

Выводы. Выполнены экспериментальные исследования, целью которых стояло проверка адекватности разработанных моделей и подтверждение выдвинутых предположений. В соответствии с поставленной целью было выполнено исследование объемных перемещений металла при прокатке в несимметричном калибре, определение положения раската в калибре при прокатке несимметричных профилей в двухвалковых калибрах. В результате экспериментальных исследований были установлены адекватность разработанных моделей и подтверждение выдвинутых предположений, максимальное отклонение расчетных значений от экспериментальных не превышала 10,5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Илюкович Б. М., Нехаев Н. Е., Меркурьев С. Е. Прокатка и калибровка : справочник в 6 т. Днепропетровск : Дніпро-Вал, 2002. Т. 1. 506 с.
2. Илюкович Б. М. Прокатка и калибровка: справочник в 6 т. Днепропетровск : Дніпро-Вал, 2003. Т. 2. 569 с.
3. Гарновский И. Я., Скороходов А. Н., Илюкович Б. М. Элементы теории прокатки сложных профилей. М. : Металлургия, 1972. 352 с.
4. Огинский И. К. Развитие методов расчета калибровки, определение положения раската в калибре при прокатке несимметричных профилей. *Системні технології*. 2011. № 2 (73). С. 130–139.
5. Процессы деформации металла на основе многовалковых калибров / Огинский И. К., Данченко В. Н., Самсоненко А. А., Бояркин В. В. Днепропетровск : Пороги, 2011. 355 с.
6. Огинский И. К. Модель объемных перемещений при прокатке в валках неравного диаметра. *Обработка материалов давлением : Сб. научн. тр. Краматорск : Донбасская государственная машиностроительная академия*. 2011. № 2 (27). С. 54–57. ISSN 2076-2151.
7. Огинский И. К. Работа и моменты при прокатке в несимметричных калибрах. *Сб. научн. тр. Донбасского государственного технического университета*. Алчевск : ДонГТУ. 2010. № 32. С. 188–199. ISSN 2077-1738.
8. Есипов В. Д. Распределение обжатия между валками в асимметричных разрезных калибрах. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1987. № 6. С. 47–50.
9. Теряев В. А. Распределение крутящих моментов между валками при прокатке балочных профилей. *Прокатное производство: Сб. научн. тр. Института черной металлургии*. М. : Металлургия. 1969. Вып. 17. С. 125–129.
10. Исследование силовых факторов при прокатке в разрезных калибрах / А. П. Чекмаев и др. *Труды института черной металлургии. Прокатное производство*. 1961. Т. 15, Вып. 3. С. 68–70.

Поступила в редколлегию 08.09.2020.

УДК 621.771.01

DOI 10.31319/2519-2884.tm.2020.10

САМОХВАЛ В.М., к.т.н., доцент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕРТЯ В ПРОЦЕСІ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ПРОКАТУВАННЯ

Вступ. Тертя відіграє вирішальне значення в багатьох процесах. Зокрема, процеси прокатування відбуваються саме завдяки силам тертя і за їх відсутності прокатування стає неможливим. Разом з тим, у більшості процесів прокатування прагнуть змен-

шити тертя до оптимального рівня, забезпечуючи зменшення витрат енергії та робочого інструменту. Відповідно, точне визначення показників тертя в процесах прокатування завжди було і залишається досить актуальною задачею.

В теорії прокатування тривалий час ведеться дискусія про природу тертя та показники для оцінки умов тертя. Так в роботі Грудєва О. П. (1982) відзначається, що «Термін «коефіцієнт тертя», достатньо ясний і визначений в механічному розумінні, при обробці металів тиском може мати неоднозначне тлумачення через особливі кінематичні умови на контактній поверхні» [1]. Тому пропонується використовувати термін «середній коефіцієнт тертя», а при наявності зони прилипання – «середній умовний коефіцієнт тертя».

