

УДК 621.771.23

Василев Я. Д.  
 Коноводов Д. В.  
 Дементенко А. В.  
 Самокиш Д. Н.  
 Завгородний М. И.

### УТОЧНЕНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПОЛОСОВОЙ ПРОКАТКЕ С БОЛЬШИМ ГРАДИЕНТОМ УДЕЛЬНЫХ НАТЯЖЕНИЙ

Приложение тянущих сил к концам полосы при прокатке приводит к уменьшению контактных напряжений и силы, действующей на валки. Для выполнения расчетов технологических параметров при холодной полосовой прокатке обычно достаточно знать величину среднего контактного нормального напряжения  $p_{срс}$ , рассчитанную с учетом совместного влияния обжатия, натяжения, температурно-скоростных условий и упругих деформаций валков и полосы. В общем виде формула для расчета  $p_{срс}$  записывается в виде:

$$p_{срс} = n_{\sigma} \beta \sigma_{тср} \xi_{ср} ; \quad (1)$$

$$\xi_{ср} = 1 - \frac{q_{ср}}{\beta \sigma_{ср}}, \quad (2)$$

где  $n_{\sigma}$ ,  $\sigma_{тср}$ ,  $q_{ср}$  – коэффициент напряженного состояния, средние значения напряжения текучести материала полосы и удельного натяжения в очаге при холодной прокатке;  $\beta$  – коэффициент Лоде.

Для определения параметров  $n_{\sigma}$ ,  $\beta$ ,  $\sigma_{тср}$  в литературе [1–3] предложены соответствующие модели и методики, обеспечивающие получение расчетных данных с удовлетворительной точностью. Слабым местом формулы (1) является определение коэффициента натяжения  $\xi_{ср}$ . Вычисление коэффициента  $\xi_{ср}$  производят по приближенным моделям, что приводит к снижению точности расчета  $p_{срс}$ , силы  $P_c$  и момента  $M_c$  при холодной прокатке с натяжением. Отклонения расчетных значений параметров  $p_{срс}$ ,  $P_c$ ,  $M_c$  от экспериментальных, вызванные недостаточной точностью определения коэффициента  $\xi_{ср}$ , в настоящее время не исследованы. Поэтому получение данных о влиянии точности определения коэффициента  $\xi_{ср}$  на точность расчета энергосиловых параметров при холодной прокатке с натяжением актуально.

В работе [4] показано, что для определения коэффициента  $\xi_{ср}$  при холодной прокатке с натяжением применяют модели М. Д. Стоуна, Д. Блэнда и Г. Форда, В. Робертса [4]. Из них наибольшее распространение в зарубежной практике получила модель Д. Блэнда и Г. Форда:

$$\xi_{ср} = \xi_0 \left( 1,05 + 0,1 \frac{\xi_1}{\xi_0} - 0,15 \frac{\xi_0}{\xi_1} \right); \quad (3)$$

$$\xi_0 = 1 - \frac{q_0}{\beta \sigma_{m0}}; \quad (4)$$

$$\xi_1 = 1 - \frac{q_1}{\beta \sigma_{m1}}, \quad (5)$$

где  $q_0$ ,  $q_1$  – заднее и переднее удельное натяжение;

$\sigma_{m0}$ ,  $\sigma_{m1}$  – предел текучести материала полосы на входе и выходе из очага деформации.

Модели  $\xi_{ср}$  упомянутых авторов не имеют достаточного теоретического обоснования и относятся к разделу приближенных. С целью устранения указанных недостатков в работе [4] предложена более точная модель для определения коэффициента  $\xi_{ср}$ :

$$\xi_{cp} = \xi_0 + (\xi_1 - \xi_0) \cdot \left( \frac{\gamma_c}{\alpha_c} + \frac{x_1}{l_c} \right), \quad (6)$$

где  $l_c$ ,  $\gamma_c$ ,  $\alpha_c$  – длина очага деформации, нейтральный угол и угол контакта полосы с валком при холодной прокатке с натяжением, рассчитанные с учетом влияния упругих деформаций валков и полосы;  $x_1$  – приращение длины очага деформации за линией, соединяющей центры вращения валков, вызванное упругим сжатием валков и упругим восстановлением полосы.

