

DOI: 10.31319/2519-2884.43.2023.5

УДК 621.771.074

Самохвал В.М., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-0585-7225, e-mail: volsamokhval@gmail.com

Стасько Є.В., здобувач третього (доктор філософії) рівня, e-mail: Chinchopapa@gmail.com

Васильєв О.С., здобувач третього (доктор філософії) рівня, e-mail: vaasilieeva@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Samokhval Volodymyr, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metallurgy

Stasko Yevhen, postgraduate student

Vasyliiev Oleksandr, postgraduate student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ДО РОЗРОБКИ СТАТИСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗНОСУ ВАЛКІВ СТАНІВ ДОВГОМІРНОГО ПРОКАТУ

Метою роботи є аналіз структури відомих математичних моделей зносу валків прокатних станів, особливостей зносу валків окремих станів довгомірного прокату та визначення загального підходу до побудови статистичних моделей для прогнозування зношення таких валків. Доведено, що структура більшості відомих моделей зношення валків прокатних станів включає технологічні параметри, які є найбільш значимими для певного стану, та емпіричний коефіцієнт. З аналізу результатів вимірювань зносу валків різних станів встановлено, що для умов станів довгомірного прокату, доцільно використовувати статистичні моделі зносу, які враховують шлях тертя, через масу прокату, та емпіричний коефіцієнт. В якості емпіричного коефіцієнту рекомендовано використовувати показник інтенсивності зношення валків. На основі такого підходу, з використанням відомих з літератури даних вимірів, розроблена статистична модель зносу валків однієї з клітей при прокатуванні круглого профілю.

Ключові слова: прокатні валки; знос; вріз валків; калібр; статистична модель; інтенсивність зношення.

The purpose of the work is to analyze the structure of known mathematical models of wear of rolls of rolling mills, features of wear of rolls of single long products rolling mills, and to determine a general approach to the construction of statistical models for predicting the wear of such rolls. It is proved that the structure of most known models of wear of rolls of rolling mills includes technological parameters that are most significant for a certain condition and an empirical coefficient. From the analysis of the results of measurements of the wear of rolls of different mills, it was established that for the conditions of the mills of long products, it is advisable to use statistical models of wear that take into account the way of friction, through the mass of the rolled products, and the empirical coefficient. As an empirical coefficient, it is recommended to use indicative intensities of roller wear. On the basis of this approach, using measurements known from the literature, a statistical model of the wear of rolls of one of the stands during rolling of a round profile was developed.

Keywords: rolling rolls; wear and tear; groove roll; pass; statistical model; intensity of wear.

Постановка проблеми

Прогнозування витрат валків є важливою складовою забезпечення виробничого процесу для будь-якого виду прокату. Для валків станів довгомірного прокату характерна зміна показників витрат у відносно широкому діапазоні, в залежності від виду прокату, особливостей технології, матеріалів застосованих валків, конструктивних відмінностей стану та інших чинників. При цьому, «каліброві валки мають зносостійкість близько кількох сотень тон гарячекатаної сталі на міліметр діаметра обробленого валка (т/мм)» [1], в той час як для валків станів плоского прокату цей показник на порядок більше. Відповідно, підвищення зносостійкості валків саме станів довгомірного прокату було і залишається важливою задачею в металургії, тому що цей

показник «має вирішальне значення для економіки виробництва, а також геометричних допусків прокату» [1].

Основними напрямками підвищення зносостійкості валків є розробка і впровадження нових валкових матеріалів, оптимізація умов застосування та удосконалення технологій відношення валків. Оптимізація умов застосування валків передбачає дослідження взаємозв'язку між зносостійкістю та технологічними параметрами процесу прокатування. Результатами таких досліджень є розробка математичних моделей зношування валків, які використовують для прогнозування витрат валків та власне оптимізації умов їх використання за критеріями мінімізації зносу. Тому роботи, спрямовані на вивчення особливостей зношування валків, розробку математичних моделей для більш точного прогнозування зносу, зберігають свою актуальність.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

За даними Андерсона (Andersson S.) [2], найбільш відомою моделлю зношення є так званий «закон Арчарда» (Archard J. F.), попри те, що цю залежність першим опублікував Рагнар Холм (Ragnar Holm) ще в 1946 році. Ця модель відображала залежність між об'ємом матеріалу V , який втрачається у наслідок тертя, від шляху ковзання s , нормальної сили навантаження F_N , твердості більш м'якої поверхні H , і мала вид

$$\frac{V}{s} = K \cdot \frac{F_N}{H}. \quad (1)$$

Коефіцієнт пропорційності K був введений у залежність «...для забезпечення узгодженості між теорією та експериментами. Арчард заснував свою інтерпретацію коефіцієнта зносу K на оцінці реальної площі контакту та ймовірнісних міркуваннях». [2].

Розділивши обидві частини рівняння (1) на видиму площу контакту A і представивши відношення K/H як розмірний коефіцієнт зносу k , отримуємо наступну, часто використовувану модель зносу, [2]

$$\frac{h}{s} = k \cdot p. \quad (2)$$

Також в роботі [2] наведено модель з використанням показника швидкості зносу, тобто у формі, зручній для моделювання динамічних систем,

$$\frac{dh}{dt} = k \cdot p \cdot v, \quad (3)$$

де v — швидкість ковзання в зоні контактування поверхонь.

Цей вираз називають «узагальнене рівняння зносу Арчарда».

На основі узагальненої моделі Арчарда пропонуються різноманітні залежності для прогнозування зносу валків прокатних станів. Зокрема, в роботі [3] розглянуто три моделі зносу.