Широкого розголосу набула дискусія, в якій обговорювалась правомірність використання терміну «пластичне тертя» [2 - 5]. Але, незважаючи на тривале і широке обговорення, остаточної ясності в питаннях тертя при прокатуванні не досягнуто. Пропонуються різноманітні гіпотези щодо інтерпретації проявів тертя в процесах прокатування. Наприклад, в роботі [6] пропонується розглядати процес прокатування як сукупність трьох складових: вдавлювання (осаджування), зсув, і кочення. Відповідно, параметри тертя визначаються для кожної з цих складових. За результатами роботи зроблено суперечливий висновок, що «сили поверхневого тертя не впливають на момент і силу прокатування, тому, що вони протилежно направлені і компенсуються по величині». В роботі [7] виконано аналіз «існуючих поглядів на природу пластичного тертя при прокатуванні», за підсумками якого стверджується, що «не усунуті протиріччя існуючі в цій області знань», а тема законів і моделей тертя, «можливостей їх застосування до задач контактної взаємодії», потребує окремого обговорення.

На практиці, для звичайних процесів гарячого прокатування за помірних швидкостей коефіцієнти тертя обґрунтовано вибирають використовуючи наявні експериментальні дані. Для високошвидкісного прокатування такі дані відсутні. Відповідно, при визначенні технологічних параметрів високошвидкісного прокатування коефіцієнти тертя приймають відносно довільно і в досить широкому діапазоні.

В роботі [8], при дослідженнях впливу зношення валків на параметри прокатування в дротовому блоці, коефіцієнт тертя сталого процесу приймали 0,26, причому однаковим для всіх модулів. В монографії [9, стор. 161], рекомендовано визначати коефіцієнт тертя за графічними залежностями, які «побудовано за видозміненим рівнянням Екелунда». При цьому, коефіцієнт, що враховує вплив матеріалу валків, призначали 0,8, а коефіцієнт врахування впливу швидкості розраховували за залежністю У. Зандера. Згідно запропонованих графічних залежностей, для типового діапазону зміни температури прокатування в дротових блоках 900 - 1000°C, коефіцієнт тертя змінюється в межах 0,24 – 0,17. Можливо автори монографії [9] використовували ще якісь модифікації рівняння Екелунда, але згідно розрахунків для температури 1000°C і швидкості 100 м/с коефіцієнт тертя дорівнює 0,099, що суттєво відрізняється від значення, визначеного за графічними залежностями - 0,17. Такі можливі модифікації пояснюються тим, що, за висновками авторів монографії [9], «... При $f = 0,15$ і менше ... запас сил тертя на початку дуги захвату недостатній і пробуксовка може відбуватись при меншому задньому натяжінні і швидкості прокатування». Тобто, автори вважають, що коефіцієнт тертя при високошвидкісному прокатуванні не може бути меншим за 0,15, тому і рекомендують призначати коефіцієнт тертя за графічними залежностями, але не менше 0,17. Така рекомендація обґрунтована практичними даними роботи високошвидкісних блоків декількох станів.

Постановка задачі. Наведений, досить поверхневий, огляд свідчить про відсутність теоретично обґрунтованих методик визначення коефіцієнтів тертя в процесі високошвидкісного прокатування.

Метою роботи є визначення ймовірного діапазону зміни коефіцієнту тертя для сталого процесу високошвидкісного прокатування.

Методика та результати роботи. З відомих методів експериментального визначення коефіцієнтів тертя для сталого режиму прокатування, наведених у довіднику [1], за основу обрали метод крутного моменту, запропонований Д. Р. Блендом та Г. Фордом [10]. Метод передбачає вимірювання «чистого» крутного моменту та сили прокатування за умов однозонного ковзання на контактній поверхні (випередження дорівнює нулю) і визначення коефіцієнту тертя за формулою

$$f_y = \frac{M}{R \cdot F}, \quad (1)$$

де M – крутний момент одного валка, за винятком моменту тертя в підшипниках;

R – радіус валка;

F – сила прокатування.

