

**Кухар В.В.,  
Кармазіна І.В.,  
Присяжний А.Г.**

Державний вищий навчальний заклад  
«Приазовський державний технічний університет»,  
м. Маріуполь, Україна  
**E-mail:** kvv.mariupol@gmail.com

**ВПЛИВ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ  
ПРОКАТНОЇ ЕМУЛЬСІЇ НА  
ЕНЕРГОВИТРАТИ БЕЗПЕРЕРВНИХ СТАНІВ  
ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ ЖЕРСТІ**

УДК 621.77.014

DOI: 10.31891/2079-1372-2018-90-4-92-99

Розглянуті основні фізико-хімічні показники прокатної емульсії, а також їх вагомий вплив на процес холодної прокатки жерсті. Обґрунтована доцільність визначення характеру впливу прокатної емульсії на витрати енергії при прокатці жерсті на безперервних станах: чотири-, п'яти і шестиклітьових. Досліджений вплив кінематичної в'язкості прокатної емульсії на питому витрату енергії безперервних станів холодної прокатки жерсті. Визначено, що використання прокатної емульсії зі збільшеною кінематичною в'язкістю дозволяє зменшити питому витрату енергії безперервних станів холодної прокатки жерсті.

**Ключові слова:** прокатна емульсія, фізико-хімічні показники, холодна прокатка, безперервний стан, витрата енергії, жерсть.

### Вступ

Холодна прокатка жерсті характеризується великими навантаженнями на обладнання та енерговитратами, що складають вагому частину собівартості продукції. З огляду на це, зниження енерговитрат при холодній прокатці особливо тонких смуг завжди залишається актуальною задачею. У цьому напрямку проведено багато як теоретичних, так і експериментальних досліджень, деякі з них представлені у роботах [1-3]. Вибір прокатної емульсії, як основного важеля зниження сил тертя в осередку деформації, є вирішальним кроком на шляху зменшення енерговитрат стану, а також покращення якості жерсті.

Сьогодні прокатну емульсію у вітчизняних цехах холодної прокатки обирають, переважно, за принципом її найменшої собівартості та витрати на тону прокату. Такий підхід обмежує можливості вирішення найбільш гострих проблем: зниження навантаження стану, стабільність процесу прокатки, витрата валків, підвищення корозійної стійкості прокату, якості поверхні. Пригар емульсолу, вкатаний бруд, сажа – найбільш поширені дефекти поверхні жерсті, виникнення яких пов'язане з прокатною емульсією. Вивчення впливу фізико-хімічних показників прокатної емульсії на енерговитрати безперервних станів холодної прокатки дозволить поглянути на вибір прокатної емульсії з точки зору її ефективності щодо зменшення навантажень і енерговитрат стану. До того ж, зменшення собівартості продукції за рахунок зниження енерговитрат дозволить компенсувати витрати на більш дорогі прокатні емульсії, але такі, що сприятимуть поліпшенню якісних показників жерсті. Так, заміна пальмової олії емульсією на жировій основі Laminol PT, у склад якої входять жири і емульгатор (число омилення 193,4, кислотне число 24,8), дозволила знизити витрати енергії на 2-3 % і підвищити швидкість прокатки жерсті на п'ятиклітьовому безперервному стані фірми Ніппон (м. Кейхін, Японія) [4].

Прокатна емульсія в цехах холодної прокатки листової сталі також використовується для промаслювання травлених смуг, що захищає їх поверхню від механічних пошкоджень та атмосферної корозії. При промаслюванні підкату для прокатки жерсті особливо важливі антикорозійні та антифрикційні властивості прокатної емульсії, а також здатність легко видалятися з поверхні жерсті у чистильно-миючих агрегатах, випарюватись при відпалі [4].

Основні фізико-хімічні показники прокатної емульсії: зовнішній вигляд при  $25 \pm 5$  °С; кінематична в'язкість при температурі 40 чи 50 °С (індекс в'язкості); кислотне число і вміст вільних жирних кислот; число омилення; іодне число; вміст сірки, фосфору, хлору; забрудненість смуги при відпалі; температура спалаху; температура застигання; стабільність при зберіганні; диспергуємість у воді [5].

Антифрикційна ефективність прокатної емульсії залежить від двох основних факторів: товщини розділяючого слою емульсії і хімічного складу. Товщина слою емульсії на контактній поверхні, у свою чергу, залежить від її фізичних властивостей, головним чином – в'язкості [4]. Тож, серед усіх фізико-хімічних показників прокатної емульсії кінематична в'язкість має особливу вагомість, а дослідження її впливу на енергосилові параметри при прокатуванні жерсті має доцільність і актуальність.

### Мета і постановка задачі

Метою даної роботи є теоретичне дослідження впливу кінематичної в'язкості прокатної емульсії на енерговитрати безперервних станів холодної прокатки жерсті.

### Виклад матеріалів досліджень

Для дослідження впливу фізико-хімічних показників прокатної емульсії на енерговитрати безперервних станів холодної прокатки жерсті були розроблені режими деформації для трьох типів станів: чотирикільтового стану холодної прокатки № 2 ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь»; п'ятикільтового стану холодної прокатки жерсті (м. Тіба, Японія) та шестикільтового стану 1400 АТ «АрселорМіттал Темиртау».

Чотирикільтовий стан холодної прокатки № 2 ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь» виготовляє смугу товщиною 0,2-0,5 мм, шириною 430-535 мм; у якості підкату використовують смугу товщиною 0,5-0,8 мм, шириною 900-1050 мм в одинарних рулонах масою 4,5-6 тон або подвійних рулонах масою 9-12 тон [6]. Діаметр робочих і опорних валків відповідно: 238-250 мм та 565-605 мм; довжина робочих і опорних валків 650 мм [6].

Режим деформації для моделювання прокатки смуги перерізом 0,2x535 мм в рулоні масою 12 тон із підкату перерізом 0,5x535 мм зі сталі марки 08кп на безперервному чотирикільтовому стані холодної прокатки № 2 ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь» розроблений у відповідності з рекомендаціями технологічної інструкції цеху [6] та наведений в табл. 1.