Модель Ванга (Wang) [4] може бути представлена виразом

$$\delta(x) = \sum_{i=1}^n \left(K_i \cdot \frac{F_i}{W_i} \cdot L_i \cdot [1 + f(x)] \right); \quad (4)$$

модель Нікітенко (Nikitenko) [5] записується як

$$\delta(x) = \sum_{i=1}^n \left(K_i \cdot \frac{P_i(x) \cdot L_i}{\pi \cdot D_{wr} \cdot HB_{wr}} \right); \quad (5)$$

модель Као (Cao) [6]

$$\delta(x) = \sum_{i=1}^n \left(K_i \cdot \frac{L_i \cdot l_{ci}}{D_{er}} \cdot \left(\frac{F_i}{W_i \cdot l_{ci}} \right)^a \cdot [1 + f(x)] \right), \quad (6)$$

де F_i — сила прокатування; W_i — ширина розкату після проходу; L_i — довжина розкату після проходу; P_i — розподілене навантаження, як відношення сили прокатування до ширини контакту валків з розкатом; D_{wr} — діаметр робочих валків; HB_{wr} — твердість поверхні валків по

Бринелю; l_{ci} — довжина осередку деформації; a — показник степені, відповідно до номеру кліті; $f(x)$ — функція, яка описує нерівномірність розподілу зносу по довжині бочки валка.

У всіх наведених моделях зносу присутній емпіричний коефіцієнт, для якого іноді використовують назву «коефіцієнт налаштування зносу». Як зазначено в роботі [3], «коефіцієнт налаштування зносу для обраних моделей зносу можна визначити шляхом співвіднесення багатьох чинників прокатування». В цій роботі «коефіцієнт налаштування зносу» K_i параметризовано на основі марки сталі штаби, що прокатується, типу матеріалу валків від постачальника та кліті прокатного стану. В роботі використано досить цікавий підхід, коли 2/3 експериментальних даних використовували для «калібрування» моделі, а решту даних використовували для оцінки точності отриманої моделі зносу за різних підходів до параметризації коефіцієнтів зносу. Експериментальні дані включали результати вимірювань профілів зношення 395 комплектів робочих валків клітей №6 та №7 стану гарячого прокатування штаби. На цих валках було прокатано 51 710 розкатів дев'яти різних марок сталі з використанням 8 різних комплектів валків. Всі валки були одного типу — відбілений індефінітний чавун, але відрізнялись мікроструктурою та показниками твердості.

Як видно з залежностей (4—6) всі розглянуті моделі зносу містять основні складові рівняння Арчарда, такі як сила, шлях тертя, твердість. Окремі технологічні чинники, такі як діаметр валків, довжина осередку деформації, можуть входити до залежностей, або ж опосередковано враховуватись через емпіричний коефіцієнт.

Така особливість побудови залежностей характерна і для інших моделей зносу. Наприклад, вищезгадана модель Нікітенко [5] в подальших роботах автора була уточнена і набула виду [7]

$$\delta = K_i \cdot \frac{F_r}{W} \cdot \frac{h_0}{h_1} \cdot \frac{L_i}{\pi \cdot D_{wr} \cdot HB_{wr}}. \quad (7)$$

Залежність рекомендована до використання за умови, що час проходження осередку деформації, як відношення довжини осередку до швидкості прокатування, не перевищує 1 с. Особливістю цієї моделі зносу є врахування коефіцієнту видовження, як технологічного параметру процесу.

В роботі Байона та Лі (Byon S.-M., Lee Y.) [8] знос врізів валків для овальних та круглих калібрів визначають через ваговий коефіцієнт

$$J_w = 1 - k \cdot \left(\frac{F_r^2 \cdot L_c \cdot N_b}{H_S} \right), \quad (8)$$

де F_r — сила прокатування у відповідному проході; L_c — довжина розкату (на виході з осередку деформації відповідного проходу); N_b — кількість розкатів; H_S — твердість валків по Шору; k — коригуючий коефіцієнт.

В роботі відзначається, що співвідношення $\frac{F_r^2 \cdot L_c}{H_S}$ суттєво не змінюється по клітям

стану, так як з збільшенням довжини розкату, сила прокатування зменшується. Значення коригуючих коефіцієнтів, для умов стану довгомірного прокату, становлять: для овальних калібрів $19,6 \cdot 10^{-12}$; для круглих калібрів $35,9 \cdot 10^{-12}$.

Дещо відмінний вид залежності запропоновано в роботі [9]

$$\delta(x) = - \left(k_{wW1} + k_{wW2} \cdot P_i^{k_{wW3}} \right) \cdot \left(1 + k_{wW4} \cdot X_i^{k_{wW5}} \right) \cdot \left(1 + k_{wW6} \cdot Q_{Ri} \right) \cdot \left(1 + k_{wW7} \cdot l_c \right), \quad (9)$$

де P_i — розподілене навантаження, кН/мм; X_i — відносна ширина розкату (до осі симетрії), мм; Q_{Ri} — середня температура поверхні робочого валка, °C; l_c — довжина дуги контактування валка з розкатом, мм; k_{wWi} — відповідні коефіцієнти для кожної з клітей.

Отже, запропонована [9] залежність виділяє як найбільш значимі такі чинники як навантаження, температура валків та довжина дуги контакту. Всі інші параметри прокатування враховуються через емпіричні коефіцієнти, кількість яких перевищує кількість основних чинників.

Це свідчить про те, що для валків прокатних станів класична модель абразивного зношення, у вигляді запропонованому Арчардом, не завжди може забезпечити потрібний рівень точності прогнозування зносу. Більш адекватні результати забезпечують моделі зносу, які враховують вплив технологічних параметрів.

