

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.771.001.23

Я.Д. Василев

Национальная металлургическая академия Украины (г. Днепропетровск)

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАТЯЖЕНИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПОЛОСОВОЙ ПРОКАТКИ

Холодная полосовая прокатка относится к числу наиболее энергоемких процессов пластической деформации [1], поэтому изыскание возможностей для уменьшения расхода энергии актуально.

Одним из факторов, влияющих на расход энергии при холодной прокатке тонких полос, является натяжение, точнее уровень и соотношение заднего и переднего относительных удельных натяжений [2]. Однако количественное влияние этого фактора на расход энергии в настоящее время теоретически и экспериментально исследовано недостаточно [2–4].

Из теории прокатки [2, 3, 5] известно, что применение натяжения приводит к существенному уменьшению истинного сопротивления деформации, контактных нормальных напряжений и напряжений трения, а также поверхности контакта металла с инструментом вследствие уменьшения влияния упругих деформаций валков и полосы. Снижение абсолютных значений перечисленных параметров под действием внешних тяущих сил значительно и способствует заметному снижению мощности при холодной прокатке тонких полос.

Настоящее исследование посвящено теоретическому определению влияния натяжения на энергетическую эффективность процесса холодной полосовой прокатки.

При симметричном процессе холодной прокатки без натяжения вся мощность W_c , необходимая для осуществления обжатия полосы, передается только через валки и определяется по формуле

$$W_c = 2M_c \frac{V_b}{R} = 2P_c \Psi_c l_c \frac{V_b}{R}, \quad (1)$$

где M_c , P_c , Ψ_c и l_c – крутящий момент на бочке одного валка, сила прокатки, коэффициент, характеризующий точку приложения силы P_c (коэффициент плеча момента), и длина очага деформации при холодной прокатке, рассчитанные с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы; V_b и R – окружная скорость и радиус рабочих валков.

При симметричной прокатке с натяжением часть необходимой мощности для осуществления пластической деформации валками подводится к полосе и создается двигателями моталок или двигателями смежных клетей

непрерывного стана. Уравнение баланса мощностей в этом случае записывается в виде [2, 3]

$$W_{c,h} = W_{c,h,b} - W_0 + W_1, \quad (2)$$

где $W_{c,h}$ – суммарная мощность при прокатке с натяжением; $W_{c,h,b}$ – мощность на бочках валков при прокатке с натяжением, рассчитанная с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы; W_0 и W_1 – мощность заднего и переднего натяжений.

Слагаемые правой части уравнения (2) определяются из соотношений

$$W_{c,h,b} = 2M_{c,h} \frac{V_{b,h}}{R} = (2P_{c,h} \Psi_{c,h} l_{c,h} + Q_0 R - Q_1 R) \frac{V_{b,h}}{R}, \quad (3)$$

$$W_0 = Q_0 V_{0h}; \quad (4)$$

$$W_1 = Q_1 V_{1h}; \quad (5)$$

здесь Q_0 и Q_1 – полное заднее и переднее натяжение; V_{0h} и V_{1h} – скорость заднего и переднего конца полосы при прокатке с натяжением; индекс « h » указывает на то, что расчет параметров осуществляется для холодной прокатки с натяжением.

После подстановки $W_{c,h,b}$, W_0 и W_1 в уравнение (2) получим

$$W_{c,h} = (2P_{c,h} \Psi_{c,h} l_{c,h} + Q_0 R - Q_1 R) \frac{V_{b,h}}{R} - Q_0 V_{0h} + Q_1 V_{1h}. \quad (6)$$

Влияние натяжения на мощность (расход энергии) при холодной прокатке будем оценивать по соотношению $W_{c,h}/W_c$ [2]:

$$\frac{W_{c,h}}{W_c} = \frac{(2P_{c,h} \Psi_{c,h} l_{c,h} + Q_0 R - Q_1 R) \frac{V_{b,h}}{R} - Q_0 V_{0h} + Q_1 V_{1h}}{2P_c \Psi_c l_c \frac{V_b}{R}}. \quad (7)$$