Таблиця 1

#### Режим деформації смуги перерізом 0,2x535 мм на чотирикільтовому стані

$\sigma_{\text{тпoch}}=230 \text{ Н/мм}^2$ ; $v_p=10 \text{ м/с}$ ; $G_p=12 \text{ тон}$ ; $q_1=135 \text{ Н/мм}^2$ ; $q_2=143 \text{ Н/мм}^2$ ; $q_3=171 \text{ Н/мм}^2$ ; $q_4=46 \text{ Н/мм}^2$				
Параметр	Номер кліті			
	1	2	3	4
h, мм	0,41	0,30	0,23	0,20
$\varepsilon$	0,190	0,260	0,230	0,135
$\sum\varepsilon$	0,19	0,40	0,54	0,60

П'ятикільтовий стан холодної прокатки жерсті (м. Тіба, Японія) [7] виготовляє смугу товщиною 0,1-1 мм, шириною 508-1295 мм з максимально можливою швидкістю прокатки 46,6 м/с; діаметр робочих валків – 495-610 мм; діаметр опорних валків – 1270-1427 мм.

Режим деформації для моделювання прокатки смуги перерізом 0,18x1295 мм в рулоні масою 30 тон із підкату перерізом 2,4x1295 мм зі сталі марки 08кп на безперервному п'ятикільтовому стані холодної прокатки жерсті (м. Тіба, Японія) наведений в табл. 2.

Таблиця 2

#### Режим деформації смуги перерізом 0,18x1295 мм на п'ятикільтовому стані

$\sigma_{\text{тпoch}}=230 \text{ Н/мм}^2$ ; $v_p=25 \text{ м/с}$ ; $G_p=30 \text{ тон}$ ; $q_1=135 \text{ Н/мм}^2$ ; $q_2=143 \text{ Н/мм}^2$ ; $q_3=171 \text{ Н/мм}^2$ ; $q_4=169 \text{ Н/мм}^2$ ; $q_5=46 \text{ Н/мм}^2$					
Параметр	Номер кліті				
	1	2	3	4	5
h, мм	1,87	1,01	0,55	0,31	0,18
$\varepsilon$	0,22	0,46	0,46	0,44	0,41
$\sum\varepsilon$	0,22	0,58	0,77	0,87	0,92

Шестикільтовий стан холодної прокатки 1400 АТ «АрселорМіттал Темиртау» виготовляє жерсть товщиною 0,18-0,36 мм, шириною 700-936 мм. Діаметр робочих валків – 570-600 мм; діаметр опорних валків – 1320-1400 мм; довжина робочих і опорних валків – 1400 мм [8].

Режим деформації для моделювання прокатки смуги перерізом 0,18x935 мм в рулоні масою 8 тон із підкату перерізом 2,4x935 мм зі сталі марки 08кп на безперервному шестикільтовому стані холодної прокатки жерсті 1400 АТ «АрселорМіттал Темиртау» наведений в табл. 3.

Таблиця 3

#### Режим деформації смуги перерізом 0,18x935 мм на шестикільтовому стані

$\sigma_{\text{тпoch}}=230 \text{ Н/мм}^2$ ; $v_p=25 \text{ м/с}$ ; $G_p=8 \text{ тон}$ ; $q_1=135 \text{ Н/мм}^2$ ; $q_2=143 \text{ Н/мм}^2$ ; $q_3=171 \text{ Н/мм}^2$ ; $q_4=171 \text{ Н/мм}^2$ ; $q_5=195 \text{ Н/мм}^2$ ; $q_6=46 \text{ Н/мм}^2$						
Параметр	Номер кліті					
	1	2	3	4	5	6
h, мм	1,76	1,05	0,63	0,38	0,25	0,18
$\varepsilon$	0,266	0,403	0,400	0,403	0,326	0,291
$\sum\varepsilon$	0,27	0,56	0,74	0,84	0,89	0,92

У табл. 1-3  $\sigma_{\text{тпоч}}$  – початкова межа плинності смуги, Н/мм<sup>2</sup>;  $v_p$  – робоча швидкість прокатки, м/с;  $G_p$  – маса рулону, тон;  $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$  – передне на тяжіння у першій, другій, третій, четвертій, п'ятій і шостій кліті відповідно, Н/мм<sup>2</sup>.

Для дослідження впливу фізико-хімічних показників прокатної емульсії на енерговитрати безперервних станів холодної прокатки жерсті взяті до уваги прокатні емульсії, які використовувались при холодній прокатці ПАТ «Запоріжсталь» в період 2015-2018 років. Фізико-хімічні показники прокатних емульсій, представлені у табл. 4, відповідають нормативній документації: технічним умовам і сертифікатам якості виробників. За рекомендаціями виробників концентрація емульсолів «Hydroway 830» (ПП «Славнефтехим»), «MOL Emroll SCR» (MOL-LUB Ltd) повинна бути на рівні 2-5 %, «СВК» марки А (ПП «НВФ СВК») – 2-4 %, інших – 2-3 %.