Цю тезу підтверджено в роботі [10], де на основі аналізу зносу кількох комплектів твродосплавних валків дротового блоку, стверджується, що «загальноприйняті трибологічні параметри прокатування ... досить слабо корелюють з інтенсивністю зношення». Найбільш значимими чинниками, за наведеними емпіричними даними, виявились коефіцієнт видовження, параметр форми осередку деформації та відносна швидкість по осередку деформації. У роботі пропонується регресійна модель зносу твродосплавних валків високошвидкісного дротового блоку.

З наведеного огляду деяких моделей зносу валків прокатних станів, можемо зробити висновки, що у виробничих умовах перевага надається емпіричним моделям зносу, які отримують за результатами системного вимірювання зносу валків конкретного стану і, навіть кожної з клітей стану. Структура таких моделей передбачає врахування найбільш значимих технологічних параметрів процесу за певних умов, а вплив всіх інших параметрів враховують через емпіричний коефіцієнт. Для визначення значимих технологічних чинників та забезпечення необхідної точності визначення «коефіцієнту налаштування зносу» необхідно накопичення даних про фактичне зношення значної кількості комплектів валків.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є аналіз структури відомих математичних моделей зносу валків прокатних станів, особливостей зносу валків окремих станів довгомірного прокату та визначення загального підходу до побудови статистичних моделей для прогнозування зношення таких валків.

Задачі роботи включають виявлення найбільш значимих факторів, які визначають зношення валків, визначення структури моделі та побудова залежностей для прогнозування величини зносу.

Виклад основного матеріалу

З наведених залежностей (2—9), які представляють незначну частку відомих моделей зносу, видно, що всі вони мають відмінну структуру і враховують різні чинники, але всі містять емпіричні коефіцієнти для узгодження впливу різних параметрів процесу і забезпечення прийнятної точності прогнозування зносу.

Більшість залежностей враховує силові умови через силу прокатування або середній тиск по осередку деформації. Шлях тертя, як один з основних чинників залежності Арчарда, враховують напряму, як добуток довжини розкату на кількість розкатів, або через масу прокату.

Для умов конкретних клітей станів неперервного прокатування технологічні параметри змінюються незначною мірою — лише в межах коливань таких технологічних параметрів як розміри підкату, температура, швидкість. Відповідно, для таких «локальних» моделей зносу важко виділити міру впливу окремих технологічних чинників, через що суттєво зростає значення емпіричного коефіцієнту.

На основі підходу, запропонованого в роботі [3], використано модель, структура якої передбачає врахування мінімальної кількості найбільш значимих чинників процесу прокатування, та емпіричного коефіцієнту, який враховує вплив всіх інших технологічних чинників. В якості основного, найбільш значимого чинника процесу обрано кількість (масу) прокатуваного в калібрі металу. Емпіричний коефіцієнт визначаємо на основі даних вимірів зносу врізів валків за установку. За такої структури моделі емпіричний коефіцієнт являє собою коефіцієнт пропорційності, який узгоджує значення зносу та маси прокату, а сама модель є регресійною. По мірі накопичення даних вимірювань зносу для фіксованої кількості прокату, буде зростати точність визначення емпіричного коефіцієнту, як і точність моделі для прогнозування зносу для конкретної клітей стану.

Отже, пропонується використання моделі виду

$$w = K_e \cdot m, \quad (10)$$

де m — маса прокату, т.

Для вивчення взаємодії основних технологічних параметрів та їх впливу на емпіричний коефіцієнт, виконали аналіз особливостей змін цього коефіцієнту за наявними в літературі даними.

В роботі [11] наведено порівняння фактичних даних зносу валків з розрахованими за моделлю Байона-Лі [8] з фіксованим та з коригованим емпіричним коефіцієнтом та моделлю Арчарда. В якості прикладу, наведено дані зносу врізів овального калібру №1 кліті №11. Розміри врізів: ширина 40 мм; глибина врізу 7,5 мм; радіус побудови 30 мм. За кампанію роботи в калібрі було прокатано 9422 розкатів загальною масою 21670 т. Знос врізів валків вимірювали після прокатування приблизно 600—900 розкатів. Динаміку зміни зносу в залежності від маси прокатаного металу наведено на рис. 1. За даними [11], спостерігається майже лінійна залежність між зносом врізів валків та масою прокатаного металу. Тобто, за незмінних умов прокатування в калібрі кліті №11 знос приблизно рівномірно зростає по мірі збільшення маси прокатаного металу. Це дозволяє очікувати приблизно постійних значень емпіричного коефіцієнту та постійних значень швидкості зношення, тобто показника інтенсивності зносу, визначеного як частка від ділення зносу на масу прокату. Але за даними вимірів, постійні значення показника інтенсивності зносу спостерігаються лише після прокатування певної кількості металу. На початку кампанії роботи валків цей показник має максимальне значення 0,06 мкм/т. По мірі збільшення маси прокату він поступово зменшується, і після прокатування приблизно 12 000 т прокату зберігає постійне значення близько 0,03 мкм/т.

