

УДК 621.771

ПРИЩІП Микола Гнатович, професор, кандидат технічних наук

ВАСИЛЬЄВ Олександр Геннадієвич, старший викладач

БОНДАРЕНКО Юлія Володимирівна, доцент, кандидат технічних наук

ВАСИЛЬЄВ Станіслав Олександрович, аспірант

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ВИБІР ТЕХНОЛОГІЧНОГО МАСТИЛА ДЛЯ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

Запорізька державна інженерна академія

Результати досліджень ефективності та вибирання технологічного мастила для холодної прокатки низьколегованих сталей показали, що модель розрахунку коефіцієнта тертя з використанням теоретичних формул на основі виконаних експериментів щодо визначення випередження металу дає точні результати, які співпадають з даними інших робіт. Обрано ефективне технологічне мастило для холодної прокатки марганцевистих, маргенцево-кремнієвих та хромомарганцево-кремнієвих сталей на реверсивних станах холодної прокатки.

Ключові слова: низьколегована сталь, прокатний стан, холодна прокатка, технологічне мастило, коефіцієнт тертя

Вступ. Контактне тертя під час прокатування відіграє виключно важливу та до того ж подвійну роль. На початковій стадії процесу сили контактного тертя поміж штабою і технологічним інструментом виконують захват металу валками, а по мірі заповнення осередку деформації – передавання енергії від робочих валків до металу, чим забезпечується пластична деформація штаби. Очевидно надійний захват металу валками потребує наявності достатньо великого значення сил тертя T . На усталеній стадії прокатування сили тертя T є надлишковими та потребують додаткових витрат енергії на їх подолання. Так, за даними академіка О.П. Чекмарьова, професорів В.О. Ніколаєва й О.П. Грудєва, а також інших науковців коефіцієнт тертя, а значить і сили тертя T під час холодної прокатки на усталеній стадії, вдвічі, а то і в тричі разів менші порівняно зі стадією початкового захвату металу валками.

Тертя під час холодної прокатки відрізняється двома особливостями:

– тертя ковзання поміж валками та поверхнями штаби, що деформують, характеризується високим значенням середнього нормального контактного напруження;

– холодно прокатку для зменшення значень сили тертя та нормальних контактних напружень ($p_{сер} = 500-1500 \text{ Н/мм}^2$) виконують із застосуванням технологічного мастила, завдяки чому для даного процесу характерним є напіввідинне тертя.

Товщина шару мастила в осередку деформації складає у межах 0,1-0,7 мкм [1]. В техно-

логічному аспекті мастило, що надходить в осередок деформації, має зменшувати силу прокатки, витрати енергії на деформацію та забезпечувати прокатування штаб необхідної якості за станом поверхні, формою і точністю розмірів, нівелювати абразивне зношування поверхні бочок валків та не спричинювати корозію обладнання та поверхні листової продукції.

З точки зору економічної доцільності мастило має бути дешевим і недефіцитним, але водночас ефективним, тобто здатним до мінімуму зменшувати значення сили тертя та в той же час забезпечувати сталість процесу, тобто забезпечити прокатку без буксування штаби у валках.

Варіювати витрати технологічного мастила неможливо тому, що його використовують водночас як охолоджувача валків. За практичними даними витрати технологічного мастила складають від 1,3 до 3,6 кг на тонну холоднокатаної листової (штабової) сталі [2].

Постановка завдання. Знайти просту, надійну та достатньо точну модель визначення коефіцієнта тертя під час холодної прокатки та критерії порівняння їх значень без застосування громіздких формул і розрахунків.

В роботах [2,3] наводиться спосіб оцінювання властивостей мастила за величиною витяжки ідентичних штаб (зразків), які прокатують з різними мастилами за постійного зазору поміж валками. Метод є простим, не потребує застосування спеціальної тензометричної та вимірювальної апаратури. В подальшому такий метод удосконалили, використовуючи великі обтиснення, для прокатки зразків мінімально можливої товщини.

Кількісне визначення величини коефіцієнтів тертя виконують розрахунком на випередження металу.