Наведений метод модифікували шляхом відмови від умови забезпечення однозонного ковзання по осередку деформації. Це дозволяє використовувати експериментальні дані по моменту та силі для звичайного процесу прокатування в дрововому блоці.

Момент прокатування, за винятком витрат в підшипниках валків, визначали з співвідношення [11, стор. 212]

$$M = F(D \cdot \sin \beta - d_n \cdot \mu_b), \quad (2)$$

де M – витрачений момент прокатування;

D – діаметр валків;

β – кут, що визначає положення площини прикладання «рівнодіючої тиску металу на валки»;

d_n – діаметр шийки валків;

μ_b – коефіцієнт тертя в підшипниках.

Якщо у виразі (2) діаметр валка представити через радіус, то складова $R \cdot \sin \beta$ буде являти собою плече прикладання рівнодіючої відносно площини осей валків. Відповідно, цю величину можна представити у вигляді

$$a = \psi \cdot l_d = \psi \cdot R \cdot \alpha$$

де ψ – коефіцієнт плеча рівнодіючої;

l_d – довжина осередку деформації;

α – кут захвату.

Коефіцієнт плеча рівнодіючої, за даними [9] змінюється у межах 0,52 – 0,57, для овальних калібрів, та 0,47 – 0,56 для круглих калібрів. Тобто ця величина для овальних калібрів дещо більша ніж для круглих. У розрахунках приймали для овальних калібрів $\psi_{ov} = 0,54$ для круглих - $\psi_{ro} = 0,50$

Підставляючи проміжні величини в співвідношення (1), після перетворень, отримаємо

$$f_y = \frac{F [2 \cdot (\psi_i \cdot R \cdot \alpha) - d_n \cdot \mu_b]}{2 \cdot R \cdot F} = \psi_i \cdot \alpha - \frac{d_n \cdot \mu_b}{2 \cdot R} \quad (3)$$

Визначений таким чином коефіцієнт тертя являє собою умовний показник, що характеризує, за визначенням О. П. Грудєва, «середній умовний коефіцієнт тертя».

Також виконано розрахунки «енергетичного показника пластичного тертя», запропонованого Й. К. Огінським [12]. «За своєю фізичною сутністю (зв'язок нормальних

сил та сил зсуву) показник зовнішнього пластичного тертя близький до коефіцієнту тертя твердих тіл» [12], і визначається з залежності

$$f_e = \frac{V_c}{A_k} \cdot \frac{1}{R \cdot \alpha} \cdot \frac{\sigma_m}{p_c} \quad (4)$$

де V_c – зміщений об'єм металу;

A_k – площа контактування розкату з валками у межах осередку деформації;

σ_m – опір метала деформуванню;

p_c – середній тиск по осередку деформації.

При виконанні розрахунків зміщений об'єм металу за прохід визначали як добуток зміни площі перерізу розкату на довжину осередку деформації

$$V_c = (A_1 - A_2) \cdot l_d = A_2(\lambda - 1) \cdot l_d$$

де A_1 , A_2 – площа перерізу розкату до та після проходу, відповідно;

λ – коефіцієнт видовження за прохід.

Площу контактування розкату з валками визначали як добуток середньої ширини розкату на довжину осередку деформування $A_k = b_{\text{ср}} \cdot l_d$. Величина $(R \cdot \alpha)$ являє собою довжину осередку деформації, тобто $R \cdot \alpha = l_d$.

Підставляючи наведені проміжні величини у залежність (4), після перетворень, отримуємо

$$f_e = \frac{A_2(\lambda - 1)}{b_{\text{ср}} \cdot l_d} \cdot \frac{\sigma_m}{p_c} \quad (5)$$

Показники тертя, визначені за модифікованою методикою Бленда-Форда та за методикою Й. К. Огінського, порівнювали з коефіцієнтами тертя розрахованими за залежністю Екелунда, з врахуванням впливу швидкості за рівнянням Зандера

$$f_p = K_a \cdot K_v \cdot (0,55 - 0,00024 \cdot t) \quad (6)$$

де t – температура розкату на вході у осередок деформації.