Если учесть, что $P_c \Psi_c l_c = p_{cp,c} \Psi_c l_c^2 b_{cp}$; $P_{c,h} \Psi_{c,h} l_{c,h} = p_{cp,c,h} \Psi_{c,h} l_{c,h}^2 b_{cp,h}$; $Q_0 = q_0 h_0 b_0$; $Q_1 = q_1 h_1 b_1$; $V_{0h} = V_{1h} h_1 b_1 / (h_0 b_0)$ (где $p_{cp,c}$ и $p_{cp,c,h}$ – средние контактные нормальные напряжения при прокатке с натяжением и без натяжения,

рассчитанные с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы; q_0 и q_1 – заднее и переднее удельные натяжения; h_0 и b_0 , h_1 и b_1 – соответственно толщина и ширина полосы до и после прокатки; $b_{\text{ср}}$ – средняя ширина полосы в очаге деформации) и пренебречь уширением полосы ($b_0 = b_1 = b_{\text{ср}}$), выражение (7) представится в виде

$$\frac{W_{\text{с.н}}}{W_c} = \frac{\left(2p_{\text{ср.с.н}}\Psi_{\text{с.н}}l_{\text{с.н}}^2 + q_0h_0R - q_1h_1R\right)\frac{V_{\text{в.н}}}{R}}{2p_{\text{ср.с}}\Psi_c l_c^2 \frac{V_{\text{в}}}{R}} - \frac{q_0h_0V_{\text{0н}} + q_1h_1V_{\text{1н}}}{2p_{\text{ср.с}}\Psi_c l_c^2 \frac{V_{\text{в}}}{R}}. \quad (8)$$

Из последнего выражения видно, что соотношение $W_{\text{с.н}}/W_c$ зависит от скоростных условий холодной прокатки с натяжением и без натяжения. Исходя из этого запишем выражение (8) для одинаковой окружной скорости валков ($V_{\text{в.н}} = V_{\text{в}}$) и одинаковой скорости полосы на выходе из очага деформации ($V_{\text{1н}} = V_1$) при прокатке с натяжением ($V_{\text{1н}}$) и без натяжения (V_1). Принимая во внимание, что $V_{\text{1н}} = V_{\text{в.н}}(1 + S_{\text{с.н}})$ и $V_1 = V_{\text{в}}(1 + S_c)$, где $S_{\text{с.н}}$ и S_c – опережения при прокатке с натяжением и без натяжения, рассчитанные с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы, получим:

при $V_{\text{в.н}} = V_{\text{в}}$

$$\frac{W_{\text{с.н}}}{W_c} = \frac{p_{\text{ср.с.н}}}{p_{\text{ср.с}}} \frac{\Psi_{\text{с.н}}}{\Psi_c} \left(\frac{l_{\text{с.н}}}{l_c}\right)^2 + \frac{Rh_0}{2p_{\text{ср.с}}\Psi_c l_c^2} [q_0\varepsilon + S_{\text{с.н}}(1-\varepsilon)(q_1 - q_0)]; \quad (9)$$

при $V_{\text{1н}} = V_1$

$$\frac{W_{\text{с.н}}}{W_c} = \left\{ \frac{p_{\text{ср.с.н}}}{p_{\text{ср.с}}} \frac{\Psi_{\text{с.н}}}{\Psi_c} \left(\frac{l_{\text{с.н}}}{l_c}\right)^2 + \frac{Rh_0}{2p_{\text{ср.с}}\Psi_c l_c^2} \times \right. \\ \left. \times [q_0\varepsilon + S_{\text{с.н}}(1-\varepsilon)(q_1 - q_0)] \right\} \frac{(1 + S_c)}{(1 + S_{\text{с.н}})}, \quad (10)$$

где ε – частное относительное обжатие полосы при прокатке.

Вычисленные по выражениям (9), (10) значения $W_{\text{с.н}}/W_c$ позволяют судить об относительном изменении мощности (расхода энергии) при холодной прокатке с натяжением, причем соотношение (10) является более корректным, поскольку оно соответствует условию одинаковой производительности при прокатке с натяжением и без натяжения.