Головна частина досліджень. До основи запропонованих і виконаних досліджень, а саме кількісного визначення коефіцієнта тертя, було покладено загальноприйнятій у теорії процесу прокатки закон сухого тертя Амонтона [6], згідно якому сила тертя T є пропорційною до нормальної сили N , тобто

$$T = f \cdot N, \quad (1)$$

де f – коефіцієнт пропорційності, що вважають коефіцієнтом тертя, а саме його середнє значення для всього осередку деформації.

Експериментальну частину досліджень виконували на напівпромисловому двовалковому стані з діаметром валків 200 мм, що виготовлено із сталі 9Х, бочки валків є шліфованими та дещо спрацьованими, шорсткість поверхні бочок $Ra = 1,8-2,2$ мкм. Попередньо за радіусом бочки на верхньому валкові було нанесено кернові позначки, відстань між якими $L = 99$ мм. Таким чином, коефіцієнт тертя визначали щодо випередження металу в процесі прокатки зразків з алюмінію після відпалу. Для виконання дослідів приготували зразки товщиною $H_0 = 8,07$ мм, шириною $B_0 = 23,6$ мм і довжиною $L_0 = 250$ мм.

Таблиця 1 – Геометричні параметри деформації під час прокатування зразків з різними мастилами

Серія дослідів	Мастило	H , мм	h , мм	b_1 , мм	Δb , мм	$b_{сер.}$, мм	Δh , мм	ε , %	μ
1	без мастила	1,07	0,860	23,70	0,10	23,65	0,210	19,63	1,24
	вода	1,07	0,857	23,70	0,10	23,65	0,213	19,91	1,25
	емульсія	1,07	0,837	23,70	0,10	23,65	0,233	21,77	1,28
	індустріальне 20	1,07	0,832	23,70	0,10	23,65	0,238	22,24	1,29
2	без мастила	1,07	0,710	24,00	0,40	23,80	0,360	33,65	1,51
	вода	1,07	0,680	24,10	0,50	23,85	0,390	36,45	1,57
	емульсія	1,07	0,615	24,20	0,60	23,95	0,455	42,52	1,74
	індустріальне 20	1,07	0,610	24,30	0,70	24,00	0,460	42,99	1,75

За загальноприйнятими у теорії процесу прокатки співвідношеннями визначали:

– середню ширину зразків в осередку деформації $b_{сер}$

$$b_{сер} = 0,5(b_0 + b_1); \quad (2)$$

– абсолютний обтиск Δh

$$\Delta h = H_0 - h; \quad (3)$$

– відносний обтиск ε

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H_0}; \quad (4)$$

– коефіцієнт видовження μ

$$\mu = \frac{L}{L_0}. \quad (5)$$

Швидкість прокатки на стані 200, за обертів електродвигуна $n = 16$ хв⁻¹ та передавального числа редуктора $i = 45,6$, складала 0,17 м/с. Тим самим повністю невілювали вплив швидкості на коефіцієнт тертя.

Адекватність моделі перевіряли, вимірюючи силу прокатки P . Для цього використовували тензометричні месдозы, які піддають попередньому таруванню разом з вимірювальною апаратурою на пресі УГ20/2. У процесі вимірювань сигнал від месдоз надходить до підсилювача та фіксується реєструючим приладом. Записані осцилограми розшифровували за допомогою тарувальних графіків.

Для дослідження приготували дві партії зразків: першу партію прокатували з обтиском 19-22 %, а другу – з обтиском 34-43 %. Зразки кожної партії прокатували з використанням сухих валків, води, емульсії мінерального мастила індустріального І-20 концентрацією 5 %, а також мастила І-20. Після прокатки кожного зразка валки знежирювали та витирали від забруднення. Товщину зразків вимірювали мікрометром з точністю 0,001 мкм, ширину і довжину поміж керновими відбитками – штангельциркулем з точністю до 0,01 мм. Результати вимірювань наведено у табл. 1.

– довжину дуги контакту металу з валками в осередку деформації ℓ_d

$$\ell_d = (\Delta h \cdot R)^{0,5}, \quad (6)$$

де b_0, b_1 – ширина зразків до та після прокатки відповідно; H_0, h – товщина зразків до та після прокатки відповідно; L_0, L – довжина зразків до та після прокатки відповідно; R – радіус бочки валків, $R = 100$ мм.

Результати розрахунків за формулами (1)-(6) наведено у табл. 1.