Таблиця 4

Фізико-хімічні показники прокатних емульсій

Вид прокатної емульсії	Фізико-хімічні показники					
	Густина при 20°C, кг/м <sup>3</sup>	В'язкість кінематична при 50С, м <sup>2</sup> /с	Кислотне число, мгКОН/г	Число омилення, мгКОН/г	Вміст води, %	Температура спалаху, °С.
«Hydroway 890» (ПП «Славнефтехим»)	900-1100	<150	<25	>100	<0,3	не норм.
	987	102,76	16,55	127,3	сліди	відсутнє
«Cold Roller SM» (ТОВ «НВП Агрінол»)	890-990	<100	<40	160-200	не норм.	не норм.
	990	72,54	24,87	178,81	0,45	218
«Quakerol ZAP 4.0» (Quaker Chemical B.V.)	929	56-66,5	9-13,5	155-175	не норм.	>150
	927	60,97*	11,7	163	0,09	170
«СВК» марки А (ПП «НВФ СВК»)	850-980	12-60	5-50	40-135	<1	не норм.
	931	55,9	36,6	70,4	0,8	142
«Hydroway 830» (ПП «Славнефтехим»)	850-950	<55	<25	>13,5	<0,3	не норм.
	921	36,87	20,53	40,07	сліди	відсутнє
«Rolkleen EP 2744 SCH» (Houghton International Inc.)	910	32*	не норм.	180	не норм.	не норм.
	908	31,15*	4,52	172,76	відсутнє	відсутнє
«MOL Emroll SCR» (MOL-LUB Ltd)	894	не норм.	не норм.	не норм.	не норм.	не норм.
	892	30,31	13,79	30,89	відсутнє	відсутнє
«Універсал-ІТС» (ТОВ «Метінвест-МРМЗ»)	920-960	<35	<12,5	>13,5	<0,5	не норм.
	926,5	30,02	11,8	25,18	0,49	152
«Cold Roller» (ТОВ «РУ НВП Агрінол»)	880-960	<30	16-25	65-90	<1	172
	889	28,24	18	44,4	0,15	відсутнє
«LUBRO DL ZPS» (Lubritalia S.p.A.)	850-950	не норм.	20-30	90	не норм.	не норм.
	885	16,29	5,8	92,46	відсутнє	відсутнє
«АВІКС-БІОМ» (ТОВ «ТД «АВІКС»)	850-950	<25	>18	>80	<3	не норм.
	882	16	19,35	83,02	0,1	172

\* В'язкість кінематична при 40°C, мм<sup>2</sup>/с

Розрахунок середніх значень нормальних контактних напружень виконаний за інженерним методом Васильова Я.Д. [9], який враховує пружну деформацію валків і смуги, температуру валків, смуги та слою прокатної емульсії, швидкість деформації тощо. Тобто, найбільш повно враховує фактори, що впливають на процес холодної прокатки жерсті, а також має достатню точність прогнозування [10].

Методика розрахунку середніх значень нормальних контактних напружень за інженерним методом Васильова Я.Д. містить наступні основні залежності [9]:

$$\sigma_{\text{срє}} = \sigma_{\text{тпоч}} + \frac{m}{6} \cdot 100^k \cdot \left[ \varepsilon_{\text{np}}^k + \sum \varepsilon^k + 4 \cdot (0,75 \cdot \varepsilon + \varepsilon_{\text{np}} - 0,75 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_{\text{np}})^k \right] \text{ Н / мм}^2; \quad (1)$$

$$t_{\text{срє}} = \frac{1}{3} \cdot (t_{0\text{см}} + 2 \cdot t_{1\text{см}}), \text{ } ^\circ \text{C}; \quad (2)$$

$$t_{\text{см}} = \frac{1}{4} \cdot (t_{0\text{см}} + t_{1\text{см}} + t_{0\theta} + t_{1\theta}), \text{ } ^\circ \text{C}; \quad (3)$$

$$v_t = v_{50} \cdot \left[ 1 - 1,3 \cdot \sqrt{\frac{t_{\text{см}} - 50}{t_{\text{сн}} - 50}} + 0,42 \cdot \left( \frac{t_{\text{см}} - 50}{t_{\text{сн}} - 50} \right) \right], \text{ м}^2 / \text{с}; \quad (4)$$

$$f = K_{cm} \cdot \frac{[1 + (0,4 + \epsilon) \cdot R_s]}{1 + 0,25 \cdot \sqrt{v_t} - 0,005 \cdot v_t} \cdot \left[ 0,07 - \frac{0,1 \cdot v_{1cm}^2}{2 \cdot (1 + v_{1cm}) + 3 \cdot v_{1cm}^2} \right]; \quad (5)$$

$$K_{t_{cp}} = a_0 + a_1 \cdot \left( \frac{t_{cmcp} - 20}{t_{n1}} \right) + a_2 \cdot \left( \frac{t_{cmcp} - 20}{t_{n1}} \right)^2 + a_3 \cdot \left( \frac{t_{cmcp} - 20}{t_{n1}} \right)^3; \quad (6)$$

$$K_{u_{cp}} = 1 + \frac{a_u}{1 + b_u \cdot \sqrt{\Sigma \epsilon}} \cdot \frac{20}{\sqrt{t_{cmcp}}} \cdot \left[ 1 - \frac{c_u \cdot (t_{cmcp} - 20)}{t_{n1}} \right]^2 \cdot \ln \frac{u_{cp}}{u_{cm}}; \quad (7)$$

$$\sigma_{mcp\epsilon u} = \sigma_{mcp\epsilon} \cdot K_{t_{cp}} \cdot K_{u_{cp}}, H / MM^2; \quad (8)$$

$$A = 6 \cdot \frac{1 - v_6^2}{\pi \cdot E_6} \cdot R_i \cdot \left[ 1 - 2 \cdot \frac{x_{1cm}}{l_c} \right] \cdot \left\{ 4 \cdot \frac{x_{1cm}}{l_c} \cdot \left[ 1 - \frac{x_{1cm}}{l_c} \right] + 1 \right\}; \quad (9)$$

$$B = 1 - 2 \cdot \frac{x_{1cm}}{l_c} - \frac{1,15 \cdot \sigma_{mcp\epsilon u}}{1 - v_{cm}^2} \cdot \frac{2 \cdot f \cdot A}{h_0 + h_1} \cdot \left( \frac{l_6}{l_c} \right)^2; \quad (10)$$