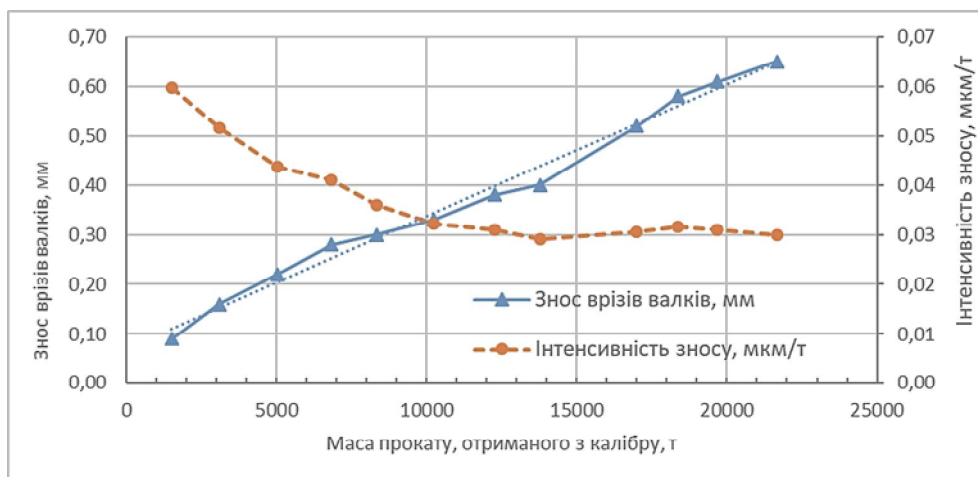


Рис. 1. Динаміка зносу та інтенсивності зносу врізів валків кліті №11 [11]

Така особливість зміни показника інтенсивності зношення може бути пов'язана з змінами текстури поверхні валків і змінами мікроструктури поверхневих прошарків валків. На початковому етапі роботи валків інтенсивність зношення визначається вихідними параметрами шорсткості поверхні та твердості поверхневих прошарків. По мірі збільшення шляху тертя, який можемо оцінити через масу прокату, відбувається поступова зміна шорсткості — певне опрацювання початкової поверхні і формування шорсткості робочої поверхні з більш стабільними параметрами. Одночасно відбуваються зміни мікроструктури поверхневих прошарків робочої поверхні врізів валків, що призводить до зменшення інтенсивності зношення. Після прокатування певної маси прокату процеси цих змін врівноважуються і показник інтенсивності зношення зберігає постійне значення, аж до досягнення допустимої величини зношення врізів валків.

Для з'ясування припущення про те, що інтенсивність зношення валків не є постійною величиною, а має більш складний характер зміни, виконали аналіз даних зношення з інших джерел. Зокрема, в роботі [12], наведено дані зношення чавунних валків клітей №6 та №16 стану неперервного прокатування профілів. Знос вимірювали після перевалки комплекту валків для калібрів, які були використані за кампанію, тобто установку в кліть. В кожній з клітей одного комплекту використано різну кількість калібрів з різною кількістю отриманого з них про-

кату. Використовуючи ці дані проаналізуємо залежність зносу та показника інтенсивності зносу від кількості прокату (маси прокату, отриманого з калібру).

Для кліті №6, яка розміщена в чорновій групі стану і має номінальний діаметр валків 550 мм, динаміка зміни максимального зносу по контуру калібру наведена на рис. 2. Відзначимо, що максимальний знос для нижніх врізів перевищує знос верхніх врізів для трьох з чотирьох калібрів. По мірі збільшення маси прокату металу знос зростає, за винятком нижнього врізу калібру №4, в якому було прокатано 19 642 т. Для показника інтенсивності зношення, визначеного за усередненим зносом верхніх і нижніх врізів, не виявлено характерної тенденції зміни (рис. 3). Він змінюється в інтервалі (0,081—0,121) мкм/т за середньоарифметичного значення 0,094 мкм/т. Узагальнюючи, можемо стверджувати, що для кліті №6 показник інтенсивності зношення становить приблизно постійну величину 0,094 мкм/т, з відхиленнями від — 0,013 мкм/т та +0,027 мкм/т. Приблизно постійні значення показника інтенсивності зношення в цій кліті пояснюються тим, що маса прокату, отриманого з калібрів, перевищує 12 000 т.

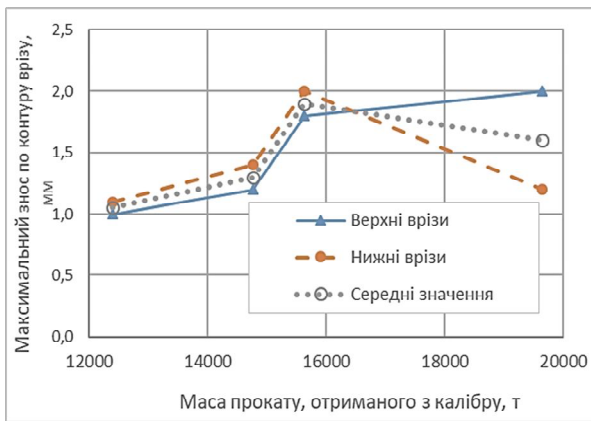


Рис. 2. Динаміка зносу врізів валків кліті №6 [12]

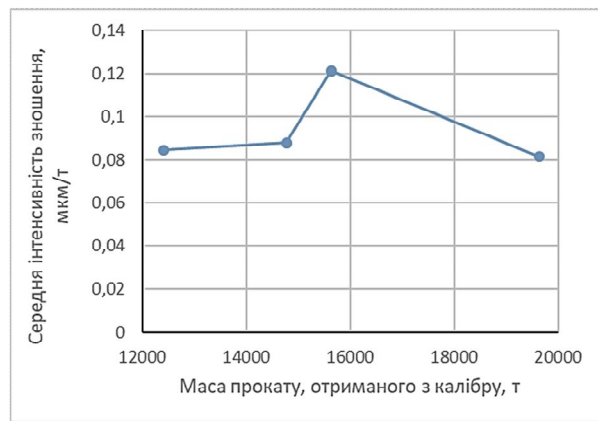


Рис. 3. Зміна показника інтенсивності зносу врізів валків кліті №6 [12]