Коефіцієнт K_a , що враховує вплив матеріалу валків, за аналогією з [6], приймали рівним 0,8. Коефіцієнт K_v , що враховує вплив швидкості, визначали за рівнянням Зандера

$$K_v = 0,4 + 0,6e^{-0,2(V-2)}.$$

Розрахунки коефіцієнту тертя для сталого процесу, виконали для випадку прокатування катанки діаметром 6,5 мм в десяти модульному блоці 210 в системі калібрів «овал – круг». Параметри прокатування катанки наведені в таблицях 1 та 2, результати розрахунків показані на рисунку 1.

Наведені в таблиці 2 температурні та енергосилові параметри прокатування є усередненими даними за компанію роботи комплекту валків при прокатуванні середньої вуглецевої сталі, що відповідає маркам 35, SAE 1035.

Як видно з отриманих розподілень розрахованих коефіцієнтів тертя, визначених за залежностями, що розглядаються, всі значення менше 0,15. Також для всіх методик спостерігається поступове зменшення коефіцієнтів тертя від першого до чистового модулю.

Таблиця 1 – Параметри прокатування катанки діаметром 6,5 мм в дрововому блоці 210

№ мод.	Розміри розкату		Площа $A, \text{мм}^2$	Параметри осередку				Діаметр $D_k, \text{мм}$	Швидкість. $V_1, \text{м/с}$
	$H, \text{мм}$	$V, \text{мм}$		λ	$\Delta h, \text{мм}$	$l_d, \text{мм}$	$\alpha, \text{рад}$		
1	24,42	13,29	259,8	1,213	6,71	26,14	0,257	203,7	14,13
2	16,37	16,24	209,3	1,241	8,18	28,65	0,286	200,7	17,54
3	19,95	10,73	168,2	1,244	5,64	24,10	0,234	205,9	21,83
4	13,25	12,72	133,8	1,257	7,23	27,11	0,267	203,3	27,44
5	16,26	8,09	105,5	1,268	5,16	23,18	0,223	208,2	34,81
6	10,41	10,18	83,7	1,26	6,08	24,98	0,243	205,3	43,87
7	12,85	6,42	67	1,249	3,99	20,42	0,195	209	54,81
8	8,25	8,16	53	1,264	4,69	22,03	0,213	206,9	69,28
9	10,22	5,13	42	1,262	3,12	18,09	0,172	209,8	87,43
10	6,58	6,58	34	1,235	3,64	19,46	0,187	208,1	108

Примітка: H – горизонтальний розмір розкату; V – вертикальний.

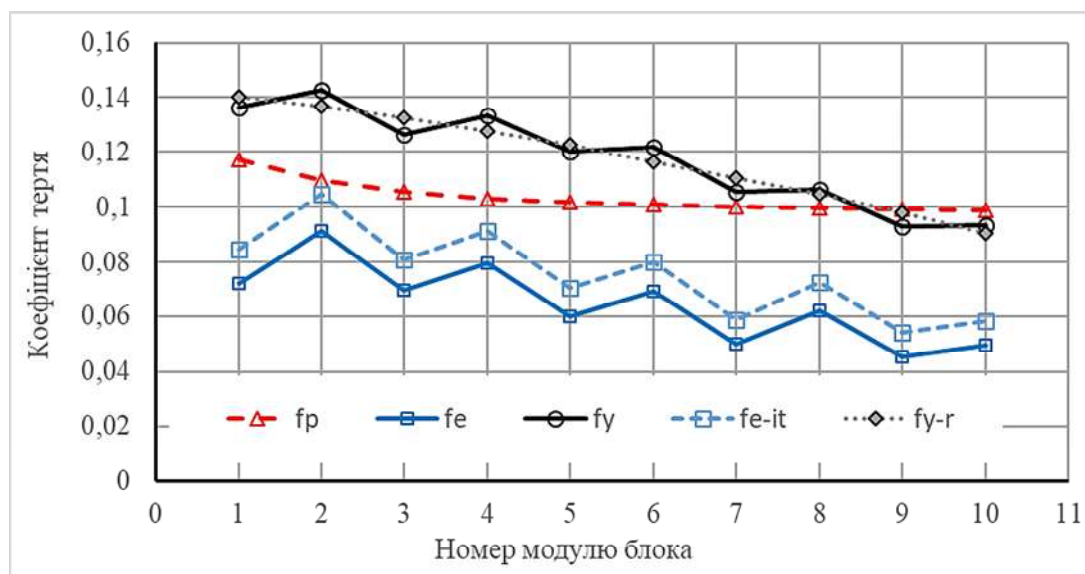
Таблиця 2 – Енергосилові параметри прокатування катанки 6,5мм

