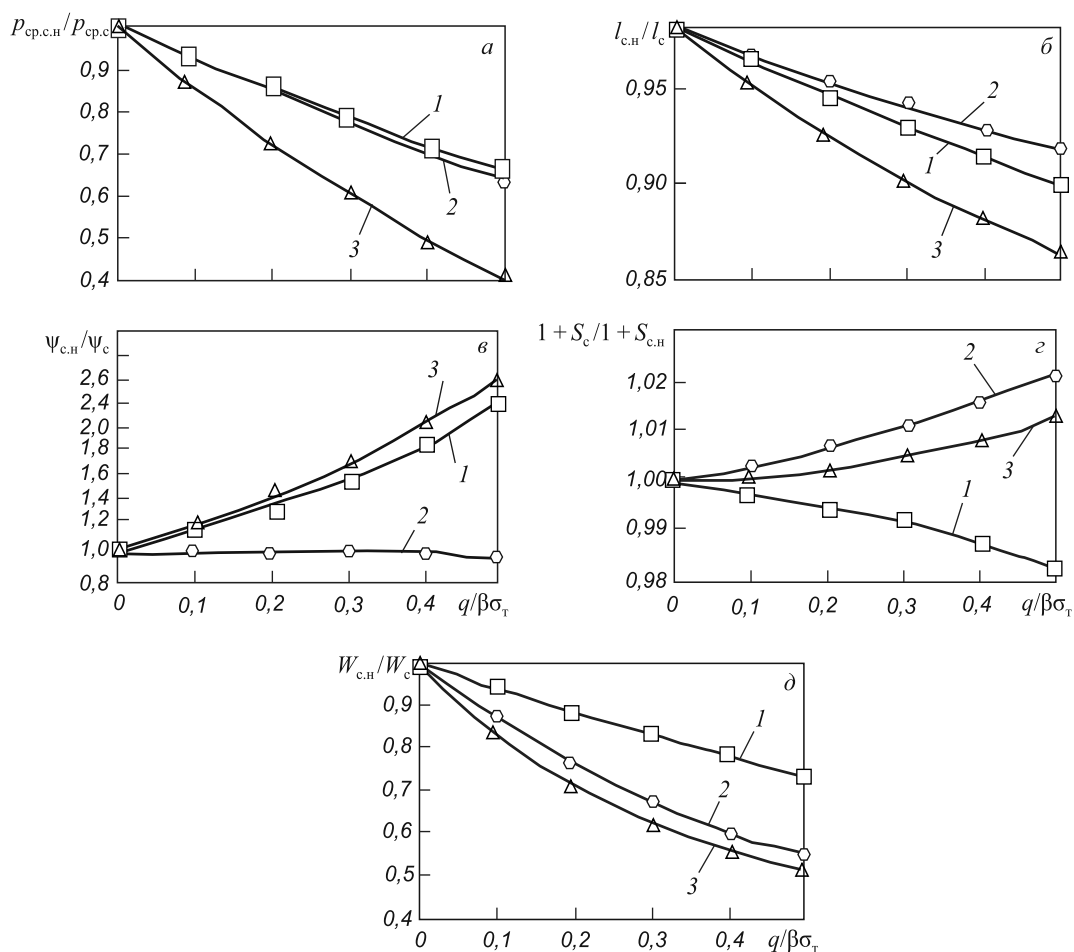


Рис. 2. Зависимости $p_{cp,с.н}/p_{cp,с} = \varphi(q/\beta\sigma_T)$ (а), $l_{с.н}/l_c = \varphi(q/\beta\sigma_T)$ (б), $\psi_{с.н}/\psi_c = \varphi(q/\beta\sigma_T)$ (в), $(1+S_c)/(1+S_{с.н}) = \varphi(q/\beta\sigma_T)$ (г) и $W_{с.н}/W_c = \varphi(q/\beta\sigma_T)$ (д), построенные по результатам моделирования условий холодной прокатки предварительно наклепанной ($\epsilon_{np} = 0,9$) полосы толщиной 0,25 мм стали марки 08кп ($R/h_0 = 150$; $f = 0,12$; $\epsilon = 0,3$). Обозначение то же, что и на рис. 1

прокатке с одним задним натяжением (рис. 1, б и 2, б, кривые 2). Это вызвано тем, что при прокатке с одним передним натяжением уменьшается величина упругого восстановления полосы и происходит смещение максимума эпюры контактных нормальных напряжений в сторону сечения входа металла в валки.

