

РАЗДЕЛ III ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 621.771.001.23

Василев Я. Д.
Самокиш Д. Н.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ НАТЯЖЕНИЙ И ОБЖАТИЙ НА РАСХОД ЭНЕРГИИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ

Холодная прокатка является одним из наиболее энергоемких процессов пластической деформации. В зависимости от толщины и предела текучести деформируемого металла удельный расход энергии при холодной прокатке изменяется в диапазоне от 50–120 кВт·ч/т (прокатка углеродистых сталей) до 150–250 кВт·ч/т и более (прокатка жести, тонких и особо тонких полос) [1, 2]. Поэтому исследования, направленные на уменьшение удельного расхода энергии при холодной прокатке, актуальны.

Для уменьшения удельного расхода энергии при холодной прокатке обычно стремятся снизить уровень напряжений трения на контакте полосы с валками, что достигается применением более эффективной технологической смазки. Это проверенный, но не единственный путь решения данной проблемы.

Целью статьи является поиск альтернативных возможностей для уменьшения расхода энергии при холодной прокатке, в частности, за счет совершенствования и оптимизации режимов натяжений и обжатий.

Из теории и практики известно, что натяжение относится к числу важнейших параметров технологии холодной полосовой прокатки. В настоящее время установлено, что натяжение оказывает большое влияние, во многих случаях решающее влияние на силовые, кинематические и температурные параметры холодной полосовой прокатки, повышает устойчивость процесса и способствует улучшению плоскостности полосы [1, 3–6]. Логично предположить, что натяжение должно оказывать влияние и на расход энергии при холодной прокатке. Однако такие данные до последнего времени отсутствовали, хотя еще более 50 лет тому назад А. И. Целиковым было высказано мнение о том, что «при холодной прокатке металла в валках с большим отношением D/h_1 вследствие применения натяжения расход энергии немного уменьшится благодаря снижению местной упругой деформации валков и, следовательно, влияния контактных сил трения» [6, с. 229].

Впервые экспериментальные данные о влиянии натяжения на удельный расход энергии при холодной прокатке были опубликованы только в начале двадцать первого столетия [7]. Приведенные в этой работе материалы свидетельствуют о том, что в результате некоторого увеличения и перераспределения межклетевых удельных натяжений на стане бесконечной холодной прокатки 2030 ОАО «НЛМК» (Российская Федерация) достигнуто уменьшение удельного расхода энергии на 1,4–6,9 %.

Теоретические исследования процесса холодной прокатки с натяжением, выполненные нами в последние годы, показали, что с увеличением относительного удельного натяжения мощность, необходимая для осуществления данного процесса, по сравнению с прокаткой без натяжения уменьшается [8–10], причем это уменьшение тем больше, чем меньше толщина полосы [9, 10]. Например, при холодной прокатке тонких и особо тонких полос ($R/h_0 > 1000–1500$, где R , h_0 – радиус рабочих валков и толщина полосы на входе в очаг деформации) с удельными натяжениями, равными $(0,35–0,45)\sigma_T$ (где σ_T – предел текучести

материала полосы) мощность W_n , необходимая для осуществления процесса, в зависимости от условий деформации, составляет 30–55 % от мощности при прокатке без натяжения (рис. 1). При этом было установлено, что при прочих равных условиях мощность процесса холодной прокатки с одним задним, или с превалирующим задним относительным удельным натяжением всегда меньше мощности холодной прокатки с превалирующим передним относительным удельным натяжением.