№ мод.	Температура розкату $t, \text{°C}$	Опір деформації $\sigma_m, \text{Н/мм}^2$	Середній тиск, $p_{сep}, \text{Н/мм}^2$	Сила прокатування $F, \text{кН}$	Момент прокатування $M, \text{кН}\cdot\text{м}$
1	946	269,50	355,63	109,9	2,6
2	951	272,40	354,43	76,7	2,2
3	957	279,28	378,02	83,7	1,8
4	964	273,28	363,18	57,6	1,5
5	971	269,68	378,20	61,5	1,2
6	979	262,18	357,79	42,1	1,0
7	986	253,26	361,29	44,2	0,8
8	992	249,80	348,44	30,6	0,6
9	998	241,79	354,44	31,6	0,5
10	1005	236,61	336,02	22,2	0,4

Модифікована методика Бленда-Форда (залежність 3) дає значення f_o у межах 0,143 – 0,093. При цьому, для всіх модулів виконується умова $f_o \leq \alpha/2$. Для круглих калібрів у послідовності «овал-круг» коефіцієнт тертя дещо більше ніж для попереднього овального, що може бути пов'язане з неточним визначенням коефіцієнту плеча рівнодіючої.

За співвідношеннями Екелунда-Зандера (залежність 6) значення коефіцієнту тертя f_p монотонно зменшуються від 0,117 у першому проході, до 0,099 у десятому. Причому для п'яти останніх модулів, для яких швидкість прокатування перевищує 40 м/с, значення коефіцієнту тертя несуттєво відрізняються від 0,1.

Найменші значення коефіцієнту тертя отримано за залежністю Огінського (формула 5). Енергетичний показник пластичного тертя f_a змінюється у межах 0,091 – 0,045. При цьому спостерігається суттєва різниця показників для кожної з пар калібрів «овал круг» - для круглого калібру значення показника завжди більше, ніж для овального.



Значення f_a визначено за усередненими експериментальними даними опору метала деформуванню σ_m та середнього тиску p_c по модулям блоку. При застосуванні ітераційної процедури, що зводиться до визначення середнього тиску за розрахованими значеннями показника пластичного тертя f_a , отримуємо дещо більші значення показника показник пластичного тертя f_{a-t} , від 0,105 до 0,054. Таке збільшення пов'язане з зменшенням середнього тиску, який у виразі 5 підставляється у знаменник. Але навіть одна така ітерація суперечить фактичним значенням середнього тиску, сили та моменту прокатування. Можливо, що «енергетичний показник пластичного тертя» f_a відображає мінімально необхідний рівень сил тертя в осередку, який забезпечує здійснення роботи пластичної деформації, тобто зміщення відповідного об'єму металу. Але отримані значення цього показника суттєво менше загальноприйнятих, що робить його непридатним для визначення технологічних параметрів за відомими методиками.

Отже, з розглянутих методів визначення коефіцієнту тертя при високошвидкісному прокатуванні, найбільш обгрунтованим видається метод Бленда-Форда. У всякому випадку, цей метод дає значення, які у найбільшій мірі відповідають практичним даним і рекомендаціям А.А. Горбанева, С.М. Жучкова та інших авторів монографії [9].