$$C = \frac{R \cdot \Delta h}{B}; \quad (11)$$

$$D = \frac{A}{B} \cdot \left\{ \frac{1,15}{2 \cdot (1 - v_n^2)} \cdot \left[ \sigma_{m0\epsilon} \cdot \xi_0 \cdot \frac{x_{0cm}}{l_c} + \sigma_{m1\epsilon} \cdot \xi_1 \cdot \frac{x_{1cm}}{l_c} \right] + \frac{1,15 \cdot \sigma_{mcp\epsilon u} \cdot \xi_{cp}}{1 - v_{cm}^2} \cdot \frac{l_6}{l_c} \right\}; \quad (12)$$

$$L'_c = D + \sqrt{C + D^2}, MM; \quad (13)$$

$$p_{cpc} = \frac{1,15}{2 \cdot (1 - v_{cm}^2)} \cdot \left[ \sigma_{m0\epsilon} \cdot \xi_0 \cdot \frac{x_{0cm}}{l_c} + \sigma_{m1\epsilon} \cdot \xi_1 \cdot \frac{x_{1cm}}{l_c} \right] + \frac{1,15 \cdot \sigma_{mcp\epsilon u}}{1 - v_{cm}^2} \cdot \left[ 1 + \frac{f \cdot L'_c \cdot l_6}{h_0 + h_1 \cdot l_c} \right] \cdot \frac{l_6}{l_c}, H / MM^2; \quad (14)$$

$$\frac{x_1}{l_c} = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{R \cdot \Delta h}{L_c^2} \right); \quad (15)$$

$$\frac{\gamma}{\alpha} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ 1 - \frac{(\Delta h + \Delta_{1cm}) \cdot \left[ 2 - 3 \cdot \frac{x_{1cm}}{l_c} \right]}{4 \cdot f \cdot L'_c \cdot \left[ 1 - \frac{x_{1cm}}{l_c} \right]^2} + \frac{q_1 \cdot h_1 - q_0 \cdot h_0}{4 \cdot f \cdot p_{cpc} \cdot L_c} - \frac{x_1}{l_c} \right\}; \quad (16)$$

$$S = \frac{\left[ \frac{\gamma}{\alpha} + \frac{x_1}{l_c} - \frac{x_{1cm}}{l_c} \right]^2}{\left[ 1 - \frac{x_{1cm}}{l_c} \right]^2} \cdot \frac{\Delta h + \Delta_{1cm} - \frac{\Delta_{1cm}}{h_1}}{h_1}; \quad (17)$$

$$n_\sigma = \frac{p_{cpc}}{1,15 \cdot \sigma_{mcp\epsilon u} \cdot \xi_{cp}}; \quad (18)$$

$$t_{16} = t_{06} + \frac{1}{1 + \delta_m} \cdot \left[ t_{0cm} - t_{06} + \frac{1}{\rho_{cm} \cdot c_{cm}} \cdot \eta_{вихсм} \cdot \sigma_{mcp\epsilon u} \cdot \xi_{cp} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} + \frac{\delta_m}{\lambda_6 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \eta_{вихсм} \cdot (p_{cpc} - \sigma_{mcp\epsilon u} \cdot \xi_{cp}) \cdot \sqrt{\frac{a_6}{\tau_6}} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \right] \cdot C; \quad (19)$$

$$\Delta t_{\text{дсм}} = a_g \cdot \left\{ \sigma_{\text{мнот}} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} + \frac{1}{6} \cdot \Delta h \cdot m \cdot 10^6 \cdot \left\{ \frac{1}{h_0} \cdot \left[ 1 - (1 - \Sigma \varepsilon) \cdot \frac{h_1}{h_0} \right]^k + \frac{8}{h_0 + h_1} \cdot \left[ 1 - (1 - \Sigma \varepsilon) \cdot \frac{h_0 + h_1}{2 \cdot h_0} \right]^k + \frac{1}{h_1} \cdot \left[ 1 - (1 - \Sigma \varepsilon) \cdot \frac{h_1}{h_0} \right]^k \right\} \right\}^{\circ} \text{C}; \quad (20)$$

$$\Delta t_{\text{прсм}} = \frac{1}{6} \cdot a_{\text{пр}} \cdot \left\{ \sqrt{\eta^3} \cdot \left\{ \sqrt{2} \cdot (p_0 + p_{\text{max}}) \cdot \left[ \frac{h_1}{h_1 + \Delta h \cdot (1 - 0,5 \cdot \eta)^2} - 1 \right] + p_{\text{max}} \cdot \left[ \frac{h_1}{h_1 + \Delta h \cdot (1 - \eta)^2} - 1 \right] \right\} + p_{\text{max}} \cdot \left[ 1 - \eta - \frac{x_{1\text{см}}}{l_c} \right] \cdot \left[ \frac{h_1}{h_1 + \Delta h \cdot (1 - \eta)^2} - 1 \right] \cdot \sqrt{\eta} + \right\} \\ \left\{ + \sqrt{2} \cdot \left\{ (p_{\text{max}} + p_1) \cdot \left[ 1 - \frac{x_{1\text{см}}}{l_c} \right] - 2 \cdot \eta \cdot p_1 \right\} \cdot \left[ \frac{h_1}{h_1 + \Delta h \cdot \left( \frac{x_{1\text{см}}}{l_c} \right)^2} - 1 \right] \cdot \sqrt{1 - \frac{x_1}{l_c}} \right\}^{\circ} \text{C}; \quad (21)$$

$$t'_{1\text{см}} = t_{0\text{в}} \cdot a_1 \cdot (t_{0\text{см}} + \Delta t_{\text{дсм}} + \Delta t_{\text{прсм}} - t_{0\text{в}})^{\circ} \text{C}; \quad (22)$$

$$\Delta = \frac{t'_{1\text{см}} - t_{1\text{см}}}{t_{1\text{см}}} \triangleq \Delta_1. \quad (23)$$