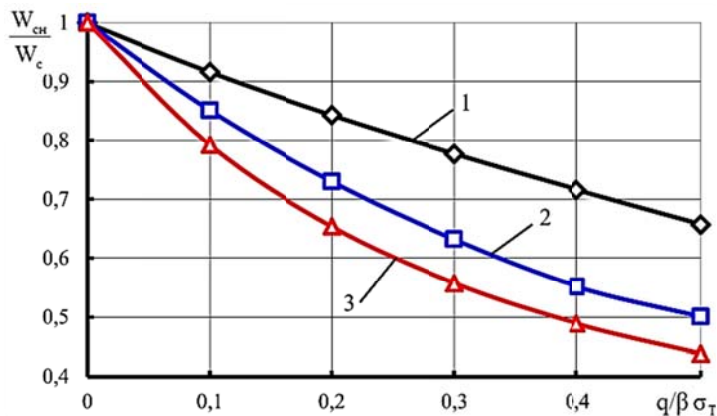


Рис. 1. Зависимость $W_{сн}/W_c = \varphi(q/\beta\sigma_T)$ при холодной прокатке предварительно наклепанной ($\varepsilon_{пр} = 0,75$) полосы толщиной 0,25 мм из стали 08кп ($R/h_0 = 1200$; $f = 0,05$; $\varepsilon = 0,25$):
1 – при $q_0/\beta\sigma_{T0} = 0$; $q_1/\beta\sigma_{T1} \neq 0$; 2 – при $q_0/\beta\sigma_{T0} \neq 0$; $q_1/\beta\sigma_{T1} = 0$; 3 – при $q_0/\beta\sigma_{T0} = q_1/\beta\sigma_{T1}$

Из изложенного следует, что натяжение является одним из основных параметров, влияющих на расход энергии при холодной прокатке, и может быть использовано успешно для повышения энергетической эффективности процесса. Обобщение результатов выполненных нами исследований позволило обосновать и разработать новый принцип определения уровня и характера распределения относительных удельных межклетевых натяжений q/σ_T (где q , σ_T – абсолютное удельное натяжение и предел текучести материала полосы в соответствующем межклетевом промежутке) в линии непрерывного стана холодной прокатки, обеспечивающий наибольшее уменьшение мощности (удельного расхода энергии) при реализации данного процесса. Этот принцип предусматривает увеличение уровня относительных удельных натяжений от первого межклетевого промежутка непрерывного стана к последнему и записывается математически в виде:

$$\frac{q_0}{\beta\sigma_{T0}} = k_q \left(\frac{1+f}{1+5\sqrt{\frac{h_0}{R}}} + \frac{1+\varepsilon\varepsilon_\Sigma}{1+\varepsilon} \right), \quad (1)$$

где R , h_0 , ε_Σ – радиус рабочих валков, толщина и суммарное относительное обжатие полосы на входе в очаг деформации данной клетки;

ε , f – частное относительное обжатие полосы и коэффициент трения при прокатке в данной клетки;

k_q – коэффициент, определяющий уровень удельных межклетевых натяжений с учетом особенностей прокатки для конкретного непрерывного стана ($k_q = 0,1-0,25$).

Анализ режимов натяжений, применяемых на действующих непрерывных станах холодной прокатки, показал, что они назначаются, исходя из опыта и интуиции технического персонала, поэтому какая-либо система или критерий определения уровня или характера распределения межклетевых натяжений отсутствует. Единственным технологическим ограничением при разработке режимов натяжений являются ограничения по обрывности полосы.

В связи с этим на непрерывных станах холодной прокатки применяют сравнительно низкие относительные удельные межклетевые натяжения ($q/\sigma_T = 0,1-0,3$), которые, как правило, убывают от первого межклетевого промежутка к последнему. По этой причине влияние натяжения на удельный расход энергии при холодной прокатке в промышленных условиях, по-видимому, невелико и ранее оно не было установлено, поскольку, как отмечалось выше, исследования в этом направлении практически не проводились.

Новый принцип определения уровня и характера распределения межклетевых относительных натяжений был использован для совершенствования и оптимизации режимов натяжений на пятиклетевых станах 1700 ОАО «АрселорМиттал Темиртау» (Казахстан) и 2030 ОАО «НЛМК» (Российская федерация) с целью уменьшения удельного расхода энергии при холодной прокатке. В качестве базовых использовали принятые на этих станах режимы обжатий и натяжений. Расчет энергосиловых и остальных технологических параметров производили по методике, разработанной на кафедре обработки металлов давлением НМетАУ (г. Днепропетровск) [3, 8, 11–13]. Методика учитывает совместное влияние упрочнения материала полосы, температурно-скоростных условий деформации, натяжения, коэффициента трения и упругих деформаций валков и полосы на параметры процесса, отличается широким диапазоном работоспособности и обеспечивает прогнозирование технологических параметров с удовлетворительной точностью. Результаты расчетов представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Прокатка полосы $0,5 \times 1015$ мм из подката $2,5 \times 1015$ мм на стане 1700 ОАО «АрселорМиттал Темиртау» (Казахстан) [сталь 08кп; $\sigma_T = 265 + 34,6 (100\varepsilon_\Sigma)^{0,6}$; $R_{\text{раб}} = 300$ мм; $t_{\text{оп}} = 40$ °C; $t_{\text{охл}} = 45$ °C; $t_{0в1} = 64$ °C; $t_{0в2} = 62$ °C; $t_{0в3} = 60$ °C; $t_{0в4} = 54$ °C; $t_{0в5} = 51$ °C; $R_{\text{ав1}} = 1,6$ мкм; $R_{\text{ав2}} = R_{\text{ав3}} = R_{\text{ав4}} = 0,6$ мкм; $R_{\text{ав5}} = 1,2$ мкм; $q_m/\beta\sigma_T = 0,050 = 38$ Н/мм²; $k_q = 0,175$]