Для практичного використання даних, отриманих на основі фактичних енергосилових параметрів прокатування конкретного профілерозміру катанки, розподіл значень f_y по модулям блоку апроксимували регресійною залежністю від швидкості та температури f_{y-r} , за аналогією з залежностями Еклунда-Зандера. Отримано рівняння

$$f_{y-r} = 0,664 - 0,00055 \cdot t - 0,00018 \cdot V_1 \quad (7)$$

Адекватність запропонованої залежності, відносно розрахункових даних, підтверджується достатньо високим значенням коефіцієнту кореляції, який дорівнює 0,92, та значним перевищенням розрахованого критерію Фішера над табличним, відповідно $42,9 > 3,29$.

Точність визначення коефіцієнту тертя сталого процесу високошвидкісного прокатування може бути підвищена за рахунок врахування в базовому методі Бленда-Форда величини випередження та інших технологічних параметрів.

Висновки. За результатами розрахунків коефіцієнту тертя сталого процесу високошвидкісного прокатування з використанням усереднених даних сили та моменту прокатування за методом Бленда-Форда встановлено, що цей показник може змінюватись у межах 0,15 – 0,10. Зазначений показник тертя, як «середній умовний коефіцієнт тертя», відображає узагальнений вплив умов тертя на технологічні параметри в умовах сталого прокатування. Цей метод може бути рекомендований до використання за умов виконання умов захвату розкату валками.

Значення коефіцієнту тертя, обчислені за методами Еклунда-Зандера та Огінського, значно менше мінімально допустимих, що виключає їх практичне застосування без відповідної модифікації.

У розрахунках технологічних параметрів прокатування в дровових блоках необхідно враховувати зменшення коефіцієнту тертя сталого процесу від першого до останнього модуля, що обумовлено збільшенням швидкості та температури розкату.

ЛІТЕРАТУРА

1. Грудев А. П., Зильберг Ю. В., Тилик В. Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. Справочник. М. : Металлургия, 1982. 312 с.
2. Зильберг Ю. В. О некоторых терминах трения, изнашивания и смазки. *Трение и износ*. 1991. Т. 12, № 5. С. 885–890.
3. Матвеевский Р. М. Замечания к статье Ю. В. Зильберга «О некоторых терминах трения, изнашивания и смазки». *Трение и износ*. 1991. Т. 12, № 5. С. 891–892.
4. Зильберг Ю. В. Закон и модели пластического трения. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2000. № 11. С. 22–24.
5. Зильберг Ю. В. Замечания по дискуссии о пластическом трении. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2002. № 9. С. 26–29.
6. Подобедов Н. И. Механика взаимодействия валков с металлом при продольной прокатке. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск: Машини і пластична деформація металу*. 2018. С. 98–104.
7. Огинский И. К. Пластическое трение при прокатке. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія *Машинобудування*. 2011. № 62. С. 150–153.
8. Maksymenko O. P., Samokhval V. M., Orobtssev A. Y., Marchenko K. K. Modeling the influence of rolls wear on the rolling parameters in a wire rod block. *Математичне моделювання*. 2019. № 2 (41). С. 83-91.
9. Теоретические и технологические основы высокоскоростной прокатки катанки / А. А. Горбанев и др. Минск : Выш. шк. 2003. 287 с.
10. Bland D. R., Ford H. Communications of Cold Strip Rolling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1948. Vol. 159. P. 161 – 163.
11. Целиков А. И., Никитин Г. С., Рокотян С. Е. Теория продольной прокатки : учебн. пособие. М. : Металлургия. 1980. 320 с.
12. Огинский И. К., Данченко В. Н., Самсоненко А. А., Бояркин В. В. Процессы деформации металла на основе многовалковых калибров : монография. Днепропетровск : Пороги. 2011. 355 с.

Надійшла до редколегії 27.08.2020.