Із теорії прокатки відомо, що розширення металу Δb дорівнює:

$$\Delta b = b_1 - b_0. \quad (7)$$

Результати розрахунків (табл. 1) показали, що розширення металу Δb для першої серії до-

слідів дорівнює 0,10 мм, для другої серії знаходиться у межах 0,40-0,80 мм. Величини розрахованих співвідношень $b_{\text{сер}}/l_d$, що є близькими до 5,0, дозволяють зробити висновок, що умови деформації під час прокатування є близькими до рівномірних, тобто виконується гіпотеза плоских перерізів І.М. Павлова [6].

Таким чином, деформація є плоскою, для якої діють формули:

– кут контакту штаби з валками α

$$\alpha = \left(\frac{\Delta h}{R} \right)^{0,5}; \quad (8)$$

– кут критичного (нейтрального) перерізу γ

$$\gamma = \left(\frac{S \cdot h_1}{R} \right)^{0,5}, \quad (9)$$

де S – випередження, що визначається керновим методом за даними експериментів;

де $S = \frac{L_n - L_e}{L_e}$, L_n – відстань між керновими відмітками на верхньому валкові, яка дорівнює 99,0 мм; L_e – відстань між мітками на верхній поверхні зразків (див. табл. 2).

За формулою Екелунда-Павлова визначали коефіцієнт тертя f :

$$f = \frac{0,5\alpha}{(1-2\gamma/\alpha)}. \quad (10)$$

Показник тертя f_n розраховували з використанням співвідношення:

$$f_n = \frac{0,5L_n \cdot (1 + \Delta h/H_0)}{\sqrt{R/H_0 \cdot (\arctg \sqrt{\Delta h/H_0} - (2\gamma/\alpha)) \cdot \sqrt{\Delta h/H_0}}}. \quad (11)$$

Результати розрахунків за формулами (6)-(9) подано у табл. 2.

Таблиця 2 – Результати експериментів та теоретичних досліджень

Серія дослідів	Масило	$h_{\text{сер}}$, мм	l_d , мм	$l_d/h_{\text{сер}}$	L_n , мм	S	α , рад	γ , рад
1	без мастила	0,965	4,583	4,749	102,50	0,0353	0,0458	0,0174
	вода	0,964	4,615	4,790	102,00	0,0300	0,0461	0,0161
	емульсія	0,954	4,827	5,062	101,68	0,0270	0,0483	0,0150
	індустріальне 20	0,951	4,878	5,129	101,58	0,0260	0,0488	0,0147
2	без мастила	0,890	6,000	6,742	105,50	0,0660	0,0600	0,0216
	вода	0,875	6,245	7,137	104,50	0,0550	0,0625	0,0194
	емульсія	0,843	6,745	8,006	102,25	0,0330	0,0675	0,0142
	індустріальне 20	0,840	6,782	8,074	102,10	0,0310	0,0678	0,0132

В табл. 3 наведено результати визначення параметрів тертя f і f_n за формулами (10)-(11), а також для порівняння коефіцієнти тертя, що одержано іншими авторами.

Таблиця 3 – Коефіцієнт тертя f і показник тертя f_n під час прокатки зразків відпаленого алюмінію

Масило	$\varepsilon = (19-20) \%$		$\varepsilon = (34-43) \%$		$\varepsilon = (22-23)^x$	$\varepsilon = 38^x$
	f	f_n	f	f_n	f	f
без мастила	0,965	4,583	4,749	102,5	0,0353	0,0458
вода	0,964	4,615	4,790	102,0	0,0300	0,0461
емульсія	0,954	4,827	5,062	101,68	0,0270	0,0483
індустріальне 20	0,951	4,878	5,129	101,58	0,0260	0,0488

Примітка: x - дані Ф. Уайттона та Г. Форда [4]

Із табл. 3 випливає, що одержані коефіцієнти тертя співпадають з даними як на сухих валках, так із мінеральним мастилом.

Графічна інтерпретація величин коефіцієнта тертя наведена на рис. 1, із якого видно кількіс-

но-порівняльну характеристику змінювання коефіцієнта тертя залежно від мастила та відносного обтиску.