Фактический режим (базовый) (числитель): $A = 166,73$ т/час; $\Sigma W_{\text{дв}} = 11260$ кВт; $a = 67,53$ кВт·ч/т.

Предлагаемый режим (знаменатель): $\Sigma W_{\text{дв}} = 10684$ кВт; $a = 64,08$ кВт·ч/т; $\Delta a = 5,12$ %.

№ кл.	h_0 , мм	ε	ε_Σ	q_0 , Н/мм ²	$q_0/\beta\sigma_{T0}$	f	$t_{\text{IIП}}$, °C	l_c , мм	$P_{\text{срс}}$, Н/мм ²	P_c , МН	V_b , м/с	S_c , %	M_c , кН·м	$W_{\text{дв}}$, кВт
1	2,50	0,310	0,310	$\frac{10}{10}$	$\frac{0,034}{0,034}$	0,117	$\frac{108}{108}$	$\frac{18,10}{18,12}$	$\frac{613}{618}$	$\frac{11,27}{11,38}$	$\frac{3,14}{3,14}$	$\frac{8,1}{7,9}$	$\frac{61,8}{66,76}$	$\frac{831}{887}$
2	1,73	0,328	0,536	$\frac{171}{163}$	$\frac{0,304}{0,290}$	0,068	$\frac{140}{140}$	$\frac{15,91}{15,80}$	$\frac{626}{612}$	$\frac{10,12}{9,81}$	$\frac{4,86}{4,82}$	$\frac{3,9}{4,8}$	$\frac{141,06}{119,65}$	$\frac{2558}{2182}$
3	1,16	0,295	0,673	$\frac{150}{199}$	$\frac{0,229}{0,304}$	0,063	$\frac{164}{159}$	$\frac{13,42}{13,04}$	$\frac{749}{667}$	$\frac{10,20}{8,83}$	$\frac{6,85}{6,85}$	$\frac{4,6}{4,5}$	$\frac{94,47}{85,60}$	$\frac{2527}{2277}$
4	0,82	0,254	0,756	$\frac{152}{222}$	$\frac{0,215}{0,314}$	0,061	$\frac{176}{167}$	$\frac{11,53}{10,95}$	$\frac{824}{701}$	$\frac{9,64}{7,79}$	$\frac{9,21}{9,21}$	$\frac{4,2}{4,2}$	$\frac{66,11}{56,86}$	$\frac{2488}{2116}$
5	0,61	0,180	0,800	$\frac{139}{239}$	$\frac{0,188}{0,324}$	0,080	$\frac{177}{169}$	$\frac{10,74}{10,21}$	$\frac{1043}{929}$	$\frac{11,37}{9,63}$	$\frac{11,37}{11,42}$	$\frac{2,9}{2,5}$	$\frac{58,16}{69,79}$	$\frac{2856}{3221}$

В таблицах приняты обозначения: h_0 – толщина полосы на входе в клеть; ε , ε_Σ – частное и суммарное относительное обжатие полосы; q_0 – заднее абсолютное натяжение; $t_{0в}$, $R_{\text{ав}}$ – среднемассовая температура и шероховатость поверхности бочек рабочих валков; $t_{\text{оп}}$, $t_{\text{охл}}$ – исходная температура подката и температура охладителя (эмульсии); $t_{\text{IIП}}$ – температура полосы на выходе из очага деформации; V_b – окружная скорость валков; S_c – опережение; l_c – длина упруго-пластического очага деформации; $p_{\text{срс}}$ – среднее контактное нормальное напряжение при прокатке; P_c – сила прокатки; M_c – момент на бочках валков; $W_{\text{дв}}$ – мощность на валу двигателя; A – часовая производительность стана; a – удельный расход энергии.