Расчетные формулы для определения параметров  $l_c$ ,  $\gamma_c$ ,  $\alpha_c$  и  $x_1$  содержатся в работе [1].

Результаты сравнительных исследований показали [4], что модели М. Д. Стоуна, Д. Блэнда и Г. Форда, В. Робертса могут быть использованы для прогнозирования коэффициента  $\xi_{cp}$  только при холодной прокатке с примерно одинаковыми относительными удельными натяжениями ( $\xi_0 \approx \xi_1$ ). Показано, что широким диапазоном работоспособности и более высокой точностью отличается модель (6). Она обеспечивает получение надежных данных о коэффициенте  $\xi_{cp}$  при прокатке с одинаковыми ( $\xi_0 = \xi_1$ ), с одним ( $\xi_0 = 1$  или  $\xi_1 = 1$ ), либо с существенно отличающимися ( $\xi_0 \gg \xi_1$  или  $\xi_1 \gg \xi_0$ ) относительными удельными натяжениями. По этой причине применение модели (6) для расчета энергосиловых параметров при холодной прокатке с натяжением является предпочтительным.

Целью настоящей работы является уточнение методики для расчета энергосиловых параметров при холодной полосовой прокатке, когда процесс осуществляется с большим градиентом удельных натяжений и исследованием ее точности.

Для расчета энергосиловых параметров при холодной прокатке с натяжением известна инженерная методика НМетАУ [1, 2], основанная на использовании модели (3) для определения коэффициента  $\xi_{cp}$ . Исследования [4] показали, что при прокатке с примерно одинаковыми удельными натяжениями инженерная методика обеспечивает получение данных о параметрах процесса холодной прокатки с удовлетворительной точностью. Для повышения точности расчета энергосиловых параметров холодной прокатки, когда процесс осуществляется с большим градиентом удельных натяжений или только с одним натяжением, инженерная методика была уточнена. В основу уточненной методики, помимо модели (6), были положены следующие зависимости для определения:

среднего контактного нормального напряжения:

$$p_{cpc} = \frac{\beta}{2(1-\nu_n^2)} \left[ \sigma_{m0} \xi_0 \frac{x_{0n}}{l_c} + \sigma_{m1} \xi_1 \frac{x_{1n}}{l_c} \right] + \frac{\beta \sigma_{mcp} \xi_{cp}}{1-\nu_n^2} \left[ 1 + \frac{f l_c}{3 h_{cp}} (1 + 0,5 \varepsilon) \frac{l_\varepsilon}{l_c} \right] \frac{l_\varepsilon}{l_c}; \quad (7)$$

длины очага деформации:

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

где:

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

силы прокатки:

$$P_c = p_{cpc} l_c b. \quad (10)$$

В моделях (7) ÷ (9) приняты обозначения:  $x_{1n}$  – приращения длины очага деформации, вызванные упругим сжатием и упругим восстановлением полосы;  $\nu_\varepsilon$ ,  $\nu_n$  – коэффициенты Пуассона материала валков и полосы;  $h_{cp}$ ,  $b$  – средняя толщина и ширина прокатываемой полосы;  $R$ ,  $E_\varepsilon$  – радиус и модуль упругости рабочего валка;  $\varepsilon$ ,  $\Delta h$ ,  $f$ ,  $l_\varepsilon$  – относительное и абсолютное обжатие полосы, коэффициент трения при прокатке и длина пластического участка контакта полосы с валком при прокатке ( $l_c = x_{0n} + l_\varepsilon + x_{1n}$ ).