У разі отримання високої похибки обчислення температури  $\Delta$  приймаються нові значення температур смуги на вході і виході з осередку деформації у формулі і аналогічно повторюється розрахунок за формулами (2)-(23) до тих пір, поки похибки обчислення температур  $\Delta$  в кожному пропуску не приймуть допустимі значення. Далі так:

$$t'_{\text{смп}} = \frac{1}{3} \cdot (t'_{0\text{см}} + 2 \cdot t'_{1\text{см}})^{\circ} \text{C}; \quad (24)$$

$$P = p_{\text{прс}} \cdot L_c \cdot b \cdot \kappa H; \quad (25)$$

$$\Psi = \frac{1}{6} \cdot \left\{ \frac{p_0}{p_{\text{прс}}} \cdot \left[ 1 - \frac{\gamma}{\alpha} - \frac{x_1}{l_c} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{x_{1\text{см}}}{l_c} \right] + \frac{p_1}{p_{\text{прс}}} \cdot \left[ \frac{\gamma}{\alpha} + \frac{x_1}{l_c} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{x_{0\text{см}}}{l_c} \right] + 2 \cdot \left[ 1 + \frac{\gamma}{\alpha} + \frac{x_{1\text{см}}}{l_c} - 2 \cdot \frac{x_1}{l_c} - \frac{x_{0\text{см}}}{l_c} \right] \right\}; \quad (26)$$

$$M = 2 \cdot P \cdot \Psi \cdot L_c + R \cdot (q_0 \cdot h_0 \cdot b - q_1 \cdot h_1 \cdot b), \kappa H \cdot \text{м}; \quad (27)$$

$$N = \frac{M \cdot v_e}{R}, \kappa B \text{т}. \quad (28)$$

У залежностях (1)-(29)  $m, k$  – коефіцієнти, що характеризують інтенсивність зміцнення;  $\sigma_{t0\text{в}}, \sigma_{t1\text{в}}, \sigma_{\text{ГРДЕ}}$  – межа пластичності смуги до та після пропуску, а також середня межа пластичності смуги в осередку деформації відповідно,  $\text{Н/мм}^2$ ;  $\Delta h, \varepsilon, \varepsilon_{\text{пр}}, \Sigma \varepsilon$  – абсолютне, відносне, попереднє відносне і сумарне відносне обчислення за пропуск відповідно;  $t_{0\text{см}}, t_{1\text{см}}$  – температура смуги на вході і виході із осередку деформації,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{смп}}$  – середня температура смуги в осередку деформації,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{см}}$  – температура слою прокатної емульсії,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{0\text{в}}, t_{1\text{в}}$  – температура поверхні валків на вході і виході із осередку деформації відповідно,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $v_t, v_{50}$  – кінематична в'язкість прокатної емульсії при температурі прокатки та при  $50^{\circ}\text{C}$  відповідно,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $t_{\text{сп}}$  – температура спалаху прокатної емульсії,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $f$  – коефіцієнт тертя;  $K_{\text{см}}$  – емпіричний коефіцієнт;  $R_z$  – шороховатість поверхні робочих валків,  $\text{мкм}$ ;  $v_{0\text{см}}, v_{1\text{см}}$  – швидкість смуги на вході і виході з осередку деформації відповідно,  $\text{м/с}$ ;  $K_{\text{ср}}$  – коефіцієнт, що враховує вплив середньої температури смуги в осередку деформації;  $a_0, a_1, a_2, a_3$  – коефіцієнти поліному;  $t_{\text{пл}}$  – температура плавлення сталі,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $K_{\text{ср}}$  – коефіцієнт, що враховує вплив середньої швидкості деформації на опір деформації;  $a_u, b_u, c_u$  – емпіричні коефіцієнти;  $u_{\text{ср}}, u_{\text{ст}}$  – середня швидкість деформації та швидкість деформації при проведенні статичних випробувань відповідно,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\sigma_{\text{ГРДЕу}}$  – середнє значення опору деформації з урахуванням ступеню, швидкості і температури деформації,  $\text{Н/мм}^2$ ;  $A, B, C, D$  – результат першого, другого, третього і четвертого етапу безітераційного розрахунку довжини дуги контакту смуги з валком з урахуванням ступеню, швидкості і температури деформації відповідно;  $R$  – радіус робочих валків,  $\text{мм}$ ;  $\pi$  – число Пі;  $E_b$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу валків,  $\text{Н/мм}^2$ ;  $v_b, v_{\text{см}}$  – коефіцієнт Пуассона для матеріалу валків і смуги відповідно;  $x_{1\text{см}}/l_c, x_{0\text{см}}/l_c$  – відносна протяжність ділянки пружного контакту смуги з валком: розтягнення і стиснення

відповідно;  $l_b/l_c$  – відносна протяжність ділянки пластичного контакту смуги з валком;  $h_0, h_1$  – товщина смуги до і після прокатки, мм;  $\xi_0, \xi_1, \xi_{cp}$  – коефіцієнт, що характеризує вплив заднього, переднього та середнього питомого натягу відповідно;  $Lc'$  – довжина дуги контакту смуги з валком з урахуванням ступеню, швидкості і температури деформації, мм;  $p_{срc}$  – середнє контактне нормальне напруження, Н/мм<sup>2</sup>;  $x_1/l_c$  – приріст дуги контакту за лінією, що з'єднує центри обертання;  $\gamma/\alpha$  – положення нейтрального перетину;  $q_0, q_1$  – заднє і переднє натягіння відповідно, Н/мм<sup>2</sup>;  $\Delta_{lcm}$  – абсолютна пружна деформація стиснення смуги, мм;  $S$  – випередження при прокатці;  $n_\sigma$  – коефіцієнт напруженого стану;  $\delta_t$  – термофізичний критерій;  $\eta_{вих.см}$  – приведений коефіцієнт виходу тепла смуги;  $\rho_{см}$  – щільність матеріалу смуги, т/м<sup>3</sup>;  $c_{см}$  – теплоємність матеріалу смуги, Дж/кг·град;  $\lambda_b$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу валків, Вт/м·град;  $a_b$  – коефіцієнт тепловіддачі валків;  $\tau_b$  – час, с;  $\Delta t_{дсм}, \Delta t_{трсм}$  – розігрів смуги за рахунок перетворення енергії формозміни і енергії тертя в тепло відповідно, °С;  $a_g, a_{тр}, a_t$  – коефіцієнти, що враховують вплив на розігрів смуги перетворення енергії формозміни, енергії тертя, а також зміну температури смуги у часі відповідно;  $\eta$  – коефіцієнт, що характеризує положення максимуму епюри нормальних напружень до перетину вхідної смуги;  $p_0, p_1$  – нормальне напруження на границях пружно-пластичного контакту в зоні відставання і випередження відповідно, Н/мм<sup>2</sup>;  $p_{max}$  – максимальне нормальне контактне напруження, Н/мм<sup>2</sup>;  $h_\gamma$  – товщина смуги в нейтральному перетині, мм;  $t_{lcm}$  – розрахункова температура смуги на виході з осередку деформації, °С;  $\Delta$  – точність обчислення температури ітераційним способом;  $t_{смп}'$  – середня температура смуги в осередку деформації, °С;  $b$  – ширина смуги в осередку деформації, мм;  $P$  – сила прокатки, кН;  $\psi$  – коефіцієнт плеча;  $M$  – момент прокатки, кНм;  $v_b$  – окружна швидкість валків, м/с;  $N$  – потужність прокатки, кВт.