Значения $(1+S_c)/(1+S_{с.н})$ (рис. 1, г и 2, г) близки к единице и на изменение мощности при прокатке с натяжением практически не влияют. Зато сильное влияние на уровень потребляемой мощности при прокатке с натяжением оказывает относительное изменение коэффициента плеча момента. При прокатке с одним задним натяжением происходит смещение центра тяжести эпюры контактных нормальных напряжений в сторону сечения выхода металла из валков и параметр $\psi_{с.н}/\psi_c$ уменьшается (рис. 1, в и 2, в, кривые 2). При прокатке с одним передним (рис. 1, в и 2, в, кривые 1) и с двумя одинаковыми (рис. 1, в и 2, в, кривые 3) относительными удельными натяжениями центр тяжести эпюры нормальных контактных напряжений смещается ближе к сечению входа металла в валки, в результате чего значения параметра $\psi_{с.н}/\psi_c$ увеличивается до 1,35–2,50. Однако, несмотря на такие большие значения параметра $\psi_{с.н}/\psi_c$,

мощность при прокатке с натяжением уменьшается, поскольку произведение $(p_{cp,с.н}/p_{cp,с})(\psi_{с.н}/\psi_c)(l_{с.н}/l_c)^2$ всегда значительно меньше единицы.

Из вышеизложенного следует, что уменьшение мощности при прокатке с натяжением происходит в результате уменьшения контактных нормальных напряжений и поверхности контакта металла с инструментом вследствие уменьшения влияния упругих деформаций валков и полосы. Результаты выполненного моделирования показали, что при прокатке полос толщиной 2,0 и 0,25 мм с двумя одинаковыми относительными натяжениями, равными 0,4–0,5, потребляемая мощность снижается соответственно на 22–27 и 44–49 % по сравнению с мощностью при прокатке без натяжения. Было выявлено также, что энергетическая эффективность процесса холодной прокатки с натяжением повышается с уменьшением толщины полосы и частного относительного обжатия, а также с увеличением предварительного относительного обжатия, коэффициента трения и радиуса рабочих валков.

В таблице в качестве примера приведены результаты расчета энергосиловых параметров и мощности приводных двигателей при прокатке жести из стали

**Действующий (числитель) и предложенный (знаменатель) режимы натяжения
и энергосиловые параметры при холодной прокатке жести 0,20×855 мм из подката 2,4×855 мм
на шестиклетьевом жестепрокатном стане 1400 «Arselor Mittal Timirtau»**

Номер клетей	h_0 , мм	ε	$q_1/\beta\sigma_{r1}$	q_1 , Н/мм ²	t_{1n} , °C	f	$l_{с.н}$, мм	$P_{ср.с.н}$, Н/мм ²	$S_{с.н}$, %	$V_{в.н}$, м/с	$P_{с.н}$, МН	$M_{дв.н}$, кН·м	$W_{дв.н}$, кВт
1	2,40	0,140	$\frac{0,34}{0,38}$	$\frac{160}{181}$	$\frac{55}{55}$	$\frac{0,086}{0,086}$	$\frac{12,61}{12,50}$	$\frac{473,19}{455,61}$	$\frac{4,2}{4,7}$	$\frac{3,05}{3,03}$	$\frac{5,09}{4,87}$	$\frac{-20,63}{-33,23}$	$\frac{-209,80}{-336,18}$
2	2,06	0,404	$\frac{0,22}{0,36}$	$\frac{140}{230}$	$\frac{112}{106}$	$\frac{0,072}{0,072}$	$\frac{18,65}{18,34}$	$\frac{627,51}{566,49}$	$\frac{4,9}{5,6}$	$\frac{5,08}{5,05}$	$\frac{10,00}{8,88}$	$\frac{180,86}{151,51}$	$\frac{3063,44}{2549,42}$
3	1,23	0,398	$\frac{0,25}{0,32}$	$\frac{175}{227}$	$\frac{161}{147}$	$\frac{0,049}{0,049}$	$\frac{15,24}{14,81}$	$\frac{757,95}{644,81}$	$\frac{5,4}{3,8}$	$\frac{8,41}{8,53}$	$\frac{9,88}{8,16}$	$\frac{121,26}{121,61}$	$\frac{3397,06}{3459,33}$
4	0,74	0,392	$\frac{0,25}{0,29}$	$\frac{190}{220}$	$\frac{199}{184}$	$\frac{0,048}{0,048}$	$\frac{12,68}{12,39}$	$\frac{842,72}{773,06}$	$\frac{6,7}{5,9}$	$\frac{13,66}{13,75}$	$\frac{9,13}{8,19}$	$\frac{88,61}{87,50}$	$\frac{4032,35}{4010,41}$
5	0,45	0,310	$\frac{0,26}{0,27}$	$\frac{200}{212}$	$\frac{215}{202}$	$\frac{0,057}{0,057}$	$\frac{10,46}{10,26}$	$\frac{966,97}{921,77}$	$\frac{6,6}{6,4}$	$\frac{19,81}{19,84}$	$\frac{8,65}{8,08}$	$\frac{55,57}{55,02}$	$\frac{3668,78}{3640,24}$
6	0,31	0,357	$\frac{0,04}{0,04}$	$\frac{34}{34}$	$\frac{235}{224}$	$\frac{0,041}{0,041}$	$\frac{10,56}{10,48}$	$\frac{1140,68}{1121,71}$	$\frac{7,1}{6,9}$	$\frac{30,67}{30,71}$	$\frac{10,30}{10,05}$	$\frac{60,99}{60,72}$	$\frac{6236,70}{6218,05}$

Примечание. $\sigma_r = 260 + 34,6(100\varepsilon_r)^{0,6}$; $t_{он} = 40^\circ\text{C}$; $t_{ов1}^* = 40^\circ\text{C}$; $t_{ов2}^* = 44^\circ\text{C}$; $t_{ов3}^* = 48^\circ\text{C}$; $t_{ов4}^* = 52^\circ\text{C}$; $t_{ов5}^* = 56^\circ\text{C}$; $t_{ов6}^* = 65^\circ\text{C}$; $t_{охл} = 40^\circ\text{C}$; $t_{ов1}^*, \dots, t_{ов6}^*$ – среднemasовая температура рабочих валков клетей стана.

марки 08кп на шестиклетьевом стане 1400 «Arselor Mittal Timirtau» (Казахстан) по существующему и предлагаемому режимам натяжений. Расчет параметров процесса производили по методике, представленной в работах [1, 3, 4], точность которой подтверждена экспериментальными исследованиями, выполненными на рассматриваемом стане. Режим обжатий и скоростной режим прокатки, а также заднее натяжение перед первой клетью ($q_{01} = 22 \text{ Н/мм}^2$), и переднее натяжение за последней клетью ($q_{16} = 34 \text{ Н/мм}^2$) оставались неизменными. Предлагаемый режим натяжений предусматривает использование более высоких убывающих относительных удельных натяжений. Результаты выполненного расчета свидетельствуют о том, что при реализации предложенного режима натяжений суммарная потребляемая мощность приводных двигателей стана может быть уменьшена на 3,21 %. Примерно такая же энергетическая эффективность в результате совершенствования режимов натяжений на стане 2030 ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат» зафиксирована экспериментальным путем авторами работы [5].

Выводы. Методом математического моделирования получены количественные данные о влиянии натяжения на мощность процесса холодной прокатки. Установлено, что потребляемая мощность при холодной прокатке с одним задним, с одним передним или с двумя одинаковыми относительными удельными натяжениями всегда меньше потребляемой мощности при прокатке без натяжения. Раскрыт механизм влияния натяжения на мощность при холодной прокатке. Установлено, что уменьшение мощности при прокатке с натяжением происходит в результате снижения контактных нор-

мальных напряжений и длины очага деформации (поверхности контакта металла с инструментом), вследствие уменьшения влияния упругих деформаций валков и полосы. Результаты выполненного моделирования показали, что энергетическая эффективность процесса холодной прокатки с натяжением повышается с уменьшением толщины и частного относительного обжатия, а также с увеличением предварительного относительного обжатия, коэффициента трения и радиуса валков. При прокатке тонких ($R/h_0 = 1200$) предварительно наклепанных полос ($\varepsilon_{пр} = 0,9$) с двумя одинаковыми относительными удельными натяжениями, равными 0,4 – 0,5, потребляемая мощность снижается на 44 – 49 % по сравнению с прокаткой без натяжения. На примере прокатки жести 0,20×855 мм из подката 2,4×855 мм на шестиклетьевом стане 1400 ОАО «Arselor Mittal Timirtau» показано, что за счет совершенствования режимов натяжений суммарная потребляемая мощность может быть уменьшена на 3,21 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Василев Я.Д., Минаев А.А. Теория продольной прокатки. – Донецк: УНИТЕХ, 2010. – 456 с.
2. Василев Я.Д. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 6. С. 3 – 5.
3. Василев Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1995. – 368 с.
4. Василев Я.Д., Дементенко А.В. – В кн.: Непрерывная прокатка. – Днепропетровск: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – 456 с.
5. Чернов П.П., Мухин Ю.А., Бахаев К.В. – В кн.: Труды 6 Конгресса прокатчиков. – Липецк: изд. ЛПИ, 2005. С. 186 – 190.

© 2012 г. Я.Д. Василев, Д.Н. Самокиш
Поступила 19 декабря 2011 г.