Из табл. 1 видно, что в результате увеличения и перераспределения относительных удельных натяжений при холодной прокатке полосы $0,5 \times 1015$ мм из подката $2,5 \times 1015$ мм на стане 1700 удельный расход электрической энергии уменьшился с $67,53$ кВт·ч/т до $64,08$ кВт·ч/т или на $5,12$ %. Это уменьшение существенно и подтверждает тот факт, что натяжение является одним из параметров, который может быть использован

для уменьшения удельного расхода электрической энергии при холодной прокатке. Здесь уместно отметить, что для реализации данного технического решения необходимо обеспечить хорошее и стабильное качество продольных кромок, а также высокую точность (прежде всего плоскостность) полосы. Однако эта задача в настоящее время практически решена, поскольку все современные станы холодной прокатки оснащены эффективными автоматизированными системами для регулирования технологических параметров и управления процессом в целом.

Таблица 2

Прокатка полосы $0,82 \times 1725$ мм из подката $3,0 \times 1725$ мм на стане 2030 ОАО «НЛМК» (Российская Федерация) [$\sigma_T = 220 + 34,6(100\varepsilon_\Sigma)^{0,6}$; $R_{\text{раб}} = 307,5$ мм; $t_{\text{оп}} = 40$ °С; $t_{\text{охл}} = 40$ °С; $t_{0в1} = 64$ °С; $t_{0в2} = 62$ °С; $t_{0в3} = 60$ °С; $t_{0в4} = 54$ °С; $t_{0в5} = 52$ °С; $R_{\text{ав1}} = 1,0$ мкм; $R_{\text{ав2}} = R_{\text{ав3}} = R_{\text{ав4}} = 0,5$ мкм; $R_{\text{ав5}} = 3,2$ мкм; $q_M/\beta\sigma_T = 0,032 = 22$ Н/мм²; $k_q = 0,175$]

Фактический режим (базовый) (числитель): $A = 384,87$ т/час; $\Sigma W_{\text{дв}} = 17673$ кВт; $a = 46,061$ кВт·ч/т.														
Предлагаемый режим (знаменатель): $\Sigma W_{\text{дв}} = 17023$ кВт; $a = 44,23$ кВт·ч/т; $\Delta a = 4,14$ %.														
№ кл	h_0 , мм	ε	ε_Σ	q_0 , Н/мм ²	$q_0/\beta\sigma_{T0}$	f	t_{III} , °С	l_c , мм	$P_{\text{срс}}$, Н/мм ²	P_c , МН	V_b , м/с	S_c , %	M_c , кН·м	$W_{\text{дв}}$, кВт
1	3,00	0,201	0,201	$\frac{26}{26}$	$\frac{0,1}{0,1}$	0,060	$\frac{63}{63}$	$\frac{16,32}{16,28}$	$\frac{449}{444}$	$\frac{12,64}{12,47}$	$\frac{3,17}{3,16}$	$\frac{4,55}{4,84}$	$\frac{23,26}{12,41}$	$\frac{421}{297}$
2	2,40	0,345	0,477	$\frac{125}{133}$	$\frac{0,262}{0,279}$	0,045	$\frac{105}{103}$	$\frac{18,89}{18,71}$	$\frac{558}{532}$	$\frac{18,18}{17,15}$	$\frac{4,98}{4,94}$	$\frac{1,53}{2,38}$	$\frac{293,41}{244,51}$	$\frac{5504}{4589}$
3	1,57	0,264	0,615	$\frac{116}{179}$	$\frac{0,192}{0,295}$	0,042	$\frac{135}{129}$	$\frac{14,59}{14,18}$	$\frac{648}{567}$	$\frac{16,31}{13,87}$	$\frac{6,72}{6,74}$	$\frac{2,27}{2,05}$	$\frac{166,76}{153,36}$	$\frac{4377}{4001}$
4	1,16	0,28	0,723	$\frac{122}{198}$	$\frac{0,188}{0,304}$	0,041	$\frac{162}{152}$	$\frac{13,35}{12,84}$	$\frac{696}{594}$	$\frac{16,02}{13,16}$	$\frac{9,28}{9,30}$	$\frac{2,96}{2,73}$	$\frac{143,07}{127,65}$	$\frac{5255}{4652}$
5	0,83	0,014	0,727	$\frac{123}{222}$	$\frac{0,181}{0,325}$	0,085	$\frac{151}{142}$	$\frac{7,16}{6,75}$	$\frac{633}{579}$	$\frac{7,81}{6,74}$	$\frac{9,71}{9,72}$	$\frac{-0,24}{-0,30}$	$\frac{53,62}{94,90}$	$\frac{2117}{3484}$

