

## ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

DOI: 10.31319/2519-2884.40.2022.4

УДК 621.771.074

**В.М. Самохвал**, к.т.н., доцент, volsamokhval@gmail.com

**Є.В. Стасько**, здобувач вищої освіти 2-го рівня

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

### АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОШЕННЯ ВАЛКІВ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ДРОТОВИХ БЛОКІВ

*Дослідження зношення валків прокатних станів зберігають актуальність через значні витрати на цей робочий інструмент та впровадження нових валкових матеріалів. Метою роботи є аналіз параметрів високошвидкісного прокатування за рівнем їх впливу на знос валків та розробка моделі зношення валків дрогового блоку. З аналізу параметрів прокатування встановлено, що класичні трибологічні параметри не виявляють суттєвого впливу на знос, а найбільш значимими параметрами є відносна швидкість, коефіцієнт видовження та параметр форми осередку. Для цих параметрів отримано регресійну модель, яка може бути використана для прогнозування стійкості валків та удосконалення технології прокатування.*

**Ключові слова:** знос; показник зношення; врізи валків; калібр; карбід вольфраміві валки, регресійна модель; дроговий блок.

*Research on the wear of rolling mill rolls remains relevant due to the significant cost of this work tool and the introduction of new rolling materials. The aim of the work is to analyze the parameters of high-speed rolling according to the level of their influence on the wear of the rolls and to develop a model of wear of the rolls of the wire block. From the analysis of rolling parameters, it was found that the classical tribological parameters do not show a significant effect on wear, and the most significant parameters are the relative speed, elongation coefficient and form parameter of cell deformation. For these parameters, a regression model is obtained, which can be used to predict the wear resistances of the rolls and improve the rolling technology.*

**Keywords:** wear; index wearing; grooves of rolls; roll pass; tungsten carbide rolls, regression model; wire block.

### Постановка проблеми

Одним з найбільш значимих наслідків тертя є зношення деталей машин в процесі їх застосування та робочого інструменту у виробничих процесах. Зокрема, в процесах прокатування, досить значну частку витрат по переділу становлять витрати на прокатні валки, як основний технологічний інструмент.

Враховуючи активну роль тертя в процесах прокатування, технологічні параметри обирають з міркувань мінімізації тертя до допустимого рівня, щоб забезпечити прийнятні та економічно обґрунтовані витрати валків, енергії та інших ресурсів. Через це, для різних типів станів, в залежності від виду прокату, вимог до його якості, особливостей технології та інших чинників, мають місце певні усталені показники зношення валків.

Для підвищення ефективності процесів прокатування здійснюють різноманітні заходи, спрямовані на збільшення зносостійкості валків. Такі заходи здійснюють за двома основними напрямками: розробка більш ефективних валкових матеріалів та підвищення зносостійкості валків в процесі їх застосування. Зрозуміло, що можливості підвищення зносостійкості валків в умовах діючих виробничих процесів та наявного обладнання є досить обмеженими. Але, з іншого боку, за цих умов існують можливості отримання даних про фактичний знос валків за певних умов, вивчення впливу технологічних параметрів на величину зносу, моделювання процесів зношення та використання таких моделей для прогнозування витрат валків і удосконалення технологічних процесів. Тому дослідження з вивчення особливостей та моделювання

зношення валків залишаються актуальними. Значимість таких досліджень зростає по мірі впровадження нових валкових матеріалів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Прикладом досліджень в умовах діючого виробництва може бути робота О.П. Чекмарьова та Р.А. Машковцева [1], де наведено дані про фактичний знос валків при виготовленні різних видів прокату. В роботі аналізується вплив на знос валків таких параметрів як температура розкатів; твердість валків; нерівномірність деформації. Тобто, розглядаються лише доступні для фіксації технологічні параметри прокатування без врахування, відомих на той час, загальних трибологічних параметрів.

За даними [2], для визначення зношення валків прокатних станів найбільш широко використовують модель абразивного зношення, запропоновану Арчардом (Archard) [3], яка в сучасних позначеннях має вид

$$V = k \cdot \frac{F \cdot L}{3 \cdot H},$$

де  $V$  — об'єм матеріалу, втрачений у наслідок зношення;  $F$  — прикладене навантаження,  $H$ ;  $k$  — константа (безрозмірний коефіцієнт зношення або безрозмірна швидкість зношення);  $L$  — відстань ковзання;  $H$  — твердість поверхні валків.

Для визначення «лінійного» зносу модель трансформовано до виду

$$w = k_l \cdot \frac{P \cdot L}{3 \cdot H},$$

де  $w$  — загальна «глибина» зношення;  $k_l$  — константа, що залежить від хімічного складу валка і матеріалу, що прокатується, та умов на контакт;  $P$  — тиск по контактній поверхні.

Якщо коефіцієнт зношення та твердість валків не змінюються в процесі прокатування, то залежність може бути представлена у вигляді

$$w = k_c \cdot \int_0^T \sigma_n \cdot \Delta v \cdot dt,$$

або у спрощеному вигляді

$$w = \frac{k_c}{H} \cdot (\sigma_n \cdot \Delta v) \cdot \Delta t,$$

де  $\sigma_n$  — нормальні напруження по осередку деформації;  $\Delta v$  — швидкість ковзання між валком і розкатом;  $T$  — загальний час прокатування;  $\Delta t$  — інтервал часу.