Питому витрату енергії на безперервних станах холодної прокатки жерсті визначали, як:

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{p_{срci} \cdot V \cdot \ln\left(\frac{h_{i-1}}{h_i}\right)}{A}, \text{кДж} \cdot \text{год} / \text{т}. \quad (30)$$

У залежності (30)  $W$  – питома витрата енергії з урахуванням роботи деформації (енерговитрати на пластичну деформацію), кДж/год/т;  $V$  – об'єм металу, мм<sup>3</sup>;  $A$  – годинна продуктивність стану за даним профілем смуги, т/год;  $n$  – загальна кількість клітей безперервного стану;  $i$  – номер пропуску;  $p_{срci}$  – середнє контактне нормальне напруження в  $i$ -тому пропуску, Н/мм<sup>2</sup>;  $h_{i-1}, h_i$  – товщина смуги до і після  $i$ -того пропуску, мм.

Результати теоретичного дослідження питомої витрати енергії безперервних станів холодної прокатки жерсті представлені у табл. 5.

Таблиця 5

**Витрати енергії безперервних станів холодної прокатки жерсті:  
IV – чотирикльтьового; V – п'ятикльтьового; VI – шестикльтьового**

Вид прокатної емульсії	Питома витрата енергії $W$ , кДж/год/т		
	IV	V	VI
«Hydroway 890» (ПП «Славнефтехим»)	75,03	294,79	280,33
«Cold Roller SM» (ТОВ «НВП Агрінол»)	75,44	294,50	279,25
«Quakerol ZAP 4.0» (Quaker Chemical B.V.)	76,32	301,11	285,01
«СВК» марки А (ПП «НВФ СВК»)	76,96	306,99	290,46
«Hydroway 830» (ПП «Славнефтехим»)	78,15	312,97	294,84
«Rolkleen EP 2744 SCH» (Houghton International Inc.)	78,42	312,94	294,34
«MOL Emroll SCR» (MOL-LUB Ltd)	78,78	316,48	297,57
«Універсал-1ТС» (ТОВ «Метінвест-МРМЗ»)	78,78	316,29	297,35
«Cold Roller» (ТОВ «РУ НВП Агрінол»)	78,71	314,42	295,46
«LUBRO DL ZPS» (Lubritalia S.p.A.)	80,78	327,16	305,69
«АВІКС-БИОМ» (ТОВ «ГД «АВІКС»)	80,53	323,99	302,92

За результатами теоретичного дослідження встановлено, що використання прокатної емульсії зі збільшеною кінематичною в'язкістю дозволяє зменшити питому витрату енергії безперервних станів холодної прокатки жерсті. До того ж, чим більші навантаження стану – тим більший відсоток економії енергії за рахунок використання прокатної емульсії зі збільшеною кінематичною в'язкістю. Характер впливу кінематичної в'язкості прокатної емульсії на питому витрату енергії безперервних станів холодної прокатки представлений на рис. 1-3.

Згідно табл. 5 підвищення кінематичної в'язкості прокатної емульсії на 10 м<sup>2</sup>/с дозволяє зменшити питому витрату енергії на чотирикльтьовому стані № 2 ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь» на 0,07 кДж/год/т

(0,82 %); на п'ятиклітьовому стані (м. Тіба, Японія) – на 5,81 кДж/год/т (1,77 %); на шестиклітьовому стані 1400 АТ «АрселорМіттал Темиртау» – на 4,70 кДж/год/т (1,54 %).

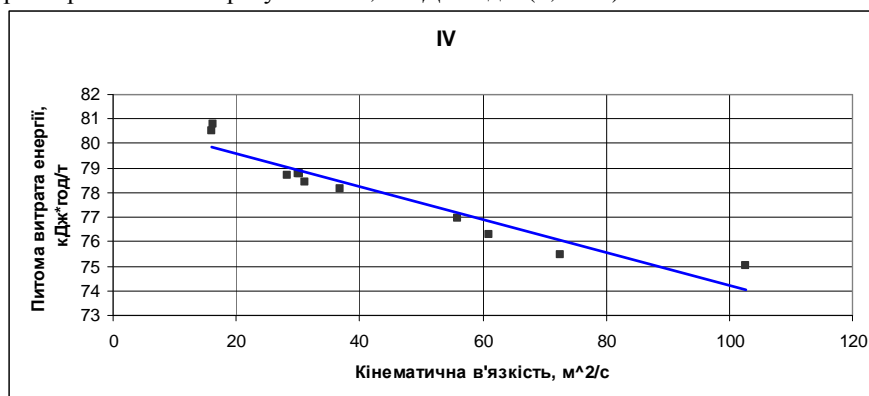


Рис. 1 – Вплив кінематичної в'язкості прокатної емульсії на питому витрату енергії чотиріклітьового безперервного стану холодної прокатки № 2 ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь»