За счет увеличения уровня и оптимизации распределения удельных натяжений на стане 2030 (табл. 2) достигнуто более скромное уменьшение удельного расхода энергии (4,14 %), что объясняется большей толщиной прокатываемой полосы. Однако и этот показатель является хорошим, тем более что он получен только в результате оптимизации режима натяжений.

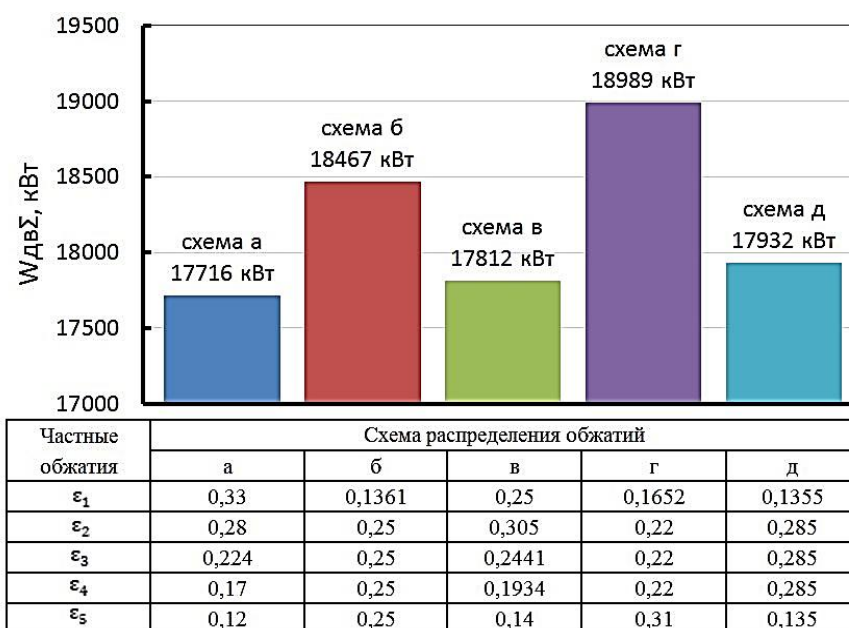


Рис. 2. Влияние схемы распределения обжатий по клетям стана 2030 на суммарную мощность двигателей (прокатка полосы $3,0 \rightarrow 0,82 \times 1725$, сталь 08Ю)

Анализ представленных в табл. 1, 2 режимов деформации показывает, что они отличаются определенной неравномерностью загрузки клетей станов 1700 и 2030 по силе и мощности. Причиной тому служат принятые на этих станах режимы обжатий. Исследования показали, что при использовании более подходящей схемы распределения частных относительных обжатий по клетям неравномерность загрузки механического и электрического оборудования этих станов может быть уменьшена при одновременном снижении потребляемой мощности (рис. 2).

Данные на рис. 2 свидетельствуют о том, что схема распределения обжатий по клетям непрерывного стана изменяет суммарную мощность приводных двигателей. Наименьшей энергоемкостью отличается схема «а», предусматривающая уменьшение частных относительных обжатий от первой клетки к последней. Такое распределение обжатий предполагает ведение процесса прокатки с максимальными деформациями в начальных клетях стана, когда материал полосы характеризуется наибольшей пластичностью и значение параметра R/h_0 невелико, что является энергетически выгодным.

В табл. 3, 4 представлены оптимизированные режимы натяжений и обжатий при прокатке полос $0,5 \times 1015$ мм и $0,82 \times 1725$ мм на станах 1700 и 2030. Из этих данных видно, что удельный расход электрической энергии на станах 1700 и 2030 изменился соответственно с 67,53 кВт·ч/т до 63,49 кВт·ч/т и с 46,061 кВт·ч/т до 43,94 кВт·ч/т.