О работоспособности и точности методики расчета энергосиловых параметров процесса холодной полосовой прокатки с большим градиентом удельных натяжений судили по результатам сравнения расчетных данных с экспериментальными, полученными на непрерывных четырехклетевых станах 1700 ОАО «Северсталь» (г. Череповец, Российская Федерация) и 1680 ОАО «Запорожсталь» (г. Запорожье, Украина), пятиклетевом стане 1700 и шестиклетевом жестепрокатном стане 1400 комбината «ИСПАТ-КАРМЕТ» (г. Тимиртау, Казахстан). Особенностью работы этих, как впрочем, и других непрерывных станов является то, что прокатка в первых клетях осуществляется с малыми задними ( $\sim 10\text{--}20 \text{ Н/мм}^2$ ) и с большими передними ( $100\text{--}200 \text{ Н/мм}^2$ ), а в последних клетях – с большими задними ( $180\text{--}250 \text{ Н/мм}^2$ ) и с малыми передними ( $25\text{--}35 \text{ Н/мм}^2$ ) удельными натяжениями, в то время как в промежуточных клетях применяют большие ( $180\text{--}250 \text{ Н/мм}^2$ ) и примерно одинаковые удельные натяжения.

В табл. 1–2 приведены результаты расчета энергосиловых параметров, полученные по инженерной методике НМетАУ с использованием моделей (6) (числитель) и (3) (знаменатель) для определения коэффициента  $\xi_{cp}$ , а также экспериментальные данные о силе прокатки для основного сортамента полос, прокатываемых по принятым на станах 1400–1700 режимам обжатий и натяжений. Данные табл. 1 и 2, представленные в одну строку, являются общими при расчете с использованием моделей (6) и (3).

Расчетные значения силы прокатки  $P_c$  сравнивали с экспериментальными значениями  $P_{эксн}$ . Расхождения между ними определяли как  $(P_c - P_{эксн})/P_{эксн}$ , %.

Таблица 1

Режимы обжатий и энергосиловые параметры при холодной прокатке полос на непрерывных станах холодной прокатки 1700 и 1400 комбината «ИСПАТ-КАРМЕТ»

№ кл	$h_0$ , мм	$\varepsilon$	$\frac{q_0}{H}$ , $\frac{H}{\text{мм}^2}$	$\frac{q_1}{H}$ , $\frac{H}{\text{мм}^2}$	$V_l$ , м/с	$f$	$l_c$ , мм	$t_{nl}$ , °C	$\frac{\xi_{cp}}{\xi_{cpB}}$	$\frac{P_{срс}}{H}$ , $\frac{H}{\text{мм}^2}$	$\frac{P_c}{P_{сБ}}$ , МН	$P_{эксн}$ , МН	$\frac{\Delta P}{\Delta P_B}$ , %	$M_c$ , кН·м
Режим 1. Прокатка полосы $0,2 \times 855$ мм из подката $2,4 \times 855$ мм на 6-ти клетевом стане 1400 $[\sigma_T = 260 + 34,6 (100 \varepsilon)^{0,6}$ ; $t_{0n} = 40$ °C; $t_{0e1} = 40$ °C; $t_{0e2} = 44$ °C; $t_{0e3} = 48$ °C; $t_{0e4} = 52$ °C; $t_{0e5} = 56$ °C; $t_{0e6} = 65$ °C; $t_{охл} = 40$ °C; $R_{a1} = 5,0$ мкм; $R_{a2} = 3,0$ мкм; $R_{a3} = R_{a4} = 1,5$ мкм; $R_{a5} = 2,4$ мкм; $R_{a6} = 1,0$ мкм; $k_{cm} = 1,0$ ]														
1	2,40	0,140	22	160	3,18	0,086	$\frac{12,6}{12,7}$	63	$\frac{0,782}{0,845}$	$\frac{464}{501}$	$\frac{5,0}{5,4}$	4,9	$\frac{+2,0}{+10,2}$	$\frac{-28,4}{-24,9}$
2	2,06	0,404	160	140	5,33	0,072	$\frac{18,6}{18,6}$	112	$\frac{0,701}{0,691}$	$\frac{627}{618}$	$\frac{10,0}{9,8}$	10,7	$\frac{-6,5}{-8,4}$	$\frac{163,5}{163,6}$
3	1,23	0,398	140	175	8,86	0,049	$\frac{15,3}{15,3}$	155	$\frac{0,773}{0,775}$	$\frac{760}{762}$	$\frac{9,9}{10,0}$	10,4	$\frac{-4,8}{-3,9}$	$\frac{105,3}{105,3}$
4	0,74	0,392	175	190	14,57	0,048	$\frac{12,7}{12,7}$	195	$\frac{0,752}{0,753}$	$\frac{843}{844}$	$\frac{9,1}{9,2}$	9,0	$\frac{+1,1}{+2,2}$	$\frac{74,2}{74,2}$
5	0,45	0,310	190	200	21,11	0,057	$\frac{10,5}{10,5}$	221	$\frac{0,747}{0,748}$	$\frac{967}{968}$	$\frac{8,7}{8,7}$	9,2	$\frac{-5,4}{-5,4}$	$\frac{42,5}{42,5}$
6	0,31	0,357	200	34	32,84	0,044	$\frac{10,7}{10,4}$	244	$\frac{0,833}{0,790}$	$\frac{1177}{1106}$	$\frac{10,8}{9,8}$	10,9	$\frac{-0,9}{-10,1}$	$\frac{46,7}{44,6}$
Режим 2. Прокатка полосы $0,5 \times 1015$ мм из подката $2,5 \times 1015$ мм на 5-ти клетевом стане 1700 $[\sigma_T = 300 + 34,6 (100 \varepsilon)^{0,6}$ ; $t_{0n} = 40$ °C; $t_{0e1} = 64$ °C; $t_{0e2} = 62$ °C; $t_{0e3} = 60$ °C; $t_{0e4} = 54$ °C; $t_{0e5} = 51$ °C; $t_{охл} = 40$ °C; $R_{a1} = 4,0$ мкм; $R_{a2} = R_{a3} = R_{a4} = 1,2$ мкм; $R_{a5} = 2,8$ мкм; $k_{cm} = 1,3$ ]														