Тобто, головними факторами, які визначають величину зношення, за даними [2], є тиск на контактній поверхні, швидкість ковзання та твердість матеріалу валків.

Модель Арчарда використана і в дослідженнях Байона (Byon) та Лі (Lee) [4], де знос врізів валків для овальних та круглих калібрів визначають через ваговий коефіцієнт

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

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.

У 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 становлять: для овальних калібрів  $19,6 \cdot 10^{-12}$ ; для круглих калібрів  $35,9 \cdot 10^{-12}$ .

У роботі [5], також за основу використано модель Арчарда, але залежність для визначення глибини зносу запропоновано у вигляді

$$h^w = \int k_D \cdot p \cdot ds,$$

де  $k_D$  — розмірна швидкість зношення, яка замінює відношення  $k/H$ , ( $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ );  $p$  — тиск на контактній поверхні, МПа;  $s$  — відстань ковзання (загальний шлях тертя), м.

Експериментальні значення швидкості зношення  $k_D$  отримано у межах  $(7,23 \cdot 10^{-7} \div 1,23 \cdot 10^{-6}) \text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ .

З наведених залежностей для визначення зносу, видно, що навіть одна й та ж модель абразивного зношення Арчарда може бути представлена через різні величини і з різним поєднанням параметрів. Але таке зношення є лише одним з можливих механізмів зношення. З загальноприйнятої класифікації видів зношення, наведеної в стандарті [6], для робочого інструменту в процесах гарячого прокатування виділяють, як найбільш значимі, такі [7]:

- термічна та механічна втомлюваність;
- абразивне;
- адгезійне;
- корозія.

Термічна втомлюваність характерна для станів гарячого прокатування. Вона проявляється як формування «сітки розгару» на поверхні врізів валків, що утворюють калібр. Механічна втомлюваність спостерігається при холодному прокатуванні і призводить до виникнення і поступовому збільшенні тріщин під робочою поверхнею, що призводить до відколювання уламків.

Отже, для високошвидкісних станів гарячого прокатування спостерігається дія переважно чотирьох механізмів зношення: термічна втомлюваність, абразивне, адгезійне та корозія. В залежності від особливостей обладнання та технології для різних станів можливе домінування одного або кількох з вказаних механізмів зношення.

При цьому, як зазначається в огляді [8] з посиланням на висновки Ліма (Lim) та Ешбі (Ashby) [9], для кожного з перелічених головних механізмів швидкість зношення ( $\text{мм}^3/\text{м}$ ) може бути визначена через такі параметри як нормальне навантаження  $F$ , Н; швидкість ковзання  $v$ , м/с; початкова температура  $T$ , °С; властивості матеріалу  $M$ , МПа. Кожен з цих параметрів може бути приблизно визначений через притаманний йому вектор компонент (змінних). Але визначальними параметрами, згідно карти переходів режимів зношування [9], залишаються навантаження (сила або тиск) та швидкість ковзання. Вплив інших параметрів, в залежності від особливостей процесу, може враховуватись через окремі складові або через коефіцієнт швидкості зношування. Окремі складові включають до залежностей у випадках, коли діапазон зміни параметру призводить до суттєвої зміни величини зносу. Якщо ж у всьому можливому діапазоні зміни параметру його вплив залишається на однаковому рівні, такий параметр враховують через коефіцієнт швидкості зношування.

Використання такого підходу призводить до побудови різноманітних моделей «від спрощених загальних рівнянь зносу до «вичерпних» формул для особливих випадків гарячого зносу валкових матеріалів» [8, с. 268], в яких враховуються найбільш значимі параметри для певного процесу.

Наприклад, для валків станів гарячого прокатування відома модель зношення Магні (Magnee) [10], яка містить три основні складові

$$w = A \cdot D^2 (\Delta v) \cdot \left[ \frac{W}{W_c} - 1 \right],$$

де  $w$  — показник зношення,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;  $A$  — постійний коефіцієнт, що відображає матеріал валків;  $D^2 (\Delta v)$  — квадратична функція швидкості, що відповідає кінетичній енергії процесу;  $W/W_c$  — відносна енергія процесу (відношення енергії напружень в матеріалі валків від сил тертя до критичної енергії, що ініціює знос).

Тобто, модель Магні враховує вплив матеріалу валків, швидкості ковзання та технологічних параметрів (властивості матеріалу, що прокатують, навантаження, температура).

Відомі також моделі, що містять звичайні технологічні параметри процесу прокатування. Наприклад, в роботі [11] запропоновано уточнення вихідної моделі для визначення зношення робочих валків станів плоского прокату, яка відома у вигляді

$$W = k_{w_r} \cdot \frac{F}{B} \cdot \frac{h_0}{h_1} \cdot \frac{L_0}{\pi \cdot D} \cdot [1 - k_s(29,0 - D)],$$

де  $k_{w_r}$  — коефіцієнт швидкості зношування, для умов конкретного стану;  $F$  — сила прокатування;  $B$  — ширина розкату;  $h_0$ ,  $h_1$  — товщина розкату на вході та виході з осередку деформації, відповідно;  $L_0$  — довжина розкату на вході у осередок;  $D$  — діаметр валків;  $k_s$  — коефіцієнт, що характеризує умови прокатування на стані і визначається емпірично.

Запропоноване уточнення моделі зводиться до врахування часу контактування валків з поверхнею розкату у межах осередку деформації та твердості валків в залежності від температури їх поверхні.

Для проходів з невисокою швидкістю прокатування, коли час проходження розкату через осередок деформації порівняно значний, уточнена модель має вид

$$W = k_{w_r} \cdot \frac{F}{B} \cdot \frac{h_0}{h_1} \cdot \frac{L_0}{\pi \cdot D \cdot HB_T} \cdot \ln(k_r \cdot \tau),$$

Для клітей з високою швидкістю прокатування, коли  $\ln(k_r \cdot \tau) \leq 1,0$ , останній множник приймають рівним одиниці, тобто модель має вид

$$W = k_{w_r} \cdot \frac{F}{B} \cdot \frac{h_0}{h_1} \cdot \frac{L_0}{\pi \cdot D \cdot HB_T},$$

де  $HB_T$  — твердість поверхні валків з врахуванням її температури;  $k_r$  — емпіричний коефіцієнт, який відображає міру впливу часу контактування;  $\tau$  — час контактування точки на поверхні валків з поверхнею розкату при проходженні через осередок деформації.

Відзначається, що точність визначення зносу валків була покращена на 35—50 % за результатами прокатування понад 250 слябів.

Остання з розглянутих залежностей містить, як загальноприйняті «трибологічні» величини (навантаження, твердість), так і суто технологічні параметри (ступінь деформації, число контактів валків з розкатою по його довжині).

Наведені залежності забезпечують визначення показників зношення з різними розмірностями. Класична модель Арчарда [2] визначає знос в одиницях об'єму втраченого матеріалу до шляху тертя ( $\text{мм}^3/\text{м}$ ). Відомі також показники з лінійними розмірностями:  $\text{мм}/\text{м}$  [3];  $\text{мм}$  [5]; або одиницями маси:  $\text{г}/\text{т}$  [12];  $\text{кг}/\text{т}$  [13]. У виробничих умовах більшого поширення набули комбіновані показники, такі як  $\text{т}/\text{мм}$ , що відображає масу продукції та лінійний знос робочого інструменту. В огляді [8] зазначається: «Валки з врізами для утворення калібрів мають зносостійкість близько кількох сотень тон на міліметр зносу по діаметру, тоді як типові валки станів плоского прокату мають «живучість» (стійкість) близько 5 000—20 000  $\text{т}/\text{мм}$ . Такий розбіг значень показників зношення унеможливує об'єктивне порівняння характеристик валків». Тому пропонується використовувати показники, визначені як «відношення радіального зазору ( $\text{мм}$ ) до шляху ковзання ( $\text{м}$ )». Для однотипної продукції більш прийнятним є використання показників з розмірностями ( $\text{т}/\text{мм}$ ) або ( $\text{мм}/\text{т}$ ).

Таким чином, з аналізу наведених публікацій слідує, що для прогнозування зносу валків при гарячому прокатуванні використовується, як різновиди узагальненої моделі Арчарда, так і окремі моделі для певних умов. Очевидно, що окремі емпіричні моделі, не претендуючи на теоретичні узагальнення, забезпечують більшу точність визначення зносу і дозволяють визначити спрямованість заходів з зменшення зносу. Особливо актуальні такі роботи для нових валкових матеріалів.

Одним з таких напрямків досліджень є отримання моделей для прогнозування зносу валків з твердих сплавів.

#### Формулювання мети досліджень

Метою даної роботи є аналіз параметрів високошвидкісного прокатування за рівнем їх впливу на знос валків та розробка моделі зношення валків блоку на основі даних фактичного зносу кількох комплектів валків.

Для аналізу використано результати вимірювань зносу чотирьох комплектів валків, які були виконані оптичним методом та розрахункові параметри прокатування за звичайною технологією. Виконано кореляційний аналіз, з використанням показника інтенсивності зношення, як відношення максимального зносу до кількості прокатуваного в калібрі металу. Для побудови регресійної моделі було обрано лінійну залежність.

#### Виклад основного матеріалу

Для аналізу співвідношення показників зношення та параметрів прокатування використали виробничі дані, накопичені в процесі роботи дрогового блоку 210 при виготовленні катанки діаметром 5,5 мм з маловуглецевих марок сталі. Блок складається з десяти однотипних модулів з консольним розташуванням валків. Привід валків — груповий, через циліндричний мультиплікатор, конічні шестерні та циліндричні редуктори. Валки перших п'яти модулів мають твердосплавні шайби шириною 72 мм, інші — 60 мм. На шайбах модулів від М1 до М7, які умовно вважаються чорновими, розміщено по два калібри. На шайбах модулів М8 — М10 розміщено по чотири калібри.

Шайби валків блоку виготовлено з твердого сплаву марки С20С, за класифікацією SANDVIK. Хімічний склад валків: WC — 80 %; Со — 9 %; Ni — 9 %; Cr — 2 %. Фізичні властивості: розмір часток карбіду вольфраму — 4 мкм; густина — 13,5 г/см<sup>3</sup>; твердість HRA 83,5; HV<sub>30</sub> 800; границя міцності на стиснення — 3200 МПа; міцність на вигин (TRS) — 2700 МПа [14].

Знос врізів валків високошвидкісного дрогового блоку визначали оптичним методом, який детально описано в роботі [15]. Цей метод дозволяє визначати знос валків по всьому периметру, але для аналізу використали максимальну величину зносу для кожного з врізів, що утворюють калібр. Всього виконано вимірювання зносу чотирьох комплектів валків. При цьому фіксували більше з значень зносу, незалежно від розміщення врізу у валках (вріз верхнього або нижнього валків, що утворюють калібр). Для чорнових модулів використали дані зносу для обох калібрів, а для чистових модулів — лише по калібрам № 1 та №3. Отримані результати вимірів зносу, за однотипних технологічних параметрів [13], наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Результати вимірів максимального зносу валків дрогового блоку

Комп-лект валків	Чорнові модулі									Чистові модулі				
	№ кал.	Прока-тано, т	1	2	3	4	5	6	7	№ кал.	Прока-тано, т	8	9	10
4-09	1	2739	0,4	0,15	0,19	0,34	0,54	0,2	0,41	1	1206	0,19	0,28	0,13
	2	1893	0,36	0,15	0,21	0,22	0,34	0,24	0,43	3	1177	0,12	0,25	0,09
6-09	1	2756	0,29	0,22	0,24	0,46	0,62	0,18	0,34	1	1350	0,18	0,19	0,11
	2	2690	0,36	0,24	0,23	0,53	0,61	0,14	0,32	3	1352	0,13	0,18	0,09
7-09	1	2424	0,37	0,19	0,18	0,37	0,43	0,15	0,27	1	1297	0,17	0,23	0,14
	2	2404	0,43	0,17	0,26	0,37	0,45	0,19	0,29	3	1250	0,1	0,35	0,17
6-06	1	2682	0,32	0,28	0,53	0,11	0,27	0,14	0,28	1	1258	0,12	0,13	0,13
	2	2817	0,36	0,3	0,44	0,14	0,32	0,13	0,34	3	1372	0,12	0,13	0,11

В якості показника зношення використовували інтенсивність зношення, який визначали як частку від ділення максимального зносу на масу прокатуваного в калібрі металу. Розмірність цього показника визначали в мкм/т.

Значення інтенсивності зношення по калібрам блоку наведено в табл. 2.

З даних табл. 2 можна відзначити, що для овальних калібрів спостерігаються значно більші середні показники зношення ніж для круглих калібрів. Крім цього, показники зношення чорнових і чистових калібрів отримано приблизно одного порядку, незважаючи на майже двократну різницю в кількості прокатуваного профілю.

Таблиця 2. Показники інтенсивності зносу (мкм/т) для валків дрогового блоку

Комп-лект валків	Чорнові модулі								Чистові модулі			
	№ кал.	1	2	3	4	5	6	7	№ кал.	8	9	10
4-09	1	0,146	0,055	0,069	0,124	0,197	0,073	0,15	1	0,158	0,232	0,108
	2	0,190	0,079	0,111	0,116	0,180	0,127	0,227	3	0,102	0,212	0,076
6-09	1	0,105	0,080	0,087	0,167	0,225	0,065	0,123	1	0,133	0,141	0,081
	2	0,134	0,089	0,086	0,197	0,227	0,052	0,119	3	0,096	0,133	0,067
7-09	1	0,153	0,078	0,074	0,153	0,177	0,062	0,111	1	0,131	0,177	0,108
	2	0,179	0,071	0,108	0,154	0,187	0,079	0,121	3	0,080	0,280	0,136
6-06	1	0,119	0,104	0,198	0,041	0,101	0,052	0,104	1	0,077	0,073	0,077
	2	0,128	0,106	0,156	0,050	0,114	0,046	0,121	3	0,095	0,095	0,079
Середнє		0,144	0,083	0,111	0,125	0,176	0,069	0,135		0,110	0,168	0,092

Рівень впливу параметрів прокатування на показник зношення оцінювали за коефіцієнтом кореляції. Як видно з табл. 3, загальноприйняті трибологічні параметри прокатування, такі як швидкість ковзання  $V_s$  (м/с) та середній тиск по осередку деформації  $p_m$  (МПа), досить слабо корелюють з інтенсивністю зношення  $I_w$  (мкм/т) — коефіцієнти кореляції 0,065 та 0,252, відповідно. Показники твердості валків однакові для всіх валків блоку, тому цей параметр, як один з основних за моделлю Арчарда, нема можливості дослідити.

Таблиця 3. Параметри прокатування катанки 5,5 мм та їх кореляція з показником зношення

№ мод.	Іnten.	Шв.п	Шв.д.	Шв.к.	Темп.	Тиск	Видов.	П. ф.	Час	Число	Заг.ч.	Відн.
	$I_w$	$V_1$	$U$	$V_s$	$T$	$p_m$	$\lambda$	$ld/hm$	$\tau_{cc}$	$N_c$	$\tau_s$	$\Delta V/V_r$
1	0,1442	13,0	200,9	0,82	947	371,2	1,2924	1,80	1,97	2,59	5,09	0,2369
2	0,0829	16,1	233,6	0,82	954	371,8	1,2202	1,55	1,69	3,22	5,45	0,1863
3	0,1111	20,1	353,1	1,11	962	390,2	1,2585	1,92	1,11	3,95	4,37	0,2151
4	0,1252	25,2	408,6	1,43	970	376,0	1,2544	1,74	0,95	5,04	4,80	0,2109
5	0,1759	32,0	647,0	1,85	978	386,7	1,2819	2,47	0,68	6,31	4,30	0,2324
6	0,0696	40,4	749,2	2,20	987	375,7	1,2425	2,10	0,61	7,95	4,82	0,2026
7	0,1345	50,4	1132,7	2,77	995	372,9	1,2687	2,22	0,33	9,91	3,27	0,2239
8	0,1090	63,8	1319,1	3,50	1002	365,5	1,2676	2,09	0,27	12,70	3,48	0,2232
9	0,1680	80,6	2042,1	4,26	1010	366,9	1,2556	2,76	0,20	15,72	3,10	0,2146
10	0,0915	99,5	2277,7	4,54	1016	353,6	1,2266	2,46	0,17	19,46	3,38	0,1951
Коеф. кореляції		-0,004	0,074	0,065	0,027	0,252	<b>0,720</b>	<b>0,474</b>	-0,079	-0,007	-0,314	<b>0,742</b>

Через це виникла потреба пошуку інших параметрів прокатування, які визначають інтенсивність зношення врізів валків. Для цього скористались переліком параметрів прокатування, який наведено в огляді [8] у вигляді діаграми. Використовуючи цю діаграму, склали перелік за узагальненими групами параметрів:

## 1. технологічні:

- тиск в осередку деформації або сила прокатування;
- швидкість ковзання в осередку;
- дистанція ковзання (загальна довжина прокату, який пройшов через калібр);
- геометрія валків (параметр форми осередку деформації, форма врізів, що утворюють калібр);
- температурний режим (температура розкату);
- деформаційні параметри (видовження, ступінь деформації або ін.);

## 2. конструктивні:

- матеріал валків (показники твердості);
- стан поверхні валків;
- система охолодження валків (температура поверхні валків);

## 3. матеріал прокату.

За отриманими даними, температура розкатів по модулям блоку  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), так само як і швидкість прокатування  $V1$  (м/с) та швидкість деформації  $U$  ( $\text{с}^{-1}$ ), не виявляють впливу на показник зношення — коефіцієнти кореляції для них менше 0,1.

З наведеного переліку параметрів найбільш значимими виявились: деформаційний, у вигляді коефіцієнта видовження  $\lambda$ ; геометричний, у вигляді параметра форми осередку  $ld/hm$ . Для них коефіцієнти кореляції становлять, відповідно, 0,720 та 0,474.

Крім цих параметрів прокатування, за аналогією з складовими залежностей, що розглядаються в роботі [11], проаналізували вплив параметрів, що характеризують тривалість контакту валків з розкатом:

- тривалість проходження через осередок деформації, як відношення довжини осередку до швидкості прокатування  $\tau_{cc}$  (мм·с/м);
- кількість контактів точки на поверхні валка з розкатом по всій його довжині  $N_c$  (м/мм), як відношення довжини розкату, для відповідного калібру, на довжину периметру валка;
- загальний час контактування точки на поверхні валка з розкатом  $\tau_s$  (с), як добуток  $\tau_{cc}$  та  $N_c$ .

За даними табл. 3 час проходження через осередок деформації  $\tau_{cc}$  та число контактів валків з металом по довжині розкату  $N_c$  не проявляють впливу на показник зношення — коефіцієнти кореляції менше 0,1. Загальний час контактування валків з розкатом  $\tau_s$  справляє значно більший вплив, але недостатній для прийняття його як значимого параметру.

Для врахування впливу кінематичних параметрів прокатування на зношення розроблено окремий показник — відносну швидкість, як відношення різниці швидкостей на вході та виході з осередку деформації до лінійної швидкості поверхні валків

$$\frac{\Delta V}{V_r} = \frac{V1 - V0}{V_r} = \frac{V_r(1 + S) - V1/\lambda}{V_r} = (1 + S) \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right),$$

де  $S$  — випередження в осередку деформації.

Цей параметр прокатування виявився найбільш значимим з усіх розглянутих — коефіцієнт кореляції становить 0,742.

Таким чином, з аналізу впливу параметрів прокатування на показник зношення встановлено, що найбільш значимими параметрами є:

- кінематичний  $\Delta V/V_r$ ;
- деформаційний  $\lambda$ ;
- геометричний  $ld/hm$ .

Для цих параметрів, на основі усереднених даних інтенсивності зношення валків модулів блоку, з використанням засобів Excel [16], отримано регресійну модель для визначення показника зношення

$$I_w = -3,936 - 3,969 \cdot \left(\frac{\Delta V}{V_r}\right) + 3,818 \cdot (\lambda) + 0,051 \left(\frac{ld}{hm}\right).$$

Модель адекватно відображає вплив прийнятих параметрів на функцію відгуку — розрахунковий критерій Фішера дорівнює 4,4 за критичного значення 0,058. Коефіцієнт множинної кореляції для цієї моделі становить 0,829, середня відносна похибка становить 15%. Порівняння усереднених показників зношення по модулям блоку з розрахованими з використанням моделі показано на рис. 1 та 2. Такий рівень точності моделі є цілком прийнятним для виробничих умов, так як похибки моделі не перевищують розкид вихідних показників зношення (табл. 2).

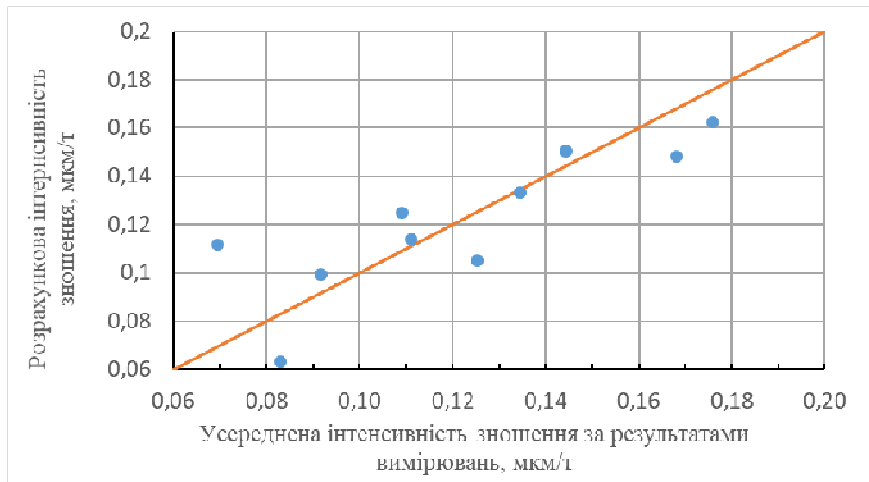


Рис. 1. Порівняння вихідних та розрахункових значень показника зношення

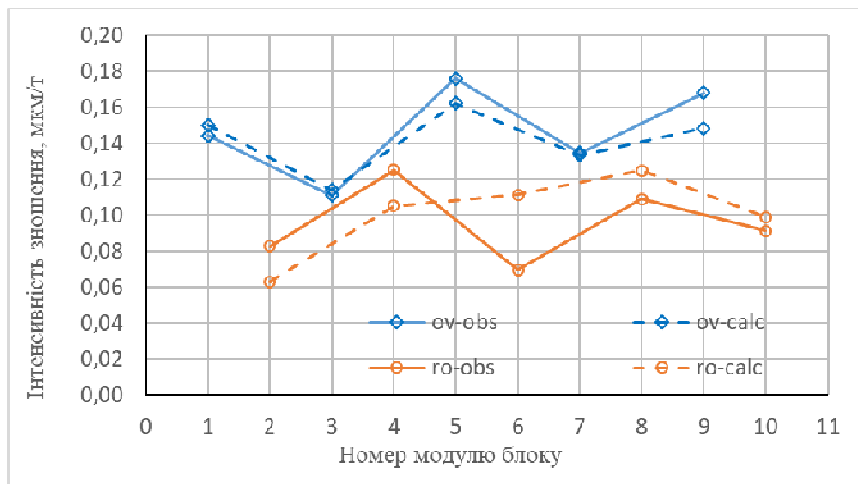


Рис. 2. Порівняння показників зношення для овальних та круглих калібрів блоку

Отримана модель дозволяє визначати показники зношення для кожного з модулів дрогового блоку та прогнозувати стійкість калібрів або витрату валків. Також модель може використовуватись для коригування технологічних параметрів з метою забезпечення більш рівномірного зношення по модулям блоку.

Використовуючи максимальні значення показників зношення для чорнових та чистових модулів з табл. 2, можемо прогнозувати стійкість калібрів блоку. Наприклад, якщо показник зношення в чорнових калібрах становить 0,176 мкм/т, то при допустимому зносі у 0,5 мм стійкість комплекту валків становитиме  $0,5/0,000176=2273$  т. Для чистових калібрів, за показника зношення 0,168 мкм/т і допустимого зносу 0,2 мм, стійкість становитиме  $1190 \approx 1200$  т. Отримані значення відповідають показникам існуючої технології.

Також, згідно отриманої моделі, перерозподіл коефіцієнтів видовження між овальними та круглими калібрами може забезпечити приблизно однакові показники зношення цих калібрів. За існуючою технологією показник зношення овальних калібрів становить 0,14 мкм/т, а для круглих приблизно 0,10 мкм/т. Зменшуючи видовження в овальних калібрах і пропорційно збільшуючи його в круглих, можна досягти більш рівномірного розподілу показників зношення і, за рахунок цього, зменшити максимальні показники зношення і збільшити стійкість калібрів або зменшити величину знімання металу при переточуванні валків.



### Висновки

З аналізу показника зношення та параметрів прокатування в високошвидкісному дрогому блоці встановлено, що загальновідомі трибологічні параметри прокатування змінюються по модулям блоку у досить вузькому діапазоні, що не дозволяє виявити їх вплив на зношення. Тобто, вплив цих параметрів є приблизно однаковий для всіх модулів блоку, тому статистично не підтверджується.

Для врахування кінематичних умов в осередках деформації по модулям блоку замість швидкості ковзання запропоновано параметр відносної швидкості, як відношення різниці швидкостей на вході та виході з осередку до лінійної швидкості поверхні валків.

З кореляційного аналізу виявлено найбільш значимі параметри прокатування за впливом на показник зношення. Такими параметрами є відносна швидкість по осередку, коефіцієнт видовження та параметр форми осередку.

Для виявлених значимих параметрів прокатування, за результатами вимірів зносу чотирьох комплектів валків, отримано регресійну модель для визначення показника зношення. Модель підтверджує адекватність та забезпечує прийнятний рівень точності визначення показника зношення валків блоку.

Отримана регресійна модель може застосовуватись для визначення стійкості калібрів блоку та прогнозування витрат валків, а також для коригування технологічних параметрів з метою зменшення зношення та витрати валків.

### Список використаної літератури

1. Чекмарев А.П., Машковцев Р. А. Износ прокатных валков. Харьков: Metallurgizdat. 1955. 148 с.
2. 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>
3. Archard J.F. Contacts and rubbing of flat surface. *J. Appl. Phys.*, 1953, 24, p. 981.
4. Byon S-M., Lee Y. Experimental and Semi-analytical Study of Wear Contour of Roll Groove and Its Application to Rod Mill. *ISIJ International*. Vol. 47 (2007), No 7. pp. 1006-1015. DOI:10.2355/isijinternational.47.1006. URL: <https://www.researchgate.net/publication/240796575>
5. Shen X., Cao L., Li R. Numerical Simulation of Sliding Wear Based on Archard Model. International Conference: Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), Wuhan. China. 26 – 28 June 2010. DOI:10.1109/MACE.2010.5535855 .
6. ДСТУ 2823-94 Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення. Чинний від 01.01.1996. – Київ. Держспоживстандарт. 2011. 33 с.
7. Wang B. A simulation of roll wear in hot rolling process. Master of Engineering (Hons.) thesis. Department of Mechanical Engineering. University of Wollongong. 1996. URL: <https://ro.uow.edu.au/theses/2508/>
8. Spuzic S., Strafford K. N., Subramanian C., Savage G. Wear of hot rolling mill rolls: an overview. *Wear*. 1994. Vol. 176. 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](https://www.researchgate.net/publication/223768316_Wear_of_hot_rolling_mill_rolls_an_overview)
9. Lim S.C., Ashby M.F., Brunton J.H. Wear-rate transitions and their relationship to wear mechanisms. *Acta Metallurgica*. Vol. 35(6). 1987. pp. 1343-1348. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(87\)90016-2](https://doi.org/10.1016/0001-6160(87)90016-2). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0001616087900162>
10. Magnee A., Gaspard C., Gabriel M. Wear Behaviour of Steels for Hot Working Rolling Mill”, CRM No. 57, 1980, pp. 25-39.
11. Nikitenko E. Improving the Accuracy of Predicting Work Roll Wear in the Hot Strip Mill. Iron & Steel Technology Conference and Exposition, Nashville, Tenn., USA., Nov. 2017. P 40 – 44. URL: [https://www.aist.org/AIST/aist/AIST/Social\\_Media/17\\_nov\\_40\\_44\\_Improving\\_Accuracy.pdf](https://www.aist.org/AIST/aist/AIST/Social_Media/17_nov_40_44_Improving_Accuracy.pdf)

12. Pellizzari M., Molinari A., Straffelin G. Tribological behaviour of hot rolling rolls. *Wear*. 259 (2005). P. 1281 – 1289.
13. Зайцев В.С. Основы технологического проектирования прокатных цехов [Учебник для вузов]. М.: Металлургия, 1987. 336 с.
14. Sandvik C20C Cemented Carbide for hot rolling applications. URL: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=538aee2aeb854e6fbc751bf3dc0dd499>
15. Максименко О.П., Оробцев Ю.А., Самохвал В.М., Штода М.Н., Марченко К.К. Методика исследования и анализ износа калибров валков проволочного блока. *Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА. 2019. 1 (48). С. 157-162. URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/omd/omd\\_1\(48\)\\_2019/article/25.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_1(48)_2019/article/25.pdf)
16. Carlberg C. Regression Analysis Microsoft Excel. Que Publishing. 2016. 368 p.

## ANALYSIS OF PARAMETERS AND MODELING OF WEAR ROLLS OF HIGH-SPEED WIRE BLOCKS

Samokhval V., Stasko Ye.

### Abstract

Research on the study of features and modeling of wear of rolls remains relevant, due to the need to predict the stability of rolls and determine their costs. The importance of such research increases with the introduction of new roll materials, in particular tungsten carbide alloys.

The processes of hot rolling are characterized by the simultaneous action of several main mechanisms of wear. Various models for predicting wear are known for these mechanisms, but under current conditions there is a need to develop local models that take into account the peculiarities of technology. Such conditions include high-speed wire blocks.

The aim of this work is to analyze the parameters of high-speed rolling according to the level of their impact on the wear of the rolls and to develop a model of wear of the rolls of the unit based on the actual wear of several sets of rolls. For the analysis the results of measurements of wear of four sets of rolls which were executed by an optical method and calculated parameters of rolling on usual technology are used. Correlation analysis was performed, using the indicator of wear intensity, as the ratio of maximum wear to the amount of rolled metal in the caliber. A linear dependence was chosen to build the regression model.

According to the results of the analysis of the wear rate and rolling parameters in the high-speed wire block, it is established that the well-known tribological rolling parameters vary according to the block modules in a rather narrow range, which does not reveal their effect on wear. That is, the effect of these parameters is approximately the same for all modules of the unit, so it is not statistically confirmed.

The correlation analysis revealed the most significant parameters of rolling by the effect on the wear rate, namely the relative velocity of the cell, the elongation coefficient and the cell shape parameter. For these parameters, a regression model was obtained to determine the wear rate. The model confirms the adequacy and provides an acceptable level of accuracy in determining the wear of the rolls of the block.

The obtained regression model can be used to determine the durability grooves rolls of the block and predict the expense of rolls, as well as to adjust the technological parameters to reduce wear and expense of rolls.

### References

- [1] Chekmarev A.P., Mashkovtsev R. A. (1955) *Yznos prokatnykh valkov [Wear of rolling rolls]*. Kharkov : Metallurhyzdat. 148 p. [in Russian].
- [2] 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>
- [3] Archard J.F. (1953) Contacts and rubbing of flat surface. *J. Appl. Phys.* 24. p. 981.
- [4] Byon S-M., Lee Y. (2007) Experimental and Semi-analytical Study of Wear Contour of Roll Groove and Its Application to Rod Mill. *ISIJ International*. Vol. 47. № 7. P.1006–1015. DOI:10.2355/isijinternational.47.1006. URL: <https://www.researchgate.net/publication/240796575>
- [5] Shen X., Cao L., Li R. (2010) Numerical Simulation of Sliding Wear Based on Archard Model. International Conference: Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), Wuhan. China. 26 – 28 June. DOI:10.1109/MACE.2010.5535855 .
- [6] DSTU 2823-94 *Znosostiikist vyrobiv. Tertia, znoshuvannia ta mashchennia. Terminy ta vyznachennia [Wear resistance products. Friction, wear and lubrication. Terms and Definitions]*. Valid from 01.01.1996. – Kyiv. Derzhspozhyvstandart. 2011. 33 p. [in Ukrainian]
- [7] Wang B. (1996) A simulation of roll wear in hot rolling process. Master of Engineering (Hons.) thesis. Department of Mechanical Engineering. University of Wollongong. URL: <https://ro.uow.edu.au/theses/2508/>
- [8] Spuzic S., Strafford K. N., Subramanian C., Savage G. (1994) Wear of hot rolling mill rolls: an overview. *Wear*. Vol. 176. 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](https://www.researchgate.net/publication/223768316_Wear_of_hot_rolling_mill_rolls_an_overview)
- [9] Lim S.C., Ashby M.F., Brunton J.H. (1987) Wear-rate transitions and their relationship to wear mechanisms. *Acta Metallurgica*. Vol. 35(6). P.1343–1348. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(87\)90016-2](https://doi.org/10.1016/0001-6160(87)90016-2). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0001616087900162>
- [10] Magnee A., Gaspard C., Gabriel M. (1980) Wear Behaviour of Steels for Hot Working Rolling Mill, CRM No. 57, P. 25–39.
- [11] Nikitenko E. Improving the Accuracy of Predicting Work Roll Wear in the Hot Strip Mill. Iron & Steel Technology Conference and Exposition, Nashville, Tenn., USA,. Nov. P. 40–44. URL [https://www.aist.org/AIST/aist/AIST/Social\\_Media/17\\_nov\\_40\\_44\\_Improving\\_Accuracy.pdf](https://www.aist.org/AIST/aist/AIST/Social_Media/17_nov_40_44_Improving_Accuracy.pdf)
- [12] Pellizzari M., Molinari A., Straffelin G. (2005) Tribological behaviour of hot rolling rolls. *Wear*. 259. P. 1281–1289.
- [13] Zaitsev V.S. (1987) *Osnovy tekhnolohycheskoho proektyrovanyia prokatnykh tsekhov: Uchebnyk dlia vuzov [Basics of technological design of rolling shops: Handbook]*. M.: Metallurhyia,. 336 c. [in Russian].
- [14] Sandvik C20C Cemented Carbide for hot rolling applications. URL: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=538aee2aeb854e6fbc751bf3dc0dd499>
- [15] Maksymenko O.P., Orobtssev Yu.A., Samokhval V.M., Shtoda M.N., Marchenko K.K. (2019) *Metodyka yssledovanyia y analiz yznosa kalybrov valkov provolochnoho bloka [Research technique and analysis of the wear of the gauge of the rolls of the wire block]*. Materials working by pressure: Collection of science papers. Kramatorsk: DSEA. 1 (48). P. 157–162. URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/omd/omd\\_1\(48\)\\_2019/article/25.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_1(48)_2019/article/25.pdf). [in Russian].
- [16] Carlberg C. (2016) Regression Analysis Microsoft Excel. Que Publishing. 368 p.