Таблица 3

Прокатка полосы $0,5 \times 1015$ мм из подката $2,5 \times 1015$ мм на стане 1700 ОАО «АрселорМиттал Темиртау» (Казахстан) [сталь 08кп; $\sigma_T = 265 + 34,6 (100\varepsilon_\Sigma)^{0,6}$; $R_{\text{раб}} = 300$ мм; $t_{\text{он}} = 40$ °С; $t_{\text{охл}} = 45$ °С; $t_{0\text{в}1} = 64$ °С; $t_{0\text{в}2} = 62$ °С; $t_{0\text{в}3} = 60$ °С; $t_{0\text{в}4} = 54$ °С; $t_{0\text{в}5} = 51$ °С; $R_{\text{ав}1} = 1,6$ мкм; $R_{\text{ав}2} = R_{\text{ав}3} = R_{\text{ав}4} = 0,6$ мкм; $R_{\text{ав}5} = 1,2$ мкм; $q_M/\beta\sigma_T = 0,050 = 38$ Н/мм²; $k_q = 0,175$]

Фактический режим (базовый) (табл. 1. числитель): $A = 166,73$ т/час; $\Sigma W_{\text{дв}} = 11260$ кВт; $a = 67,53$ кВт·ч/т.														
Предлагаемый режим: $\Sigma W_{\text{дв}} = 10586$ кВт; $a = 63,49$ кВт·ч/т; $\Delta a = 6,0$ %.														
№ кл	h_0 , мм	ε	ε_Σ	q_0 , Н/мм ²	$q_0/\beta\sigma_{T0}$	f	t_{II} , °С	l_c , мм	$P_{\text{срс}}$, Н/мм ²	P_c , МН	V_b , м/с	S_c , %	M_c , кН·м	$W_{\text{дв}}$, кВт
1	2,50	0,318	0,318	10	0,034	0,118	109	18,29	619	11,49	3,17	8,39	65,93	887
2	1,71	0,31	0,529	174	0,291	0,067	137	15,30	591	9,18	4,76	4,39	109,62	1981
3	1,18	0,295	0,668	199	0,303	0,063	157	13,04	647	8,57	6,76	4,41	85,54	2235
4	0,83	0,267	0,757	222	0,313	0,060	166	11,12	688	7,76	9,23	4,32	61,01	2249
5	0,61	0,177	0,800	239	0,324	0,079	167	10,10	915	9,38	11,43	2,38	70,40	3234

Таблица 4

Прокатка полосы $0,82 \times 1725$ мм из подката $3,0 \times 1725$ мм на стане 2030 ОАО «НЛМК» (Российская Федерация) [сталь 08Ю; $\sigma_T = 220 + 34,6 (100\varepsilon_\Sigma)^{0,6}$; $R_{\text{раб}} = 307,5$ мм; $t_{\text{он}} = 40$ °С; $t_{\text{охл}} = 40$ °С; $t_{0\text{в}1} = 64$ °С; $t_{0\text{в}2} = 62$ °С; $t_{0\text{в}3} = 60$ °С; $t_{0\text{в}4} = 54$ °С; $t_{0\text{в}5} = 52$ °С; $R_{\text{ав}1} = 1,0$ мкм; $R_{\text{ав}2} = R_{\text{ав}3} = R_{\text{ав}4} = 0,5$ мкм; $R_{\text{ав}5} = 3,2$ мкм; $q_M/\beta\sigma_T = 0,032 = 22$ Н/мм²; $k_q = 0,175$]

Фактический режим (базовый) (табл. 2. числитель): $A = 384,87$ т/час; $\Sigma W_{\text{дв}} = 17673$ кВт; $a = 46,061$ кВт·ч/т.														
Предлагаемый режим: $\Sigma W_{\text{дв}} = 16912$ кВт; $A = 384,87$ т/ч; $a = 43,94$ кВт·ч/т; $\Delta a = 4,6$ %.														
№ кл	h_0 , мм	ε	ε_Σ	q_0 , Н/мм ²	$q_0/\beta\sigma_{T0}$	f	t_{II} , °С	l_c , мм	$P_{\text{срс}}$, Н/мм ²	P_c , МН	V_b , м/с	S_c , %	M_c , кН·м	$W_{\text{дв}}$, кВт
1	3,00	0,285	0,285	26	0,104	0,064	75	18,95	491	16,06	3,49	6,03	85,42	1278
2	2,15	0,275	0,482	149	0,285	0,043	105	16,29	530	14,90	5,01	1,92	184,59	3550
3	1,56	0,252	0,612	180	0,296	0,041	129	13,86	563	13,46	6,70	1,96	144,86	3765
4	1,16	0,231	0,702	198	0,304	0,040	145	11,98	578	11,95	8,68	2,24	103,77	3573
5	0,90	0,084	0,727	219	0,323	0,106	147	9,42	757	12,30	9,63	0,63	126,86	4746