Продолжение таблицы 1

1	2,50	0,260	10	162	2,62	0,122	$\frac{17,1}{17,2}$	85	$\frac{0,851}{0,893}$	$\frac{667}{701}$	$\frac{11,6}{12,3}$	11,2	$\frac{+3,6}{+9,8}$	$\frac{49,8}{56,6}$
2	1,85	0,292	162	90	3,70	0,064	$\frac{16,0}{16,0}$	114	$\frac{0,766}{0,752}$	$\frac{685}{674}$	$\frac{11,1}{10,9}$	12,3	$\frac{-9,8}{-11,4}$	$\frac{162,7}{160,9}$
3	1,31	0,313	90	99	5,39	0,063	$\frac{15,0}{15,0}$	146	$\frac{0,866}{0,866}$	$\frac{892}{892}$	$\frac{13,6}{13,6}$	15,0	$\frac{-9,3}{-9,3}$	$\frac{122,4}{122,4}$
4	0,90	0,278	99	106	7,47	0,060	$\frac{12,9}{12,9}$	166	$\frac{0,865}{0,866}$	$\frac{970}{970}$	$\frac{12,7}{12,7}$	14,1	$\frac{-9,9}{-9,9}$	$\frac{83,4}{83,4}$
5	0,65	0,230	106	36,1	9,70	0,084	$\frac{12,4}{12,2}$	187	$\frac{0,905}{0,885}$	$\frac{1228}{1197}$	$\frac{15,4}{14,9}$	15,5	$\frac{-0,6}{-3,9}$	$\frac{76,4}{74,6}$

Таблица 2

Режимы обжатий и энергосиловые параметры при холодной прокатке полос на четырехклетевых непрерывных станах 1700 и 1680 металлургических комбинатов «Северсталь» и «Запорожсталь»