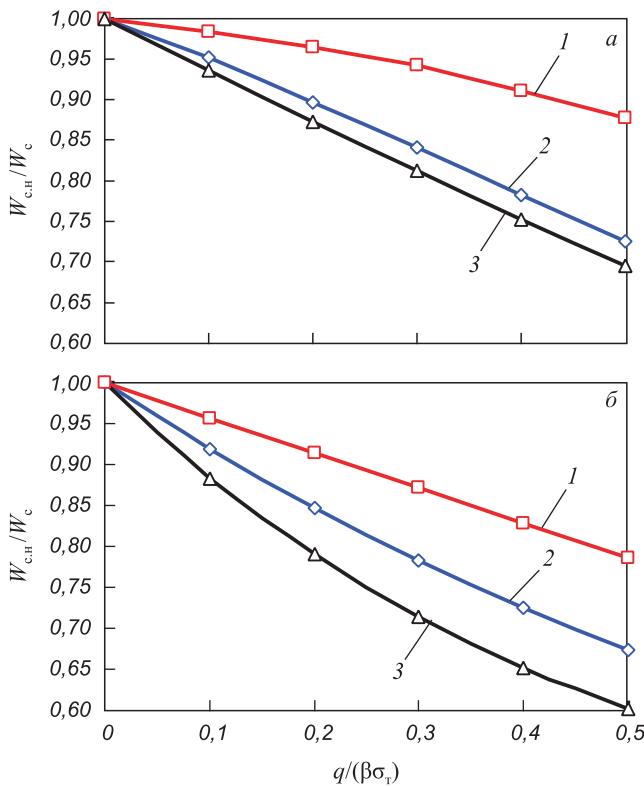
Проанализируем выражения (9) и (10). Рассмотрим сначала случай, когда холодная прокатка тонкой поло-

сы осуществляется с одним задним ($q_1 = 0$) натяжением. В этом случае влияние натяжения распространяется только на зону отставания, которая занимает большую часть очага деформации и приводит к значительному уменьшению энергосиловых параметров. По этой причине $p_{\text{ср.с.н}}\Psi_{\text{с.н}}l_{\text{с.н}}^2 < p_{\text{ср.с}}\Psi_c l_c^2$ и $Rh_0[q_0\varepsilon + S_{\text{с.н}}(1 + \varepsilon)(q_1 - q_0)] < 2p_{\text{ср.с}}\Psi_c l_c^2$, в результате чего каждое из слагаемых правой части выражений (9) и (10) и их сумма приобретают значения меньше единицы. Это означает, что по сравнению с прокаткой без натяжения, потребляемая мощность при прокатке с одним задним, или с превалирующим задним ($q_1 \gg q_0$), натяжением уменьшается.

Аналогичные закономерности имеют место и при прокатке с одним передним ($q_0 = 0$) натяжением. Однако влияние переднего натяжения распространяется только на зону опережения, которая занимает меньшую часть очага деформации и, кроме того, переднее натяжение вызывает увеличение коэффициента $\Psi_{\text{с.н}}$ ($\Psi_{\text{с.н}} > \Psi_c$). Поэтому процесс холодной прокатки с одним передним, или с превалирующим передним ($q_1 \gg q_0$), натяжением энергетически менее эффективен.

Изложенный механизм влияния натяжения на энергетическую эффективность процесса холодной прокатки подтверждается результатами моделирования функции $W_{\text{с.н}}/W_c = \phi(q_0/\beta\sigma_{t0}; q_1/\beta\sigma_{t1})$, где σ_{t0} и σ_{t1} – предел текучести материала полосы на входе и на выходе из очага деформации; β – коэффициент Лоде. На рисунке в качестве примера представлены графические зависимости $W_{\text{с.н}}/W_c = \phi(q_0/\beta\sigma_{t0}; q_1/\beta\sigma_{t1})$, построенные по выражению (10) для случаев холодной прокатки относительно толстой ($R/h_0 = 150$) ненаклепанной ($\varepsilon_{\text{пп}} = 0$) (позиция *a*) и относительно тонкой ($R/h_0 = 600$) предварительно наклепанной ($\varepsilon_{\text{пп}} = 0,75$) (позиция *б*) полосы из стали 08kp. Расчеты параметров процесса холодной прокатки производили по методике [2, 5, 6], учитывающей влияние упрочнения материала полосы, натяжения, упругих деформаций валков и полосы, коэффициента трения и температурно-скоростных условий деформации. Точность и надежность прогнозирования параметров процесса холодной прокатки по принятой методике, созданной на кафедре обработки металлов давлением Национальной металлургической академии Украины (г. Днепропетровск), подтверждены результатами многочисленных лабораторных и промышленных экспериментов [2, 5, 6]. Упрочнение стали 08kp описывали уравнением $\sigma_t = 230 + 34,6(100\varepsilon)^{0,6}$.