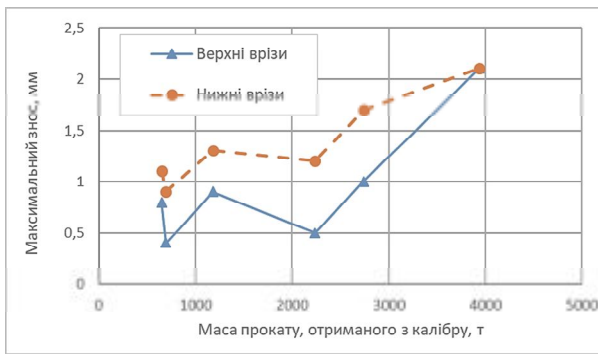


Рис. 4. Динаміка зносу врізів валків кліті №16 [12]

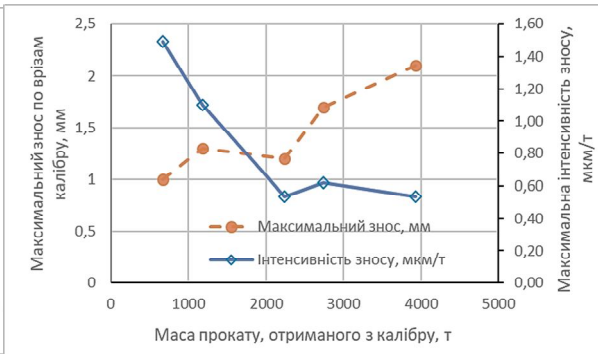


Рис. 5. Динаміка максимального зносу та показника інтенсивності зносу врізів валків кліті №16 [12]

Для кліті №16 за кампанію роботи комплекту валків використано шість калібрів для круга діаметром 24 мм, в яких було прокатано від 648 до 3935 т профілів. Номінальний діаметр валків кліті становить 380 мм. Динаміка зміни зносу для верхніх та нижніх врізів наведена на рис. 4. Усереднивши дані зносу та маси прокату для калібрів №12 та №17, в яких прокатано, відповідно, 648 та 693 т, отримали п'ять значень для подальшого аналізу. Згідно даним рис. 5, спостерігається загальна тенденція збільшення зносу по мірі збільшення маси прокату. На відміну від даних роботи [11], для кліті №16 використано дані різних калібрів, тому можливе зменшення величини зносу по мірі збільшення маси прокату. Динаміка зміни показника інтенсив-

ності зношення аналогічна даним [11], тобто поступове зменшення до певного значення маси прокату, після чого показник має приблизно постійне значення. Відмінності зводяться до іншого діапазону зміни значень — від 1,49 мкм/т до 0,534 мкм/т; та іншого порогового значення маси прокату — приблизно 2200 т.

Різні діапазони зміни значень показника інтенсивності зношення та абсолютного зносу за даними [11] та [12] пов'язані з різними матеріалами та діаметрами валків, різними умовами прокатування та відмінностями інших технологічних параметрів. Але однаковий характер зміни показника інтенсивності зношення для абсолютно різних станів і клітей не можна вважати випадковим збігом.

Це підтверджують і дані роботи [13], в якій виконано моделювання зносу овального та круглого калібру. Як видно з рис. 6, за розрахунковими даними залежність показника інтенсивності зношення від кількості прокату, як для овального, так і для круглого калібру, має вид спадаючих кривих, які поступово наближаються до постійного значення.

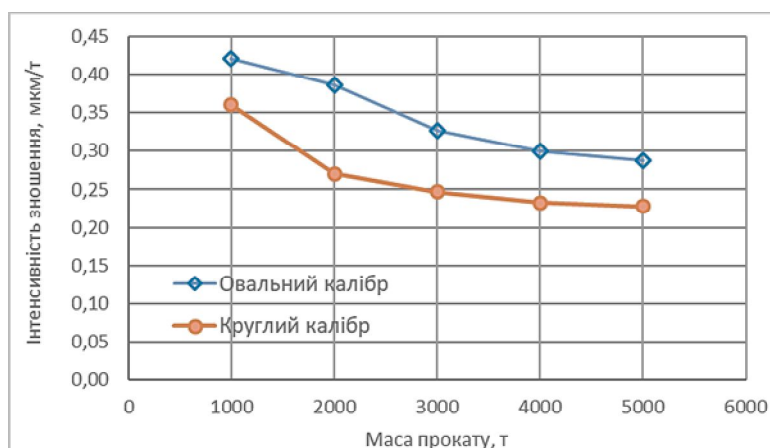


Рис. 6. Залежності показника інтенсивності зносу врізів валків овального та круглого калібрів [13]

Отже, показник інтенсивності зношення врізів валків може розглядатись не тільки як коефіцієнт пропорційності в залежності зносу від маси прокату, а як окремий параметр, що характеризує процес зношення валків певної кліті і опосередковано враховує вплив різноманітних параметрів процесу. Тобто, показник інтенсивності зношення може бути використаний як емпіричний коефіцієнт в залежності (10). Щоб перевірити цей висновок, виконали моделювання процесу зношення валків, використовуючи результати вимірів для кліті №16 [12]. Залежність показника інтенсивності зношення від маси прокату, показану на рис. 5, апроксимували співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \text{для } m \leq 2200 \text{ т} & \quad I_w = 1,86 - 0,0006 \cdot m & (11) \\ \text{для } m > 2200 \text{ т} & \quad I_w = 1,86 - 0,0006 \cdot 2200 = 0,54 - \text{const} , \end{aligned}$$