№ кл	$h_0$ , мм	$\varepsilon$	$\frac{q_0}{H}$ , $\frac{H}{мм^2}$	$\frac{q_1}{H}$ , $\frac{H}{мм^2}$	$V_1$ , м/с	$f$	$l_c$ , мм	$t_{n1}$ , °C	$\frac{\xi_{cp}}{\xi_{cpB}}$	$\frac{P_{cp}}{H}$ , $\frac{H}{мм^2}$	$\frac{P_c}{P_{cB}}$ , МН	$\rho_{эксн}$ , МН	$\frac{\Delta P}{\Delta P_B}$ , %	$M_c$ , кН·м
Режим 1. Прокатка полосы 0,6 × 1000 мм из подката 2,0 × 1000 мм из стали 08кп на четырехклетевом стане 1680 «Запорожсталь» [ $\sigma_m = 275 + 34,6(100\varepsilon)^{0,6}$ ; $t_{0n} = 40$ °C; $t_{0e1} = 75$ °C; $t_{0e2} = 65$ °C; $t_{0e3} = 60$ °C; $t_{0e4} = 55$ °C; $t_{охл} = 50$ °C; $R_{a1} = 3,5$ мкм; $R_{a2} = R_{a3} = 1,0$ мкм; $R_{a4} = 3,2$ мкм; $k_{cm} = 1,3$ ]														
1	2,00	0,350	20	172	3,69	$\frac{0,11}{2}$	$\frac{16,1}{16,2}$	95	$\frac{0,839}{0,871}$	$\frac{714}{742}$	$\frac{11,5}{12,0}$	11,0	$\frac{+4,5}{+9,1}$	$\frac{75,6}{96,7}$
2	1,30	0,292	172	200	5,22	$\frac{0,05}{6}$	$\frac{12,0}{12,0}$	12	$\frac{0,715}{0,716}$	$\frac{644}{645}$	$\frac{7,7}{7,8}$	7,4	$\frac{+4,1}{+5,4}$	$\frac{68,3}{78,4}$
3	0,92	0,260	200	224	7,05	$\frac{0,05}{4}$	$\frac{10,2}{10,3}$	14	$\frac{0,700}{0,703}$	$\frac{673}{676}$	$\frac{6,9}{6,9}$	6,7	$\frac{+3,0}{+3,0}$	$\frac{48,6}{57,6}$
4	0,68	0,118	224	40	7,99	$\frac{0,08}{0}$	$\frac{8,3}{8,1}$	15	$\frac{0,794}{0,743}$	$\frac{794}{743}$	$\frac{6,6}{6,0}$	6,8	$\frac{-2,9}{-11,8}$	$\frac{49,8}{48,6}$
Режим 2. Прокатка полосы 0,78 × 1265 мм из подката 2,5 × 1265 мм на четырехклетевом стане 1700 «Северсталь» [ $\sigma_T = 230 + 34,6(100\varepsilon)^{0,6}$ ; $t_{0n} = 40$ °C; $t_{0e1} = 70$ °C; $t_{0e2} = 65$ °C; $t_{0e3} = 60$ °C; $t_{0e4} = 55$ °C; $t_{охл} = 40$ °C; $R_{a1} = 3,0$ мкм; $R_{a2} = R_{a3} = 1,0$ мкм; $R_{a4} = 2,35$ мкм; $k_{cm} = 1,2$ ] [5]														
1	2,50	0,264	45	179	7,16	0,082	$\frac{14,9}{14,9}$	80	$\frac{0,742}{0,772}$	$\frac{464}{483}$	$\frac{8,73}{9,12}$	8,43	$\frac{+3,6}{+8,2}$	$\frac{25,9}{29,9}$
2	1,84	0,304	179	151	10,29	0,053	$\frac{14,0}{14,0}$	113	$\frac{0,672}{0,670}$	$\frac{525}{523}$	$\frac{9,30}{9,27}$	9,26	$\frac{+0,4}{+0,1}$	$\frac{130,2}{129,9}$
3	1,28	0,266	151	204	14,02	0,052	$\frac{11,6}{11,6}$	146	$\frac{0,729}{0,735}$	$\frac{623}{629}$	$\frac{9,16}{9,25}$	8,54	$\frac{+7,3}{+8,3}$	$\frac{69,5}{70,1}$
4	0,94	0,170	204	45	16,90	0,065	$\frac{9,3}{9,2}$	168	$\frac{0,775}{0,742}$	$\frac{700}{671}$	$\frac{8,21}{7,79}$	8,54	$\frac{-3,9}{-8,9}$	$\frac{84,1}{82,7}$

Данные табл. 1 и 2 свидетельствуют о том, что значения среднего коэффициента натяжения  $\xi_{cp}$ , рассчитанные по моделям (3) и (6), для всех исследованных режимов, в первой и последней клетях существенно различаются. Разница в значениях среднего коэффициента натяжения

достигает 8 %. Это связано с тем, что прокатка в первой и последней клетях ведется с большим градиентом удельных натяжений. Значения среднего коэффициента натяжения, рассчитанные по моделям (3) и (6), в остальных клетях непрерывных станов холодной прокатки, где прокатка ведется с примерно одинаковыми удельными натяжениями, являются практически одинаковыми.