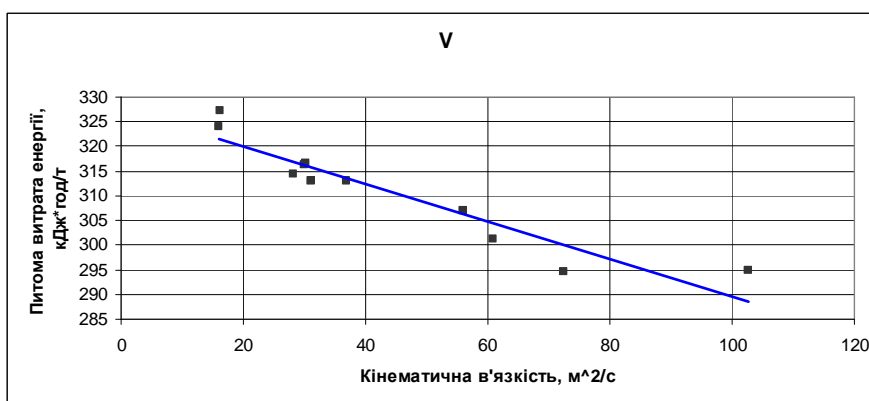


Рис. 2 – Вплив кінематичної в'язкості прокатної емульсії на питому витрату енергії п'ятиклітьового стану холодної прокатки жерсті (м. Тіба, Японія)

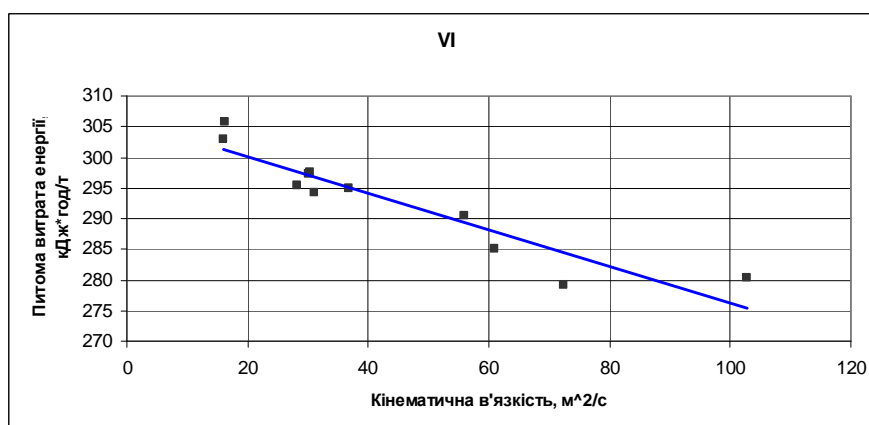


Рис. 3 – Вплив кінематичної в'язкості прокатної емульсії на питому витрату енергії безперервного шестиклітьового стану холодної прокатки 1400 АТ «АрселорМіттал Темиртау»

## Висновки

Холодна прокатка жерсті характеризується великими навантаженнями на обладнання та енерговитратами, що складають вагомую частину собівартості продукції. З огляду на це, зниження енерговитрат при холодній прокатці особливо тонких смуг залишається актуальною задачею.

Визначено, що використання прокатної емульсії зі збільшеною кінематичною в'язкістю дозволяє зменшити питому витрату енергії безперервних станів холодної прокатки жерсті, до того ж, чим більші

навантаження стану – тим більш значна економія енергії. Встановлено, що підвищення кінематичної в'язкості прокатної емульсії на 10 м<sup>2</sup>/с дозволяє зменшити питому витрату енергії на чотирикільтовому стані № 2 ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь» на 0,07 кВтгод/т (0,82 %); на п'ятикільтовому стані (м. Тіба, Японія) – на 5,81 кВтгод/т (1,77 %); на шестикільтовому стані 1400 АТ «АрселорМіттал Темиртау» – на 4,70 кВтгод/т (1,54 %).

### Література

1. Василёв Я.Д. Влияние толщины и относительного обжатия полосы на мощность процесса прокатки с натяжением / Я.Д. Василёв, Д.Н. Самокиш, Р.А. Замогильный, А.Г. Кожухарь, С.В. Кочаткова // Обработка материалов давлением. – 2012. – № 3 (32). – С. 142-146.
2. Гарбер Э.А. Пути уменьшения затрат электроэнергии при холодной прокатке на непрерывных станах / Э.А. Гарбер, Д.И. Никитин, И.А. Шадрюнова, В.Л. Явкин // Труды V конгресса прокатчиков. – М. – 2004. – С. 90-94.
3. Василёв Я.Д. Разработка энергосберегающих режимов натяжений на непрерывных станах холодной прокатки / Я.Д. Василёв, Д.Н. Самокиш // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 2. – С. 34-38.
4. Грудев А.П. Трение и смазка при обработке металлов давлением / Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. // Справочник. – М.: Металлургия, 1982. – 310 с.
5. Касьян О.С. Контроль качества смазочно-охлаждающих технологических средств для холодной прокатки листовой стали / О.С. Касьян, С.Д. Адамский // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. научн. тр. – Днепропетровск: ИЧМ НАН Украины, 2006. – Вып. 12. – С. 221-229.
6. Производство жести и ленты: технологическая инструкция ТИ 226-ЗП-01-2013 / С. В. Гоман, В. И. Набока, С. Е. Русаков. – Запорожье, 2013. – С. 60.
7. Tsujimoto M. Technological development of high speed (2800 mpm) cold rolling / T. Kaneko, Y. Yamada et al // CAMP-ISIJ. – 2002. – № 15. – С. 317-320.
8. Максименко О.П. Оценка продольной устойчивости процесса прокатки жести на стане 1400 КарМК / О.П. Максименко, Р.Я. Романюк // Обработка материалов давлением. – 2010. – № 4 (25). – С. 173-178.
9. Василёв Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчёта параметров холодной прокатки / Я.Д. Василев. – М.: Металлургия, 1995. – 368 с.
10. Коновалов Ю.В. Анализ инженерных методов расчета средних значений нормальных контактных напряжений при холодной прокатке полос и жести / Ю.В. Коновалов, И.В. Кармазина, А.Г. Присяжный // Пластическая деформация металлов: сб. научн. трудов в 2-х томах. – 2014. – Т. 2. – С. 32-36.