Використовуюючи визначений таким чином показник інтенсивності зношення, максимальну величину зносу врізів валків визначаємо за формулою

$$w = I_w \cdot m . \quad (12)$$

Відповідно, на початковому етапі роботи калібру, коли показник інтенсивності зношення поступово зменшується, маємо квадратичну залежність зносу від маси прокату. Після прокатування певної кількості металу, яка визначається матеріалом валків та технологічними параметрами прокатування, показник інтенсивності зношення досягає певного постійного значення і залежність зносу від маси прокату є лінійною. З порівняння даних зносу за результатами вимірів з розрахунковими даними, отриманими за залежностями (11) та (12), яке показано на рис. 7, видно, що для більшості точок, які відповідають різним калібрам одного комплексу валків кліті №16, залежності забезпечують достатню точність. Виняток становить калібр №10, в якому було прокатано 2740 т металу. Розрахункове значення зносу становить 1,5 мм, а за

результатами вимірів — 1,7 мм. Але це максимальне значення зносу для нижнього врізу. Для верхнього врізу максимальний знос становить 1,0 мм, а по осі обох врізів калібру — 1,3 мм. Тобто, навіть для калібру №10, точність визначення зносу можна вважати цілком прийнятною.

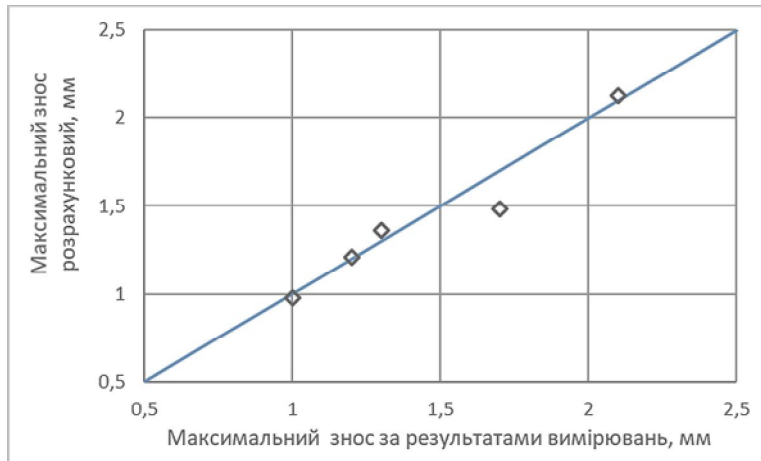


Рис. 7. Порівняння максимального зносу врізів валків кліті №16 за результатами вимірювань та розрахованих

Використання в моделі (12) показника інтенсивності зношення врізів валків, визначеного за результатами вимірювань, забезпечує більшу точність визначення зносу і прогнозування витрати валків.

Наприклад, при використанні постійного значення інтенсивності зношення, визначеного за максимальною масою прокату, отриманого з калібру, прогнозований знос врізів при масі прокату 670 т, становитиме

$$w_{670} = 0,54 \cdot 670 = 362 \text{ мкм} = 0,362 \text{ мм.}$$

Згідно розрахунків за запропонованою методикою, з врахуванням залежності показника інтенсивності від маси прокату, знос становить 0,98 мм, що майже збігається з зносом за результатами вимірювань — 1,0 мм.

Отже, показник інтенсивності зношення може бути використаний в якості основного показника, що характеризує умови зношення врізів валків, за аналогією з «коефіцієнтом налаштування зносу». Такий показник являє собою емпіричний коефіцієнт, який опосередковано враховує всі трибологічні та технологічні параметри, а також властивості матеріалу валків. Для визначення цього показника необхідна організація системного збору та аналізу даних про знос врізів валків кожної з клітей стану. Такі дані потрібні для уточнення значень показника для різних стадій кампанії роботи калібрів та визначення порогового значення маси прокату, після якого інтенсивність зношення приймає постійне значення.

Висновки

При використанні «локальних» моделей зносу, наприклад для випадків прокатування певного профілю в окремих клітях стану неперервного прокатування, більшість технологічних параметрів залишається незмінними і модель зносу може бути представлена як добуток коефіцієнту пропорційності та шляху тертя, як основного чинника моделі Арчарда. В якості коефіцієнту пропорційності може бути використаний показник інтенсивності зношення, як частка від ділення зносу на масу металу, прокатуваного в калібрі.

З аналізу даних зносу валків з різних джерел, встановлено, що показник інтенсивності зношення, суттєво змінюється за кампанію роботи калібру. На початковій стадії цей показник має певне значення, яке поступово зменшується, по мірі збільшення маси прокату, отриманого з калібру. Після прокатування певної кількості металу, яке визначаємо як порогове значення, показник інтенсивності зношення досягає постійного значення, яке не змінюється до кінця кампанії роботи калібру, тобто до досягнення допустимої величини зносу врізів валків.

Виявлені особливості зміни показника інтенсивності зношення обумовлені процесами опрацювання початкової поверхні та формуванням певної мікроструктури поверхневих прошарків валків на початкових стадіях кампанії роботи калібру. Після прокатування порогової маси прокату, ці процеси завершуються і показник інтенсивності зношення досягає стабільного значення.

Початкове та стає значення показника інтенсивності зношення, а також порогове значення маси прокату, можуть бути визначені за емпіричними даними по зносу та масі прокату для кожної з клітей стану.