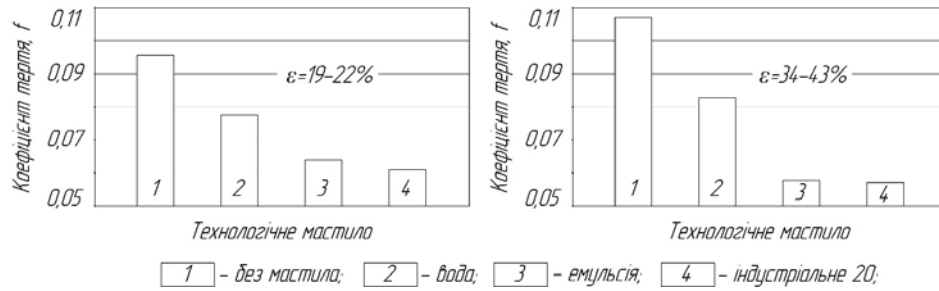


Рисунок 1 – Експериментальні величини коефіцієнта тертя за різних обтисків

Так, зі збільшенням відносного обтиску від 19-22 до 34-43 % під час використання мастила І-20 зменшення коефіцієнта тертя складає 18 % (від 0,0605 до 0,057).

Результати розрахунків за експериментальними даними показують, що мінімальні коефіцієнти тертя одержано в умовах прокатки з використанням мінерального мастила І-20.

Мастило І-20 використовують у ЦХП-1 ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» на реверсивних станах 1680 і 1200 під час прокатки марганцевих (09Г2А, 09Г2Д, 14Г2, 65Г, 10Г2), марганцево-кремнієвих (12ГС, 17ГС, 08ГС10Ф, 60С2А), хромо-марганцево-кремнієвих типу 25ХГСА і 30ХГСА сталей та інших легированих сталей, які мають високу пружність та інтенсивність до зміцнювання (наклепування) під час холодної деформації. Для цього було спроектовано та змонтовано за умов даного виробництва систему, яка на стані 1680 знаходиться безпосередньо біля прокатної кліти, а на стані 1200 – у технологічному мастилопідвалі. Система (рис. 2) складається із бака ємністю 3,0 м³,

трубопроводів, вентилів, клапанів, фільтра та підсилювача з електродвигуном.

Як мастило обрали мінеральне мастило І-20, яке порівняно з маслом П-28 (брайтсток) і Ц24 (віскозин) має достатню рідинність навіть у зимовий період і не потребує підігрівання. Окрім того, мастило І-20 має найнижчу коксуємість, а саме 0,15 % (Ц24 – 2,5 %, П28 – 1,0 %) [7], що під час наступної термообробки майже не призводить до утворення сажі на поверхні прокату. Як охолоджувач валків використовують воду, що подають на валки зі сторони виходу штаби із валків, а мастило – зі сторони входу металу до осередку деформації. Мастило наносять на поверхню штаб і валків форсунками, де його розпилюють стислим повітрям. Електромагнітні клапани 3 подають мастило із системи зліва або з правої сторони залежно від напрямку прокатки. За необхідності, в останньому проході зі сторони виходу, поверхню штаби у ванні знежирюють, миють і висушують стислим повітрям, яке видаляє залишки миючого розчину та мастила.

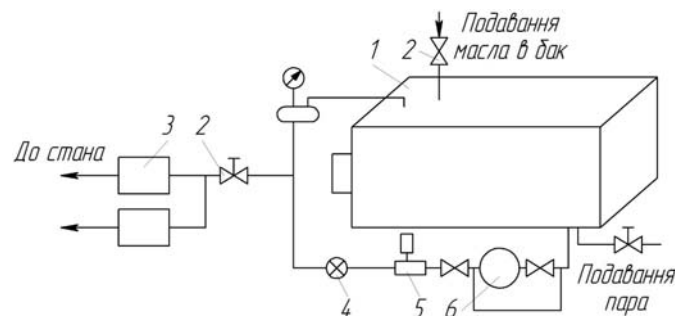


Рисунок 2 – Система подавання мінерального мастила на реверсивному стані 1680:
1 - бак, 2 - затулка, 3 - електромагнітні клапани, 4 - вентиль, 5 - pompa, 6 - фільтр

Висновки. Розрахунки коефіцієнта тертя на основі експериментів щодо визначення випередження металу підтвердили універсальність цієї моделі. Серед досліджених мастил найкращі властивості має мінеральне мастило індустріальне І-20. Його застосовують під час прокатки марганцевих, марганцево-кремнієвих і подібних сталей, які мають високу інтенсивність зміцнен-

ня, на реверсивних станах холодної прокатки. Необхідно продовжити дослідження ефективності технологічних мастил з метою використання запропонованих моделей для визначення енергосилових параметрів процесу холодної прокатки нових марок низьколегованих і мікролегованих сталей.