ВЫВОДЫ

Установлено что натяжение оказывает существенное влияние на мощность при холодной прокатке и является одним из возможных каналов для повышения энергетической эффективности данного процесса. Для реализации этой возможности предложен новый принцип определения уровня и характера распределения относительных удельных натяжений в линии непрерывного стана, обеспечивающий наибольшее уменьшение потребляемой мощности (удельного расхода энергии) при холодной прокатке с натяжением. Новый принцип может быть использован при разработке режимов натяжений на действующих и проектируемых непрерывных станах холодной полосовой прокатки.

Разработаны оптимальные режимы натяжений и обжатий на пятиклетевых непрерывных станах холодной прокатки 1700 и 2030. Показано, что за счет увеличения и перераспределения относительных удельных межклетевых натяжений при холодной прокатке полос $0,5 \times 1015$ мм и $0,82 \times 1725$ мм удельный расход электрической энергии может быть уменьшен по сравнению с принятыми на этих станах режимами, соответственно на 6,0 % и 4,6 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василев Я. Д. Производство полосовой и листовой стали / Я. Д. Василев, М. М. Сафьян – Киев : Вища школа, 1976. – 192 с.
2. Василев Я. Д. Разработка энергосберегающих технологий при прокатке тонких и особо тонких полос / Я. Д. Василев // Наука, производство, предпринимательство – развитию металлургии. Н 34 : сб. науч. тр. конференции. – Донецк «ЛИК», 1988. – С. 260–234.
3. Василев Я. Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки / Я. Д. Василев. – М. : Металлургия, 1995. – 368 с.
4. Робертс В. Холодная прокатка стали : пер. с англ. / В. Робертс. – М. : Металлургия, 1982. – 544 с.
5. Кузнецов Л. А. Применение УВМ для оптимизации тонколистовой прокатки / Л. А. Кузнецов. – М. : Металлургия, 1988. – 304 с.
6. Целиков А. И. Основы теории прокатки / А. И. Целиков. – М. : Металлургия, 1965. – 247 с.
7. Исследование влияния режима межклетевого натяжения на стабильность процесса и удельный расход энергии на прокатку / В. Н. Скороходов, Ю. А. Мухин, П. П. Чернов и др. // Производство проката. – 2000. – № 6. – С. 9–12.
8. Василев Я. Д. Теория продольной прокатки: учебник для магистрантов вузов / Я. Д. Василев, А. А. Минаев. – Донецк : УНИТЕХ, 2010. – 456 с.
9. Василев Я. Д. Теоретическое исследование влияния натяжения на энергетическую эффективность процесса холодной полосовой прокатки / Я. Д. Василев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 6. – С. 3–5.
10. Василев Я. Д. Моделирование влияния натяжения на мощность процесса холодной полосовой прокатки / Я. Д. Василев, Д. Н. Самокиш // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 12. – С. 19–23.
11. Василев Я. Д. Инженерная методика расчета температуры полосы при холодной прокатке / Я. Д. Василев // Производство проката. – 2012. – № 6. – С. 15–19.
12. Василев Я. Д. Методика расчета коэффициента трения при холодной прокатке с эмульсией на основе эмпирических зависимостей / Я. Д. Василев // Производство проката. – 2012. – № 7. – С. 2–7.
13. Уточнение методики расчета энергосиловых параметров при холодной прокатке с большим градиентом удельных натяжений / Я. Д. Василев, Д. В. Коноводов, А. В. Деметтиенко и др. // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 2(23). – С. 190–194.

Василев Я. Д. – д-р техн. наук, проф. НМетАУ;

Самокиш Д. Н. – аспирант НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: samokyshdmitriy@gmail.com