Запропонована методика визначення зносу з використанням показника інтенсивності зношення, як емпіричного коефіцієнту, що опосередковано відображає вплив всіх значимих факторів процесу, забезпечує достатню точність прогнозування зносу і може бути використана для визначення витрат валків.

Список використаної літератури

1. Spuzic S., Strafford K.N., Subramanian C., Savage G. Wear of Hot Rolling Mill Rolls: An Overview. *Wear*. 1994. Vol. 176(2). p. 261–271. DOI: 10.1016/0043-1648(94)90155-4. URL: https://www.researchgate.net/publication/223768316_Wear_of_hot_rolling_mill_rolls_an_overview
2. Andersson S., Olofsson U. Towards a General Model for Wear Simulation. IRG-OECD Meeting, Uppsala, Sweden, 2005. URL: <https://www.researchgate.net/publication/266521808>
3. Souto N., Marchand E., Gay A., Koont Z., Legrand N. Performance Analysis of Work-Roll Wear Models on Hot Rolling. *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 926. pp 621-631. DOI:10.4028/p-q6v323. URL: https://www.researchgate.net/publication/362212210_Performance_Analysis_of_Work-Roll_Wear_Models_on_Hot_Rolling
4. Wang X.-D., Yang Q., He A.-R., Wang R.-Z. Comprehensive contour prediction model of work roll used in online strip shape control model during hot rolling. *Ironmaking & Steelmaking*. 2007. No. 34(4). P. 303–311. DOI:10.1179/174328107X168011 . URL: Comprehensive contour prediction model of work roll used in online strip shape control model during hot rolling | Request PDF (researchgate.net)
5. Nikitenko E. Effect of the Backup Rolls Wear on Hot Bands Flatness and Crown. *AIST Iron & Steel Technology* 2014. 11. P. 2005–2012.
6. Cao J., Liu S., Zhang J., Song P., Yan T., Zhou Y. ASR work roll shifting strategy for schedule-free rolling in hot wide strip mills. *Journal of Materials Processing Technology* 2011. 211(11). P.1768–1775. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2011.05.025. URL: ASR work roll shifting strategy for schedule-free rolling in hot wide strip mills | Request PDF (researchgate.net)
7. Nikitenko E. Improving the Accuracy of Predicting Work Roll Wear in the Hot Strip Mill. *AIS-Tech. Iron & Steel Technology*. 2017. P. 40–44. URL: https://www.aist.org/AIST/aist/AIST/Social_Media/17_nov_40_44_Improving_Accuracy.pdf
8. Byon S-M., Lee Y. Experimental and Semi-analytical Study of Wear Contour of Roll Groove and Its Applications to Rod Mill. *ISIJ International*. 2007. Vol. 47. No. 7. P. 1006–1015. DOI: 10.2355/isijinternational.47.1006
9. Liu Z., Guan Y., Wang F. Model development of work roll wear in hot strip mill. *ACMME 2017. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 207 (2017) 012022. DOI:10.1088/1757-899X/207/1/012022. URL: Microsoft Word - MEME-132+排版 (iop.org)
10. Самохвал В.М., Стасько Є.В. Аналіз параметрів та моделювання зношення валків високошвидкісних дровових блоків. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2022. № 1(40). С. 36–46. DOI: 10.31319/2519-2884.40.2022.4
11. Shigaki Y., da Cunha M.A. Online prediction of wear on rolls of a bar rolling mill based on semi-analytical equations and artificial neural networks. 17th Online World Conference on Soft Computing in Industrial Applications. Desember 10–21, 2012. DOI:10.1007/978-3-319-00930-8_22.

URL: (99+) Online Prediction of Wear on Rolls of a Bar Rolling Mill Based on Semi-Analytical Equations and Artificial Neural Networks | Yukio Shigaki - Academia.edu

12. Єршов С.В., Геймур К.Г., Кравченко К.О., Марченко К.К. Дослідження зносу калібрів при прокатуванні катанки в умовах середньосортно-дротового стану 400/200 ПАТ "ДМК". Вісник НТУ "ХПІ". 2016. №31 (1203). С. 23–30. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/a56ae0d7-dd2d-44bb-b376-ea4dd74060af/content>
13. Kim D. H., Lee Y., Yoo S. J., Choo W. Y., Kim B. M. Prediction of the wear profile of a roll groove in rod rolling using an incremental form of wear model. Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part B: J. Engineering Manufacture. 2003. P. 111–126. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.986.8263&rep=rep1&type=pdf>

TO THE DEVELOPMENT OF STATISTICAL MODELS OF WEAR ROLLS OF LONG PRODUCTS MILLS

Abstract

For long products rolling mills, a change in the indicators of wear and costs in a relatively wide range is characteristic, depending on the type of rolled product, the features of the technology, the materials used in the rolls, and other factors. This largely determines the level of operating costs when rolling profiles. Therefore, increasing the wear resistance of long product mill rolls was and remains an urgent task in metallurgy.

The purpose of the work is to analyze the structure of known mathematical models of wear of rolls of rolling mills, features of wear of rolls of individual long-products rolling mills, and to determine a general approach to the construction of statistical models for predicting the wear of such rolls.

From the review of the literature, it was established that the structure of most wear models includes technological parameters, that are most significant for a certain state, and an empirical coefficient. For the conditions of long products mill, in each of the stands, most of the parameters change within rather narrow limits due to technological deviations. Therefore, for stands mills in such conditions, it is advisable to use "local" statistical models obtained from the results of wear measurements. The structure of such models can be represented as the product of the empirical coefficient, which indirectly reflects the influence of the main technological parameters, and the friction way, as the main factor of the Archard model.