Представленные на рисунке зависимости $W_{\text{с.н}}/W_c = \phi(q_0/\beta\sigma_{t0}; q_1/\beta\sigma_{t1})$ имеют одинаковый характер изменения. Они свидетельствуют о том, что с ростом относительного удельного натяжения энергетическая эффективность процесса холодной прокатки повышается, причем заднее натяжение (кривые 2) обеспечивает более существенное снижение мощности, чем переднее (кривые 1). При прокатке с двумя одинаковыми относительными удельными натяжениями (кривые 3) снижение потребляемой мощности максимально и для рассма-



Зависимости $W_{c,H}/W_c = \phi(q/\beta\sigma_y)$ при холодной прокатке полосы из ненаклепанной ($\varepsilon_{np} = 0$) стали 08kp при $h_0 = 2,0$ мм; $R = 300$ мм; $f = 0,12$; $\varepsilon = 0,3$ (а) и предварительно наклепанной ($\varepsilon_{np} = 0,75$) стали 08kp при $h_0 = 0,5$ мм; $R = 300$ мм; $f = 0,04$; $\varepsilon = 0,3$ (б):
1 – при $q_0/\beta\sigma_{T0} = 0$ и $q_1/\beta\sigma_{T1} > 0$; 2 – при $q_1/\beta\sigma_{T1} = 0$ и $q_0/\beta\sigma_{T0} > 0$;
3 – при $q_0/\beta\sigma_{T0} = q_1/\beta\sigma_{T1} > 0$

требуемых условий прокатки при $q_0/\beta\sigma_{T0} = q_1/\beta\sigma_{T1} = 0,5$ достигает 23–40 %. Важно также отметить, что с уменьшением толщины и с увеличением степени предварительного наклена полосы энергетическая эффективность процесса холодной прокатки с натяжением возрастает.

Из вышеизложенного следует, что по выражениям (9) и (10) может быть легко определена энергетическая эффективность процесса холодной прокатки с натяжением, поэтому они могут быть использованы в качестве критериев при разработке оптимальных режимов натя-

жений, обеспечивающих ведение процесса с наименьшим расходом энергии.

Выводы. С использованием уравнения энергетического баланса впервые получены корректные теоретические зависимости для определения относительного изменения мощности (расхода энергии) при холодной полосовой прокатке с натяжением. Результаты выполненного теоретического исследования показали, что потребляемая мощность при прокатке с натяжением всегда меньше мощности при прокатке без натяжения. Поэтому прокатка с натяжением является энергетически более выгодным процессом. Установлено, что потребляемая мощность при прокатке с одним задним, или превалирующим задним, натяжением значительно меньше потребляемой мощности при прокатке с одним передним, или с превалирующим передним, натяжением. При прокатке с двумя одинаковыми относительными удельными натяжениями потребляемая мощность приобретает наименьшее значение. Полученные теоретические зависимости для определения относительного изменения мощности при прокатке с натяжением рекомендуются в качестве критериев для оценки энергетической эффективности процесса холодной прокатки с натяжением и разработки энергосберегающих режимов обжатий и натяжений на полосовых станах холодной прокатки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Василев Я.Д., Сафьян М.М. Производство полосовой и листовой стали. – Киев: Вища школа, 1976. – 192 с.
2. Василев Я.Д., Минаев А.А. Теория продольной прокатки. Учебник. – Донецк: УНИТЕХ, 2010. – 465 с.
3. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
4. Чернов П.П., Мухин Ю.А., Бахаев К.В. – В кн.: Труды 6 Конгресса прокатчиков. Т. 1. – М.: МОО «Объединение прокатчиков», 2005. С. 186–190.
5. Василев Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1995. – 368 с.
6. Василев Я.Д., Дементиенко А.В. Непрерывная прокатка тонких и особо тонких полос. Непрерывная прокатка. – Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – 456 с.

© 2012 г. Я.Д. Василев
Поступила 10 ноября 2011 г.