Поступила в редакцію 14.01.2019



**Kukhar V.V., Karmazina I.V., Prysiaznyi A.H. The influence of rolling emulsion physical and chemical parameters on the energy consumption of tinplate continuous cold rolling mills.**

Cold rolling of tinplate is characterized by significant strain on equipment and energy costs, which are a large part of production cost. Decreasing energy costs of tinplate cold rolling is an actual purpose. The choice of rolling emulsion, as the main lever to decrease of friction in the deformation zone, is a decisive move for decreasing energy costs and improving of tinplate quality. Today, in domestic cold rolling shops, the choice of rolling emulsion is based on its lowest cost and consumption per ton of rolled products. This fact limits the ability to solve the most pressing problems: the decreasing of rolling mill strain and roll abrasion; the improvement of rolling process stability, tinplate corrosion resistance and surface quality. Studying the influence of rolling emulsion physical and chemical parameters on the energy consumption of tinplate continuous cold rolling mills will allow choosing rolling emulsion that will decrease of rolling mill strain and energy costs.

The purpose of this article is a theoretical research of rolling emulsion kinematic viscosity influence on the energy costs of continuous cold rolling mill. In the course of the research, deformation modes were developed for three types of continuous cold rolling mill: four-, five-, and six-stand. The energy and force parameters of the rolling process were calculated using rolling emulsions with different kinematic viscosity in the range of 16-102.76 m<sup>2</sup>/s. Rolling emulsions, which were used in the period 2015-2018 at the PJSC Zaporizhstal cold rolling mill, were taken into account for the research the influence of rolling emulsion physical and chemical parameters on the energy consumption of tinplate continuous cold rolling mills.

It is defined that increasing the rolling emulsion kinematic viscosity decreases the energy consumption of tinplate continuous cold rolling mills. In addition, the increase in rolling mill strain increases energy savings. It is defined that increasing the rolling emulsion kinematic viscosity by 10 m<sup>2</sup>/s decreases energy consumption at the four-stand cold rolling mill № 2 (PJSC Zaporizhstal) by 0.07 kJ/h/t (0.82 %); at the five-stand cold rolling mill (Chiba, Japan) – by 5.81 kJ/h/t (1.77 %); at the six-stand cold rolling mill 1400 (ArcelorMittal Temirtau) – by 4.70 kJ/h/t (1.54 %).

**Keywords:** rolling emulsion, physical and chemical parameters, cold rolling, continuous rolling mill, energy consumption, tinplate.

**References**

- 1 Vasilyov Ya.D. Vliyanie tolshchiny i odnositel'nogo obzhatiya polosy na moshchnost' processa prokatki s natyazheniem / Ya.D. Vasilyov, D.N. Samokish, R.A. Zamogil'nyj, A.G. Kozhuhar', S.V. Kochatkova // Obrabotka materialov davleniem. – 2012. – No 3 (32). – pp. 142-146.
- 2 Garber E.A. Puti umen'sheniya zatrat elektroenergii pri holodnoj prokatke na nepreryvnyh stanah / E.A. Garber, D.I. Nikitin, I.A. Shadrinova, V.L. Yavkin // Trudy V kongressa prokatchikov. – M. – 2004. – pp. 90-94.
- 3 Vasilyov Ya.D. Razrabotka energosberegayushchih rezhimov natyazhenij na nepreryvnyh stanah holodnoj prokatki / Ya.D. Vasilyov, D.N. Samokish // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2013. – No 2. – pp. 34-38.
- 4 Grudev A.P. Trenie i smazka pri obrabotke metallov davleniem / Yu.V. Zil'berg, V.T. Tilik // Spravochnik. – M.: Metallurgiya, 1982. – 310 p.
- 5 Kas'yan O.S. Kontrol' kachestva smazочно-ohlazhdayushchih tekhnologicheskikh sredstv dlya holodnoj prokatki listovoj stali / O.S. Kas'yan, S.D. Adamskij // Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii: sb. nauchn. tr. – Dnepropetrovsk: IChM NAN Ukrainy, 2006. – Vyp. 12. – pp. 221-229.
- 6 Proizvodstvo zhesti i lenty: tekhnologicheskaya instrukciya TI 226 ZP 01 2013 / S.V. Goman, V.I. Naboka, S.E. Rusakov. – Zaporozhe, 2013. – p. 60.
- 7 Tsujimoto M. Technological development of high speed (2800 mpm) cold rolling / T. Kaneko, Y. Yamada et al // CAMP-ISIJ. – 2002. – No 15. – pp. 317-320.
- 8 Maksimenko O.P. Ocenka prodol'noj ustojchivosti processa prokatki zhesti na stane 1400 KarMK / O.P. Maksimenko, R.Ya. Romanyuk // Obrabotka materialov davleniem. – 2010. – No 4 (25). – pp. 173-178.
- 9 Vasilyov Ya.D. Inzhenernye modeli i algoritmy raschyota parametrov holodnoj prokatki / Ya.D. Vasilev. – M.: Metallurgiya, 1995. – 368 p.
- 10 Konovalov Yu.V. Analiz inzhenernyh metodov rascheta srednih znachenij normal'nyh kontak-tnyh napryazhenij pri holodnoj prokatke polos i zhesti / Yu.V. Konovalov, I.V. Karmazina, A.G. Prisia-zhnyj // Plasticheskaya deformaciya metallov: sb. nauchn. trudov v 2-h tomah. – 2014. – T. 2. – pp. 32-36.