Бібліографічний список

1. **Николаев, В. А.** Теория процессов прокатки [Текст] / В. А. Николаев; учеб. пособие. – Запорожье : РИО ЗГИА, 2001. – 188 с.
2. **Робертс, В.** Холодная прокатка стали [Текст] / В. Робертс ; перевод с англ. – М. : Металлургия, 1982. – 544 с.
3. **Грудев, А. П.** Технологические смазки в прокатном производстве [Текст] / А. П. Грудев, В.Т. Тилик. – М. : Металлургия, 1975. – 368 с.
4. **Бондаренко, Ю. В.** Математична модель оцінки неоднорідності деформації при осадці [Текст] / Ю. В. Бондаренко, Ю. О. Белоконь, Т. О. Васильченко // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 1 (38). – С. 12-15.
5. **Vasilchenko, T.** Calculation of planetary drive of mechanical press [Text] / T. Vasilchenko, Yu. Bondarenko, G. Yavtyshenko, Yu. Belokon' // Metallurgical and Mining Industry. Intern. Scientific conf. «Reliability and safety of technological equipment» (RSTE-2015). – Dnipropetrovsk, 2015. – Pp. 178-182.
6. **Целиков, А. И.** Теория прокатки [Текст] / А. И. Целиков, А. Д. Томленов, В. И. Зюзин и др. – Справочник. – М. : Металлургия, 1982. – 335 с.
7. **Николаев, В. А.** Трение и технологические смазки при прокатке [Текст] / В. А. Николаев. – Запорожье : РИО ЗГИА, 2002. – 114 с.

ПРИЩИП Николай Игнатьевич, кандидат технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: metal.forming@zgia.zp.ua

ВАСИЛЬЕВ Александр Геннадиевич, старший преподаватель кафедры обработки металлов давлением, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: metal.forming@zgia.zp.ua

БОНДАРЕНКО Юлия Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: metal.forming@zgia.zp.ua

ВАСИЛЬЕВ Станислав Александрович, аспирант кафедры обработки металлов давлением, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: metal.forming@zgia.zp.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СМАЗКИ ДЛЯ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Результаты исследований эффективности и выбора технологической смазки для холодной прокатки низколегированных сталей показали, что модель расчета коэффициента трения с использованием теоретических формул на основе выполненных экспериментов по определению опережения металла дает точные результаты, которые совпадают с данными других работ. Выбрана эффективная технологическая смазка для холодной прокатки марганцовистых, марганцекремниевых и хромомарганцевых-кремниевых сталей на реверсивных станах холодной прокатки.

Ключевые слова: низколегированная сталь, прокатный стан, холодная прокатка, технологическая смазка, коэффициент трения

PRITSHIP Nicholas, Candidate of Technical Sciences, Professor of Department of Treatment of Metals by Pressure, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: metal.forming@zgia.zp.ua

VASILIEV Olesander, senior teacher of Department of Treatment of Metals by Pressure, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: metal.forming@zgia.zp.ua

BONDARENKO Yuliya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Treatment of Metals by Pressure, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: metal.forming@zgia.zp.ua

VASILIEV Stanislav, Graduate Student of Department of Treatment of Metals by Pressure, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: stas-vasiliev.91@rambler.ru

RESEARCHS OF EFFICIENCY AND CHOICE TECHNOLOGICAL OILING FOR COLD RILLING OF LOW-ALLOYED STEELS

The results of researches of efficiency and choice of technological oil for cold rolling low alloy steels found that the model for calculation of friction coefficient using theoretical formulas on experiments based performed to determine the advancing metal gives accurate results coincide with those of other works. Effective technological oiling for cold rolling marchant, marhentse-silicon and silicon-hromo-marhantseve steels reversible cold rolling mills is chosen.

Keywords: low alloy(ed) steel, rolling mill, cold rolling, technological oiling, the coefficient of friction