Анализ данных о силе прокатки показывает, что использование модели (3) для расчета среднего коэффициента натяжения, дает завышенные значения силы прокатки в первой клетке и заниженные в последней клетке, по сравнению с моделью (6). Максимальная погрешность силы прокатки, рассчитанной по данным моделям, достигает 10 % и более.

В промежуточных клетях непрерывных станов, где передние и задние удельные натяжения приблизительно равны, применение моделей (3) и (6) для определения среднего коэффициента натяжения, дают очень близкие расчетные значения длины дуги контакта  $l_c$ , среднего давления  $p_{cp}$ , силы и момента прокатки.

Сравнение расчетных данных о силе прокатки с экспериментальными данными показывает, что в первой клетке погрешность расчета силы прокатки с использованием модели (3) достигает 9–10 %, в то время как погрешность расчета силы прокатки с использованием модели (6) не превышает 2–4,5 %. Для последней клетки погрешность расчета силы прокатки с использованием модели (3) достигает 10–12 %, а погрешность расчета силы прокатки с использованием модели (6) не превышает 4 %.

Из табл. 1 и 2 видно также, что с уменьшением конечной толщины прокатываемой полосы, погрешность расчета среднего коэффициента натяжения по модели (3) возрастает, что приводит к снижению точности определения силы и момента прокатки.

### ВЫВОДЫ

1. Предложена уточненная инженерная методика расчета энергосиловых параметров при холодной прокатке с примерно одинаковыми, с одним, либо с существенно отличающимися коэффициентами натяжения. Показано, что уточненная методика обеспечивает получение более надежных данных об энергосиловых параметрах процесса холодной прокатки при любом соотношении относительных значений заднего и переднего натяжений.

2. Установлено, что модель (3) может быть использована для расчета энергосиловых параметров только при холодной прокатке с примерно одинаковыми относительными натяжениями. Применение этой модели для прогнозирования параметров прокатки, когда процесс осуществляется с превалирующим задним или с превалирующим передним натяжением приводит, соответственно, к заниженным на 12 % и к завышенным на 10 % значениям силы прокатки. Погрешности расчета силы прокатки при использовании модели (6) не превышают 7 % при любом сочетании величин относительных удельных натяжений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Василев Я. Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки / Я. Д. Василев. – М. : Металлургия, 1995. – 368 с.
2. Василев Я. Д. Непрерывная прокатка тонких и особо тонких полос. Непрерывная прокатка : монография / Я. Д. Василев, А. В. Дементюченко. – Днепропетровск : Дніпро – ВАЛ, 2002. – С. 137–290.
3. Василев Я. Д. Инженерная модель средних нормальных контактных напряжений при холодной прокатке / Я. Д. Василев, Д. В. Коноводов, А. В. Дементюченко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – № 1. – С. 46–48.
4. Василев Я. Д. Определение среднего коэффициента натяжения при холодной прокатке / Я. Д. Василев, А. В. Дементюченко, Д. Н. Самокиш // *Обработка материалов давлением*. – 2010. – №1 (22).
5. Кузнецов Л. А. Применение УВМ для оптимизации тонколистовой прокатки / Л. А. Кузнецов. – М. : Металлургия, 1988. – 304 с.

Василев Я. Д. – д-р техн. наук, проф. НМетАУ;  
Дементюченко А. В. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ;  
Коноводов Д. В. – канд. техн. наук, сотрудник НМетАУ;  
Самокиш Д. Н. – студент НМетАУ;  
Завгородний М. И. – студент НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: danform@a-teleport.com