

УДК 669.14.018.85:621.771.25

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-24>

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ЧИСТОТУ ПОВЕРХНІ ХОЛОДНОКАТАНОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТУ

Спічак Олександр Юрійович,

начальник відділу холодного прокату технічного управління

ПАТ «Запоріжсталь»

ORCID ID: 0009-0004-9653-437X

Кухар Володимир Валентинович,

доктор технічних наук, професор,

проректор з науково-дослідної роботи,

професор кафедри металургії та організації виробництва

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-4863-7233

У статті наведено результати промислових досліджень факторів, що визначають чистоту поверхні холоднокатаного листового прокату. На основі статистичного аналізу встановлено п'ять основних параметрів, які суттєво впливають на забрудненість металу: блок відпалу, пробіг робочих валків 4-ї кліти стану «Тандем», товщина штаби, концентрація прокатної емульсії та час її роботи. Встановлено, що такі чинники, як напрацювання робочих валків дресировального стану чи першої кліти безперервного стану, а також наявність витоків гідравлічних мастил у прокатну емульсію, практично не впливають на показники чистоти поверхні готового прокату. Для кожного з визначених параметрів були встановлені оптимальні виробничі межі з урахуванням технологічних можливостей, що дало змогу підвищити відбивну здатність металу на 10,3 %. Запропоновано рекомендації щодо вдосконалення технології: підтримувати концентрацію емульсії на рівні 1,5–1,9 %, обмежувати час її використання 200 годинами, проводити прокатку з напрацюванням на робочих валках кліти № 4 понад 40 км, а відпал рулонів здійснювати у печах блоку № 11 з підвищеним тиском захисного газу. Дослідний промисловий експеримент підтвердив ефективність цих рекомендацій: якість поверхні холоднокатаного прокату зросла порівняно з контрольними плавками. Отримані результати є важливими для підвищення конкурентоспроможності продукції, яка використовується в автомобілебудуванні, пакувальній індустрії та інших сферах, де критичною є чистота поверхні металу.

Ключові слова: холоднокатаний прокат, чистота поверхні, відбивна здатність, метод реплік, концентрація емульсії, час роботи емульсії, відпал.

Spichak Oleksandr, Kukhar Volodymyr. Influence of technological factors on the surface cleanliness of cold-rolled steel sheets

The article presents the results of industrial research on factors that determine the surface cleanliness of cold-rolled steel sheets. Based on statistical analysis, five main parameters were identified as having a significant impact on steel contamination: the annealing furnace block, roll mileage of the 4th stand of the Tandem mill, strip thickness, rolling emulsion concentration, and emulsion operating time. It was found that factors such as the operating time of skin-pass mill rolls, the mileage of the rolls of the 1st stand of the continuous mill, as well as hydraulic oil leaks into the rolling emulsion, have virtually no effect on the surface cleanliness of finished products. For each of the identified parameters, optimal production ranges were established, taking into account technological capabilities, which made it possible to increase the reflectivity of the steel by 10.3 %. Recommendations for process improvement were proposed: maintaining the emulsion concentration at 1.5–1.9 %, limiting its operating time to 200 hours, performing rolling with work rolls of the 4th stand after more than 40 km of mileage, and annealing coils in block No. 11 furnaces under increased protective gas pressure. An experimental industrial trial confirmed the effectiveness of these recommendations: the surface quality of cold-rolled steel was improved compared to control heats. The results obtained are important for enhancing the competitiveness of products used in the automotive industry, packaging, and other sectors where steel surface cleanliness is critical.

Key words: cold-rolled steel, surface cleanliness, reflectivity, replicate method, rolling emulsion, annealing.

Вступ. Висока якість поверхні важлива для холоднокатаного листового металу, особливо в автомобільній промисловості (наприклад, для зовнішніх частин кузова) та в упаковці (для банок їжі та напоїв). Одним з показників

якості поверхні є чистота, яка визначається відсутністю небажаних матеріалів на поверхні [1]. Низька чистота поверхні холоднокатаного металу може негативно вплинути на кінцевий продукт і подальші процеси, такі як відпал,

цинкування та формування. Наприклад, це може призвести до сильного окислення або місцевого ослаблення цинкового покриття на лініях гарячого цинкування [2].

На чистоту поверхні холоднокатаного прокату впливають багато факторів, таких як параметри прокатної емульсії [3], шорсткість і рельєф поверхні штаби [4–6] і навіть спосіб подачі прокатної емульсії на стані [7; 8]. Деякі автори зазначають, що більшість металевих частинок утворюється в перших клітках стану, де холоднокатана штаба має найменшу поверхневу твердість, так званий наклеп [9]. Чим вища шорсткість валків і обтиснення в перших клітках, тим більше утворюється таких частинок. Тверде хромоване покриття валків знижує швидкість зношування [10–12]. Висока твердість хромованого покриття (до 1200 HV) забезпечує підвищену стійкість до стирання, що сприяє збільшенню терміну служби валків [13].

Для зменшення забрудненості штаби після першої клітки також застосовують промаслювання прокату після травлення. Згідно з цими дослідженнями, промаслювання смуг після травлення знижує кількість механічної складової частини в забрудненості смуг після холодної прокатки на 15–25 %.

Зменшення товщини прокату збільшує кількість утворених частинок зносу [4; 11; 14]. Велике зменшення товщини означає жорсткіші умови контакту з більшою довжиною ковзання, підвищеною контактною напругою, збільшеним співвідношенням реальної площі контакту та більшою температурою, що призводить до більшого зносу [11; 15]. Збільшення швидкості прокатки, навпаки, зменшує швидкість зношування, оскільки це приводить до товщої масильної плівки в осередку деформації та знижує тертя [11].

Значний вплив на чистоту поверхні та утворення дефектів холоднокатаного прокату справляє ефективність очищення прокатної емульсії. Як правило, під час комбінування декількох пристроїв їх з'єднують послідовно, отримуючи багатоступінчасті системи очищення [16].

Методи та методики дослідження. Забрудненість поверхні може вимірюватись двома методами: ваговим – коли зразки металу зважуються у лабораторії, потім миються та знову зважуються, та методом реплік. Метод реплік – це експрес-метод визначення забрудненості поверхні металу в цехових умовах, який виконується шляхом зняття забруднень з поверхні металу (смуги) за допомогою клейкої стрічки «скотч» та виміру її відбивної здатності за допомогою приладу – рефлектметра.

Репліка знімається з поверхні у середній частині листа чи смуги.

Вимірювання чистоти поверхні проводили методом реплік з використанням рефлектметра «Novo-Shade». Первинні показники приладу фіксувалися у балах (умовних одиницях) та після нормування на білий еталон переводилися у відсотки відбивної здатності (%). