**УДК 621.771.23:620.179:621.89:519.876**
**DOI https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-16**

# ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПЕРЕНЕСЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПРОКАТЦІ З УРАХУВАННЯМ ВІДНОСНОГО НАПРАЦЮВАННЯ РОБОЧИХ ВАЛКІВ ТА ВПЛИВУ РІЗНИХ ПРОКАТНИХ ЕМУЛЬСІЙ

**Спічак Олександр Юрійович,**
аспірант кафедри металургії та інноваційних технологій
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»;
начальник відділу холодного прокату технічного управління
Публічного акціонерного товариства «Запорізький металургійний комбінат «Запоріжсталь»
ORCID ID: 0009-0004-9653-437X

*У статті розглядається актуальна проблема кількісного оцінювання формування мікрорельєфу поверхні сталевих штаб у процесі холодної прокатки на безперервних тандем-станах. Встановлено, що ключовими чинниками, які визначають шорсткість готового прокату, є стан поверхні робочих валків останньої кліті та трибологічні умови, що задаються типом прокатної емульсії. Оскільки експериментальний контроль проміжної шорсткості в промислових умовах є обмеженим, авторами запропоновано універсальний підхід до оцінювання коефіцієнта перенесення (відбиття) шорсткості $K_{print}$. Методологія дослідження ґрунтується на введенні параметра відносного напрацювання валків L, що дозволяє уніфікувати дані для кампаній різної тривалості. Проведено порівняльний аналіз п'яти типів прокатних емульсолів: базового «Універсал-1ТС-М» та чотирьох імпортних аналогів (Lubro, Quakerol, Rollub, Trenoil). Для базового процесу побудовано еталонні лінійні залежності зносу валків та зміни шорсткості штаби. Наукова новизна роботи полягає у визначенні $K_{print}$ не як статичної величини, а як динамічної функції відносного ресурсу валків. Порівняно три методи розрахунку: середньоарифметичний, інтегральний миттєвий та відношення інтегралів функцій («енергетична» міра). Результати показали, що інтегральні методи забезпечують більш згладжену оцінку, нівелюючи локальні неоднорідності, хоча й дають значення на 15–30% нижчі за дискретні заміри. Ранжування емульсолів за здатністю до перенесення шорсткості виявилося ідентичним для всіх методів, що підтверджує надійність запропонованих моделей. Отримані функціональні залежності можуть бути інтегровані в математичні моделі формування мастильної плівки для оптимізації режимів прокатки та покращення якості поверхні металу.*

***Ключові слова:*** *холодна прокатка, тандем-стан, шорсткість поверхні, робочі валки, прокатна емульсія, коефіцієнт перенесення шорсткості, відносне напрацювання валків, мікрорельєф.*

***Spichak Oleksandr. Determination of the roughness imprint coefficient in cold rolling with consideration of the relative work roll service life and the influence of different rolling emulsions***

*This article examines the topical issue of quantitatively assessing the formation of the surface micro-relief of steel strip during cold rolling on continuous tandem mills. It has been established that the key factors determining the roughness of the finished rolled product are the surface condition of the work rolls in the final stand and the tribological conditions determined by the type of rolling emulsion. Since experimental control of intermediate roughness under industrial conditions is limited, the authors propose a universal approach to assessing the roughness imprint coefficient $K_{print}$. The research methodology is based on the introduction of the relative roll operating time parameter L, which allows data to be standardised across campaigns of varying durations. A comparative analysis was carried out of five types of rolling emulsions: the base 'Universal-1TS-M' and four imported equivalents (Lubro, Quakerol, Rollub, Trenoil). For the base process, reference linear relationships were established between roll wear and changes in strip roughness. The scientific novelty of the work lies in defining $K_{print}$ not as a static quantity, but as a dynamic function of the relative service life of the rolls. Three calculation methods were compared: the arithmetic mean, the instantaneous integral, and the ratio of integrals of functions ('energy' measure). The results showed that integral methods provide a smoother estimate, levelling out local inhomogeneities, although they yield values 15–30% lower than discrete measurements. The ranking of emulsions by their ability to imprint roughness proved to be identical for all methods, confirming the reliability of the proposed models. The obtained functional dependencies can be integrated into mathematical models of lubricant film formation to optimise rolling conditions and improve metal surface quality.*

***Key words:*** *cold rolling, tandem mill, surface roughness, work rolls, rolling emulsion, roughness transfer coefficient, relative roll wear, micro-relief.*

**Вступ.** У процесі холодної прокатки на безперервному чотириклітьовому тандем-стані шорсткість поверхні штаби визначається мікрорельєфом робочих валків, умовами тертя в осередку деформації [1–4] та властивостями прокатної емульсії [5–8]. Вплив вихідної шорсткості штаби практично нівелюється у перших трьох клітях [9–12], унаслідок чого формування кінцевої поверхні холоднокатаного прокату визначається параметрами деформації та

мікрорельєфом робочих валків четвертої кліті. Через відсутність можливості контролю проміжної шорсткості штаби експериментально доступними є лише шорсткість валків та кінцева шорсткість штаби після четвертої кліті.

У промислових умовах дані щодо зміни шорсткості робочих валків упродовж кампанії їх роботи є обмеженими та, як правило, доступні лише на початку і в кінці кампанії, за різної її тривалості для різних прокатних емульсій.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення універсального підходу до кількісного оцінювання ступеня перенесення мікрорельєфу робочих валків на поверхню прокату та отримання функціональних залежностей, що дозволяють визначати шорсткість робочих валків четвертої кліті на різних етапах кампанії прокатки за умов обмеженої експериментальної інформації.

**Метою дослідження** є визначення коефіцієнта перенесення шорсткості як функції відносного напрацювання робочих валків для різних прокатних емульсій та отримання функціональних залежностей для визначення шорсткості робочих валків упродовж кампанії прокатки з метою їх використання в математичних моделях формування мастильної плівки.

**Методи та методики дослідження.** Інформаційною основою визначення коефіцієнту перенесення (відбиття) $K_{print}$ є результати промислового контролю шорсткості $Ra$ (мкм) поверхні робочих валків (індекс "*r*") четвертої кліті та шорсткості поверхні штаби (індекс "*s*") після прокатки на 4-клітьовому стані тандем 1680 при використанні різних емульсолів. Для емульсолу «Універсал-1ТС-М» проводили спеціальні промислові дослідження з періодичними зупинками прокатного стана для замірювання показників шорсткості, що дозволило отримати в табличному вигляді функціональну залежність зміни шорсткості робочих валків четвертої кліті та кінцевої шорсткості штаби упродовж усієї кампанії їх роботи. Цей емульсол прийнято як базовий ($j = 0$) і використано для формування еталонної залежності. Для інших емульсолів ($j = 1, \ldots, m$; для даного дослідження $n = 4$, табл. 1) експериментальні дані є обмеженими та включають лише значення шорсткості робочих валків і кінцевої шорсткості штаби на початку та в кінці кампанії, без проміжних вимірювань, за різної її тривалості. Зазначені дані використовували для подальшого порівняльного аналізу на основі еталонної залежності.

Для усунення впливу локальних неоднорідностей мікрорельєфу результати вимірювань шорсткості поверхонь робочих валків четвертої кліті та штаби після прокатки приводили до усереднених значень.

Шорсткість верхнього ("top") і нижнього ("bot") валків четвертої кліті визначали як: $Ra_{r.top} = \frac{1}{nr}\sum_{k=1}^{nr} Ra_{r.top.k}$ та $Ra_{r.bot} = \frac{1}{nr}\sum_{k=1}^{nr} Ra_{r.bot.k}$, де k – номер контрольного вимірювання в межах кампанії. Усереднена шорсткість валків: $Ra_{r.m} = \left(Ra_{r.top} + Ra_{r.bot}\right)/2$. Аналогічно для штаби після четвертої кліті: $Ra_{s.top} = \frac{1}{ns}\sum_{k=1}^{ns} Ra_{s.top.k}$, $Ra_{s.top} = \frac{1}{ns}\sum_{k=1}^{ns} Ra_{s.top.k}$. Усереднена шорсткість штаби: $Ra_{s.m} = \left(Ra_{s.top} + Ra_{s.bot}\right)/2$. Усереднення дозволяє зменшити вплив локальних неоднорідностей мікрорельєфу та забезпечити порівнянність результатів для різних кампаній прокатки.

З огляду на різну тривалість кампаній роботи валків для різних прокатних емульсолів, для уніфікації подальшого аналізу введено відносне напрацювання валків:

$$s = L / L_{max}, 0 \; s \; 1, \qquad (1)$$

де $L ma L_{max}$ – поточне та максимальне напрацювання валків у відповідній кампанії.

Для емульсолу «Універсал-1ТС», для якого експериментальні дані охоплюють усю кампанію роботи валків, за табличними значеннями будували залежності шорсткості робочих валків четвертої кліті $Ra_{r.top(j=0)}(s)$, $Ra_{r.bot(j=0)}(s)$ та кінцевої шорсткості штаби $Ra_{s.top(j=0)}(s)$, $Ra_{s.bot(j=0)}(s)$ від відносного напрацювання $s \in [0;1]$. На їх основі визначали коефіцієнт перенесення:

$$K_{print.top(j=0)} = Ra_{s.top(j=0)}(s) / Ra_{r.top(j=0)}(s), \qquad (2а)$$

$$K_{print.bot(j=0)} = Ra_{s.bot(j=0)}(s) / Ra_{r.bot(j=0)}(s). \qquad (2б)$$

$$K_{print(j=0)} = (K_{print.top(j=0)} + K_{print.bot(j=0)}) / 2 \qquad (2в)$$

Безрозмірну форму еволюції шорсткості робочих валків визначали як

$$\phi_{r.top(j=0)}(s) = \frac{Ra_{r.top(j=0)}(s) - Ra_{r.top(j=0)}(0)}{Ra_{r.top(j=0)}(1) - Ra_{r.top(j=0)}(0)},$$

$$\phi_{r.top}(0) = 0, \quad \phi_{r.top}(1) = 1. \qquad (3)$$

$$\phi_{r.bot(j=0)}(s) = \frac{Ra_{r.bot(j=0)}(s) - Ra_{r.bot(j=0)}(0)}{Ra_{r.bot(j=0)}(1) - Ra_{r.bot(j=0)}(0)}, \qquad (4)$$

$$\phi_{r.bot}(0) = 0 \qquad \phi_{r.bot}(1) = 1$$

Функції $\phi_{r.top}(s)$ та $\phi_{r.bot}(s)$ описують хід зміни шорсткості верхнього та нижнього валків упродовж кампанії незалежно від її абсолютної тривалості та рівня шорсткості.

Таблиця 1

**Експериментальні емульсоли при дослідженні $K_{print}$ та присвоєні індекси**

| Емульсол | Універсал-1ТС-М (базовий) | Lubro DL ZPS | Quakerol Zap 4.0 | ROLLUB 988-AR | TRENOIL S740 |
|---|---|---|---|---|---|
| Індекс *j* | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |

Аналогічно безрозмірну форму еволюції кінцевої шорсткості штаби визначали як

$$\phi_{s.top}(s)=\frac{Ra_{s.top(j=0)}(s)-Ra_{s.top(j=0)}(0)}{Ra_{s.top(j=0)}(1)-Ra_{s.top(j=0)}(0)},$$

$$\phi_{s.top}(0)=0,\quad \phi_{s.top}(1)=1. \qquad (5)$$

$$\phi_{s.bot}(s)=\frac{Ra_{s.bot(j=0)}(s)-Ra_{s.bot(j=0)}(0)}{Ra_{s.bot(j=0)}(1)-Ra_{s.bot(j=0)}(0)},$$

$$\phi_{s.bot}(0)=0,\quad \phi_{s.bot}(1)=1. \qquad (6)$$

У разі лінійної зміни шорсткості штаби форми $\phi_{s.top}(s)$ та $\phi_{s.bot}(s)$ можуть бути прийняті як $\phi_{s.top}(s)=s$ та $\phi_{s.bot}(s)=s$.

Для верхнього та нижнього робочих валків четвертої кліті приймаємо, що залежності шорсткості від відносного ресурсу кампанії описуються лінійними функціями:

$$Ra_{r.top(j)}(s)=A_{r.top(j)}s+B_{r.top(j)},$$
$$Ra_{r.bot(j)}(s)=A_{r.bot(j)}s+B_{r.bot(j)}, \qquad (7)$$

де коефіцієнти $A_{r.top(j)}$, $B_{r.top(j)}$, $A_{r.bot(j)}$, $B_{r.bot(j)}$ визначаються за експериментальними даними для відповідного емульсолу.

Перехід до визначення шорсткості валків в довільний момент кампанії здійснюється на основі того, що для процесу *j* відома початкова шорсткість робочих валків при завалці при $s=0$: $Ra_{r.top(j)}(0)$, $Ra_{r.bot(j)}(0)$.

Через прийняту лінійність функції зносу зміна шорсткості по шляху роботи валків $s$ є лінійною. Допускали, що форма залежності зміни шорсткості валків для всіх процесів j подібна. В такому разі, нахили кривих зміни шорсткості валків (тобто коефіцієнти для процесу $A_{r.top(j)}$ та $A_{r.bot(j)}s$) дорівнюють нахилам базового процесу. Тобто залежності (7) переходять в розрахункові при:

$$A_{r.top(j)}=A_{r.top(j=0)},\ A_{r.bot(j)}=A_{r.bot(j=0)},$$
$$B_{r.top(j)}=Ra_{r.top(j)}(0),\ B_{r.bot(j)}=Ra_{r.bot(j)}(0). \qquad (8)$$

Це дозволяє визначити шорсткісь валків для довільного шляху роботи $s$.

Функції шорсткості штаби від абсолютних ($L$) та, після переходу за формулою (1), відносних ($s$) ресурсів кампанії для різних емульсолів отримували шляхом обробки графічних залежностей, що будували за експериментальними даними:

$$Ra_{s.top(j)}(L)=A_{s.top(j)}L-B_{s.top(j)},$$
$$Ra_{s.bot(j)}(L)=A_{s.bot(j)}L-B_{s.bot(j)}, \qquad (9)$$

$$Ra_{s.top(j)}(s)=A_{s.top(j)}s-B_{s.top(j)},$$
$$Ra_{s.bot(j)}(s)=A_{s.bot(j)}s-B_{s.bot(j)}. \qquad (9а)$$

$$Ra_{s.m(j)}(L)=Ra_{s.m(j)}(s)=Ra_{s.top(j)}+Ra_{s.bot(j)} \qquad (10)$$

Коефіцієнт перенесення шорсткості визначали як відношення відповідних функцій шорсткості штаби та робочих валків:

$$K_{print.top(j)}=Ra_{s.top(j)}(s)/Ra_{r.top(j)}(s),$$
$$K_{print.bot(j)}=Ra_{s.bot(j)}(s)/Ra_{r.bot(j)}(s). \qquad (11)$$

Таким чином, коефіцієнт перенесення є функцією відносного ресурсу кампанії та визначається безпосередньо через експериментально встановлені залежності шорсткості для конкретного емульсолу.

Визначення коефіцієнту перенесення може бути отримано двома методами: 1) як середньоарифметичне значення, шляхом обробки таблиць з даними експерименту; 2) як інтегральний показник.

– *За методом 1.* Для набору *N* експериментальних точок:

$$K_{print.top.MA(j)}=(1/N)\sum_{k=1}^{N}K_{print.top(j)}(s_k), \qquad (12а)$$

$$K_{print.bot.MA(j)}=(1/N)\sum_{k=1}^{N}K_{print.bot(j)}(s_k), \qquad (12б)$$

$$K_{print.AV(j)}=\left(K_{print.top.MA(j)}+K_{print.bot.MA(j)}\right)/2. \qquad (12в)$$

– *За методом 2.* Через інтеграли функцій:

2А) середнє значення миттєвого коефіцієнту (інтеграл від відношення):

$$K_{print.top.I(j)}=\int_0^1\frac{Ra_{s.top(j)}(s)}{Ra_{r.top(j)}(s)}ds, \qquad (13а)$$

$$K_{print.bot.I(j)}=\int_0^1\frac{Ra_{s.bot(j)}(s)}{Ra_{r.bot(j)}(s)}ds, \qquad (13б)$$

$$K_{print.I(j)}=\left(K_{print.top.I(j)}+K_{print.bot.I(j)}\right)/2. \qquad (13в)$$

2Б) відношення інтегралів (інтегральна "енергетична/масова" міра):

$$K_{print.top.R(j)}=\frac{\int_0^1 Ra_{s.top(j)}(s)}{\int_0^1 Ra_{r.top(j)}(s)}ds, \qquad (14а)$$

$$K_{print.bot.R(j)}=\frac{\int_0^1 Ra_{s.bot(j)}(s)}{\int_0^1 Ra_{r.bot(j)}(s)}ds, \qquad (14б)$$

$$K_{print.R(j)}=\left(K_{print.top.R(j)}+K_{print.bot.R(j)}\right)/2. \qquad (14в)$$

**Результати та дискусії.** Для базового емульсолу за кампанію роботи валків отримали масив значень шорсткості валків та штаби (табл. 2).

На основі обробки даних табл. 2 отримали:

– верх: $Ra_{r.top(j=0)}(s)=-2,27s+6,33;$

$$Ra_{s.top(j=0)}(s)=-0,502s+1,68, \qquad (15а)$$

– низ: $Ra_{r.bot(j=0)}(s)=-4,76s+7,50;$

$$Ra_{s.bot(j=0)}(s)=-0,991s+1,81, \qquad (15б)$$

– середні: $Ra_{r.m(j=0)}(s) = -3{,}515s + 6{,}915$;

$$Ra_{s.m(j=0)}(s) = -0{,}7465s + 1{,}745\,. \qquad (15в)$$

За рядками табл. 2 із використанням формул (2а) та (2б) обчислювали поточні коефіцієнти перенесення.

Для інших прокатних емульсолів експериментально зафіксовано зміну середньої шорсткості поверхні штаби після четвертої кліті залежно від напрацювання валків $L$ (км). Експериментальні графікіи залежностей $Ra_s(L)$ для верхньої та нижньої поверхонь штаби подано на рис. 1–4.

Після нормування змінної в лінійній залежності (9а) та (9б) вони були зведені до вигляду $Ra_{s.m}(L) = AL_{max}s + B$ та наведені в табл. 3.

Таблиця 2

**Розрахунок $K_{print(j=0)}$ для емульсолу «Універсал-1ТС»**

| Сторона | Шорсткість валків | Шорсткість штаби | Коефіцієнт перенесення |
|---|---|---|---|
| верх | 6,33 | 1,68 | 0,265 |
| низ | 7,5 | 1,81 | 0,241 |
| верх | 4,038 | 1,32 | 0,327 |
| низ | 3,832 | 1,54 | 0,402 |
| верх | 3,4 | 1,13 | 0,332 |
| низ | 3,4 | 0,87 | 0,256 |
| верх | 3,415 | 1,12 | 0,328 |
| низ | 3,405 | 1,15 | 0,338 |
| верх | 3,41 | 1,53 | 0,449 |
| низ | 3,3 | 1,01 | 0,306 |
| верх | 5,6 | 1,9 | 0,339 |
| низ | 5,47 | 2,3 | 0,420 |
| верх | 2,36 | 1,07 | 0,453 |
| низ | 2,52 | 0,925 | 0,367 |
| верх | 5,48 | 0,996 | 0,182 |
| низ | 5,94 | 0,787 | 0,132 |
| верх | 4,06 | 1,178 | 0,290 |
| низ | 2,74 | 0,819 | 0,299 |
| Середнє: | | | $K_{print(j=0)} = 0{,}323$ |

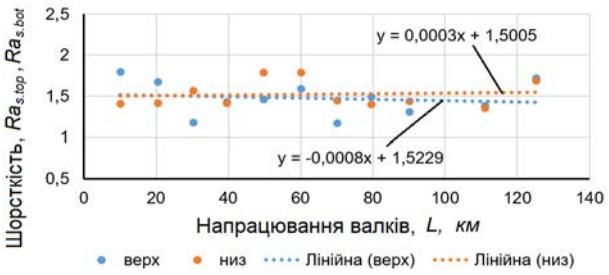


**Рис. 1. Залежність шорсткості верху $Ra_{s.top}$ та низу $Ra_{s.bot}$ штаби від напрацювання валків $L$ при роботі на емульсолі «Lubro DL ZPS»**

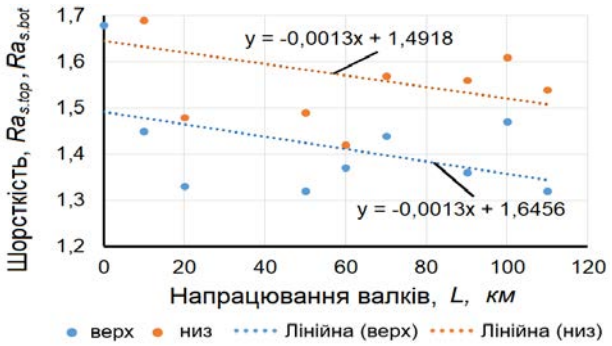


**Рис. 2. Залежність шорсткості верху $Ra_{s.top}$ та низу $Ra_{s.bot}$ штаби від напрацювання валків $L$ при роботі на емульсолі «Quakerol Zap 4,0»**

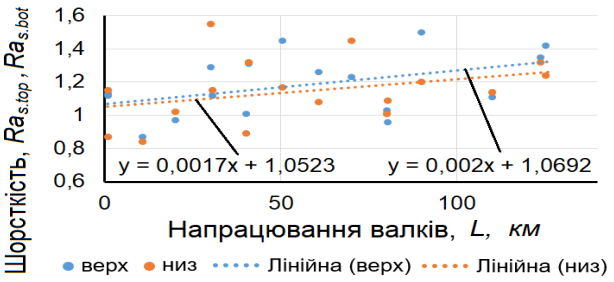


**Рис. 3. Залежність шорсткості верху $Ra_{s.top}$ та низу $Ra_{s.bot}$ штаби від напрацювання валків $L$ при роботі на емульсолі ROLLUB 988-AR**

Таблиця 3

**Лінійні залежності шорсткості штаби після прокатки від відносного ресурсу кампанії $s$**

| j | Емульсол | Сторона | $Ra_s(s)$, мкм | $L_{max}$, км |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Lubro DL ZPS | верх | $Ra_{s.top}(s) = 0{,}0008L_{max}s + 1{,}5229$ | 125,2 |
| | | низ | $Ra_{s.bot}(s) = 0{,}0003L_{max}s + 1{,}5005229$ | 125,2 |
| 2 | Quakerol Zap 4.0 | верх | $Ra_{s.top}(s) = -0{,}0013L_{max}s + 1{,}4918$ | 110 |
| | | низ | $Ra_{s.bot}(s) = -0{,}0013L_{max}s + 1{,}6456$ | 110 |
| 3 | ROLLUB 988-AR | верх | $Ra_{s.top}(s) = 0{,}0020L_{max}s + 1{,}0692$ | 127,5 |
| | | низ | $Ra_{s.bot}(s) = 0{,}0017L_{max}s + 1{,}0523$ | 127,5 |
| 4 | TRENOIL S740 | верх | $Ra_{s.top}(s) = -0{,}0047L_{max}s + 1{,}5776$ | 126,2 |
| | | низ | $Ra_{s.bot}(s) = -0{,}0038L_{max}s + 1{,}3962$ | 126,2 |

Таблиця 4

**Зведені значення коефіцієнта перенесення шорсткості $K_{print}$, визначені різними методами, та їх відхилення від середньоарифметичного**

| j | Емульсол | Сторона | Метод 1 | Метод 2А | | Метод 2Б | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $K_{print.MA}$ | $K_{print.I}$ | $\Delta_I$,% | $K_{print.R}$ | $\Delta_R$,% |
| 0 | Універсал-1ТС (базовий) | верх | 0,339 | 0,327 | -3,5 | 0,32 | -5,6 |
| | | низ | 0,332 | 0,318 | -4,2 | 0,312 | -6,0 |
| | | середнє | 0,323 | 0,323 | 0,0 | 0,317 | -1,9 |
| 1 | LUBRO DL ZPS | верх | 0,421 | 0,319 | -24,2 | 0,305 | -27,6 |
| | | низ | 0,441 | 0,307 | -30,4 | 0,295 | -33,1 |
| | | середнє | 0,431 | 0,313 | -27,4 | 0,300 | -30,4 |
| 2 | QUAKEROL Zap 4.0 | верх | 0,351 | 0,285 | -18,8 | 0,275 | -21,6 |
| | | низ | 0,411 | 0,316 | -23,1 | 0,305 | -25,8 |
| | | середнє | 0,381 | 0,301 | -21,0 | 0,290 | -23,9 |
| 3 | ROLLUB 988-AR | верх | 0,289 | 0,245 | -15,2 | 0,232 | -19,7 |
| | | низ | 0,276 | 0,237 | -14,1 | 0,225 | -18,5 |
| | | середнє | 0,283 | 0,241 | -14,8 | 0,229 | -19,1 |
| 4 | TRENOIL S740 | верх | 0,305 | 0,252 | -17,4 | 0,248 | -18,7 |
| | | низ | 0,292 | 0,228 | -21,9 | 0,224 | -23,3 |
| | | середнє | 0,299 | 0,240 | -19,7 | 0,236 | -21,1 |

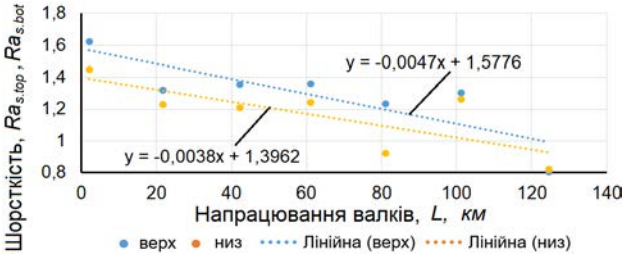


**Рис. 4. Залежність шорсткості верху $Ra_{s.top}$ та низу $Ra_{s.bot}$ штаби від напрацювання валків $L$ при роботі на емульсолі TRENOIL S740**

На основі експериментальних даних, наведених у табл. 2 та табл. 3, а також кампанійних залежностей шорсткості поверхні штаби, представлених на рис. 1–4, виконували розрахунки коефіцієнтів перенесення шорсткості $K_{print}$ для базового та досліджуваних прокатних емульсолів. Оцінювання $K_{print}$ здійснювали прийнятими методами: а) як середньоарифметичне значення за дискретними експериментальними точками, за формулами (2а)–(2в); б) як інтеграл від функції $K_{print}(s)$ за відносним ресурсом кампанії, тобто за формулами (3а)–(3в) (метод 2А); в) як відношення інтегралів кампанійних функцій шорсткості штаби та еталонної функції шорсткості валків, тобто за формулами (4а)–(4в) (метод 2Б). Результати розрахунку наведені в табл. 4.

Як видно з табл. 4, для базового (еталонного) емульсолу значення коефіцієнта перенесення, визначені різними методами, практично збігаються, що підтверджує узгодженість експериментальних даних і коректність лінійної кампанійної моделі. Для інших емульсолів інтегральні методи (2А, 2Б) дають нижчі значення $K_{print}$ порівняно з середньоарифметичним методом (1) з відхиленням до 15–30%, що зумовлено згладжуванням локальних піків шорсткості при переході до інтегральної оцінки. Ранжування емульсолів за величиною $K_{print}$ є однаковим для всіх методів, що обґрунтовує застосування інтегральних показників для порівняльної оцінки впливу прокатних емульсолів.

**Висновки.** Удосконалено методологію визначення коефіцієнта перенесення мікрорельєфу робочих валків на поверхню штаби під час холодної прокатки, у якій коефіцієнт $K_{print}$ розглядається не як стала величина, а як функція відносного напрацювання валків і типу прокатного емульсолу. Методологія включає нормування ресурсу валків, побудову еталонних залежностей для базового емульсолу та поширення їх на інші емульсоли за початковими і кінцевими значеннями шорсткості, що дозволило уточнити закономірності перенесення мікрорельєфу контактуючих поверхонь і використання $K_{print}$ у моделях формування мастильної плівки за обмежених виробничих даних.

Отримані математичні залежності зміни шорсткості валків від відносного напрацювання дозволяють прогнозувати стан поверхні прокату в будь-який момент кампанії. Це створює підґрунтя для розроблення адаптивних систем керування режимами обтиснень у чистових клітях тандем-стану з метою забезпечення заданого стандарту шорсткості готової продукції при переході на нові типи технологічних мастил.

**ЛІТЕРАТУРА:**

1 B. Ma, A.K. Tieu, C. Lu, Z. Jiang. An experimental investigation of steel surface characteristic transfer by cold rolling. *Journal of Materials Processing Technology.* 2002. Vol. 125–126, P.657-663. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00377-1.

2 R. Ahmed , M.P.F Sutcliffe. Identification of surface features on cold-rolled stainless steel strip. *Wear.* 2000. Vol. 244, Issues 1–2, P. 60-70. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00442-7.

3 John G. Lenard. The effect of roll roughness on the rolling parameters during cold rolling of an aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology.* 2004. Vol. 152, Issue 2, P. 144-153. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.03.026.

4. Sören Andersson, Edwin Salas-Russo. The influence of surface roughness and oil viscosity on the transition in mixed lubricated sliding steel contacts. *Wear*. 1994. Vol.174, Issues 1–2, P. 71-79.

5. Kukhar V., Spichak O., Pashynskyi V., Malii K., Balalayeva E., Marchenko I., Tuzenko O. A data-driven approach to the selection of sustainable emulsions for cold-rolled steel production. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*. 2025. Vol. 23. Issue 2. P. 5–16. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.15862796.

6. Спічак О. Ю., Кухар В. В., Широкобоков В. В. Вплив параметрів відпалу у ковпакових печах на чистоту поверхні холоднокатаного прокату. *International scientific conference "MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education" : conference proceedings* (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : "Baltija Publishing", 2024. Vol. 1. P. 186–189. DOI: https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-65.

7. Кухар В. В., Спічак О. Ю., Пашинський В. В., Малій Х. В. Випробування емульсолів для холодної прокатки на сажоутворення при відпалі рулонів. *Обробка матеріалів тиском*. 2024. № 1(53). С. 116–128. DOI: 10.37142/2076-2151/2024-1(53)116.

8. Кухар В. В., Спічак О. Ю., Балалаєва О. Ю., Марченко І. Ф. Розробка математичних моделей змін концентрації емульсій та вмісту механічних домішок у технологічних рідинах з використанням пакету MATLAB для обробки експериментальних даних. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2024. Вип. 49. Т. 1. С. 100–109. DOI: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321216.

9. Kijima H. Influence of roll radius on roughness transfer in skin-pass rolling of steel strip. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. Vol. 214, Issue 5. P. 1111–1119. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.12.019.

10. Miranda A. C. M., Neto C. L., Labiapari W. da S., Pereira P. H. R., Cetlin P. R., Arias A. R. Study of the coefficient of friction and forward slip in cold rolling of stainless steel AISI 430 in Sendzimir mills. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 34. P. 912-923. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.12.106.

11. Çolak B., Ahmed Z., Özakin B., Kurgan N. An experimental investigation into roughness transfer in asymmetrical rolling of steel strips. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*. 2023. Vol. 13, No. 3. P. 1070–1089. DOI: 10.31466/kfbd.1289221.

12. Cavallari M., Gaboardi P., McWhirter R., Perassolo M., Trevisan C. New surface finishes for cold rolling mills. *Proceedings of the 2nd ESTAD Conference (METEC 2015)*. Düsseldorf, Germany, June 15–19, 2015. Düsseldorf, 2015. P. 1–6.

**REFERENCES:**

1. Ma, B., Tieu, A. K., Lu, C., & Jiang, Z. (2002). An experimental investigation of steel surface characteristic transfer by cold rolling. *Journal of Materials Processing Technology,* 125–126, 657–663. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00377-1.

2. Ahmed, R., Sutcliffe, M. P. F. (2000). Identification of surface features on cold-rolled stainless steel strip. *Wear,* 244(1–2), 60–70. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00442-7.

3. Lenard, J. G. (2004). The effect of roll roughness on the rolling parameters during cold rolling of an aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology,* 152(2), 144–153. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.03.026.

4. Andersson, S., Salas-Russo, E. (1994). The influence of surface roughness and oil viscosity on the transition in mixed lubricated sliding steel contacts. *Wear,* 174(1–2), 71–79. https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)90089-2.

5. Kukhar, V., Spichak, O., Pashynskyi, V., Malii, K., Balalayeva, E., Marchenko, I., & Tuzenko, O. (2025). A data-driven approach to the selection of sustainable emulsions for cold-rolled steel production. *Academic Journal of Manufacturing Engineering,* 23(2), 5–16. https://doi.org/10.5281/zenodo.15862796.

6. Spichak, O. Yu., Kukhar, V. V., Shyrokobokov, V. V. (2024). Vplyv parametriv vidpalu u kovpakovykh pechakh na chystotu poverkhni kholodnokatanoho prokatu [Influence of annealing parameters in bell-type furnaces on the surface cleanliness of cold-rolled products]. *International scientific conference "MININGMETALTECH 2024 –*

*The mining and metals sector: integration of business, technology and education": conference proceedings,* 1, 186–189. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-65. [in Ukrainian].

7. Kukhar, V. V., Spichak, O. Yu., Pashynskyi, V. V., & Malii, Kh. V. (2024). Vyprobuvannia emulsoliv dlia kholodnoi prokatky na sazhoutvorennia pry vidpali ruloniv [Testing of emulsols for cold rolling for soot formation during coil annealing]. *Obrobka materialiv tyskom – Materials Working by Pressure,* (1(53)), 116–128. https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1(53)116. [in Ukrainian].

8. Kukhar, V. V., Spichak, O. Yu., Balalaieva, O. Yu., & Marchenko, I. F. (2024). Rozrobka matematychnykh modelei zmin kontsentratsii emulsii ta vmistu mekhanichnykh domishok u tekhnolohichnykh ridynakh z vykorystanniam paketu MATLAB dlia obrobky eksperymentalnykh danykh [Development of mathematical models of changes in emulsion concentration and content of mechanical impurities in technological fluids using the MATLAB package for processing experimental data]. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences,* (49), 100–109. https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.1.2024.321216. [in Ukrainian].

9. Kijima, H. (2014). Influence of roll radius on roughness transfer in skin-pass rolling of steel strip. *Journal of Materials Processing Technology,* 214(5), 1111–1119. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.12.019.

10. Miranda, A. C. M., Neto, C. L., Labiapari, W. da S., Pereira, P. H. R., Cetlin, P. R., & Arias, A. R. (2025). Study of the coefficient of friction and forward slip in cold rolling of stainless steel AISI 430 in Sendzimir mills. *Journal of Materials Research and Technology,* 34, 912–923. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.106.

11. Çolak, B., Ahmed, Z., Özakin, B., & Kurgan, N. (2023). An experimental investigation into roughness transfer in asymmetrical rolling of steel strips. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi,* 13(3), 1070–1089. https://doi.org/10.31466/kfbd.1289221.

12. Cavallari, M., Gaboardi, P., McWhirter, R., Perassolo, M., & Trevisan, C. (2015). New surface finishes for cold rolling mills. Proceedings of the 2nd ESTAD Conference (METEC 2015), 1–6.

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

*Дата першого надходження статті до видання: 10.04.2026*
*Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.05.2026*
*Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026*