As an empirical coefficient, it is recommended to use the indicative wear intensity of the rolls, defined as the ratio of the amount of wear of the groove roll to the mass of rolled products obtained from this pass. The revealed features of the change in the wear intensity indicator are due to the processes of processing the initial surface and the formation of a certain microstructure. After the rolling of the threshold mass of rolled products, these processes are completed and the indicator of wear intensity reaches a stable value. The initial and permanent value of the wear intensity indicator, as well as the threshold value of the mass of rolled steel, are determined based on empirical data on wear and mass of rolled steel for each of the stands mill.

The proposed method of determining wear using the wear intensity indicator as an empirical coefficient that indirectly reflects the influence of all significant factors of the process provides sufficient accuracy of wear prediction and can be used to determine the costs of rolls.

Reference

- [1] Spuzic S., Strafford K.N., Subramanian C., Savage G. (1994) *Wear of Hot Rolling Mill Rolls: An Overview*. Wear. Vol. 176(2). p. 261–271. DOI: 10.1016/0043-1648(94)90155-4. URL: https://www.researchgate.net/publication/223768316_Wear_of_hot_rolling_mill_rolls_an_overview. [in English].
- [2] Andersson S., Olofsson U. (2005) *Towards a General Model for Wear Simulation*. IRG-OECD Meeting, Uppsala, Sweden. URL: <https://www.researchgate.net/publication/266521808>. [in English].

- [3] Souto N., Marchand E., Gay A., Koont Z., Legrand N. (2022) *Performance Analysis of Work-Roll Wear Models on Hot Rolling*. Key Engineering Materials. Vol. 926. pp 621-631. DOI:10.4028/p-q6v323. URL: https://www.researchgate.net/publication/362212210_Performance_Analysis_of_Work-Roll_Wear_Models_on_Hot_Rolling . [in English].
- [4] Wang X.-D., Yang Q., He A.-R., Wang R.-Z. (2007) *Comprehensive contour prediction model of work roll used in online strip shape control model during hot rolling*. Ironmaking & Steelmaking. No. 34(4). P. 303–311. DOI:10.1179/174328107X168011 . URL: Comprehensive contour prediction model of work roll used in online strip shape control model during hot rolling | Request PDF (researchgate.net). [in English].
- [5] Nikitenko E. (2014) *Effect of the Backup Rolls Wear on Hot Bands Flatness and Crown*. AIST Iron & Steel Technology. Vol. 11. P. 2005–2012. [in English].
- [6] Cao J., Liu S., Zhang J., Song P., Yan T., Zhou Y. (2011) *ASR work roll shifting strategy for schedule-free rolling in hot wide strip mills*. Journal of Materials Processing Technology. 211(11). P. 1768–1775. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2011.05.025. URL: ASR work roll shifting strategy for schedule-free rolling in hot wide strip mills | Request PDF (researchgate.net) . [in English].
- [7] Nikitenko E. (2017) *Improving the Accuracy of Predicting Work Roll Wear in the Hot Strip Mill*. AISTech. Iron & Steel Technology. P. 40–44. URL: https://www.aist.org/AIST/aist/AIST/Social_Media/17_nov_40_44_Improving_Accuracy.pdf. [in English].
- [8] Byon S.-M., Lee Y. (2007) *Experimental and Semi-analytical Study of Wear Contour of Roll Groove and Its Applications to Rod Mill*. ISIJ International. Vol. 47. No. 7. P. 1006 – 1015. DOI: 10.2355/isijinternational.47.1006 . [in English].
- [9] Liu Z., Guan Y., Wang F. (2017) *Model development of work roll wear in hot strip mill*. ACMME. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 207 (2017) 012022. DOI:10.1088/1757-899X/207/1/012022. URL: Microsoft Word - MEME-132+排版 (iop.org). [in English].
- [10] Samokhval V.M., Stasko Ye.V. (2022) *Analiz parametriv ta modeliuvannia znoshennia valkiv vysokovydkisnykh drotovykh blokiv.[Analysis of parameters and modeling of wear rolls of high-speed wire blocks]* Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky). Vypusk 1(40). С. 36 – 46. DOI: 10.31319/2519-2884.40.2022.4 . [in Ukrainian]
- [11] Shigaki Y., da Cunha M.A. (2012) *Online prediction of wear on rolls of a bar rolling mill based on semi-analytical equations and artificial neural networks*. 17th Online World Conference on Soft Computing in Industrial Applications. Desember 10–21, DOI:10.1007/978-3-319-00930-8_22. URL: (99+) Online Prediction of Wear on Rolls of a Bar Rolling Mill Based on Semi-Analytical Equations and Artificial Neural Networks | Yukio Shigaki-Academia.edu. [in English].
- [12] Yershov S.V., Heimur K.H., Kravchenko K.O., Marchenko K.K. (2016) *Doslidzhennia znosu kalibriv pry prokatuvanni katanky v umovakh serednosortno-drotovoho stanu 400/200 PAT "DMK". [Study of wear of gauges during rolling of wire rod in conditions of medium-grade wire condition 400/200 PJSC "DMK"]*. Visnyk NTU "KhPI". №31 (1203). С. 23–30. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/a56ae0d7-dd2d-44bb-b376-ea4dd74060af/content>. [in Ukrainian]
- [13] Kim D. H., Lee Y., Yoo S. J., Choo W. Y., Kim B. M. (2003) *Prediction of the wear profile of a roll groove in rod rolling using an incremental form of wear model*. Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part B: J. Engineering Manufacture. P. 111–126. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.986.8263&rep=rep1&type=pdf>. [in English].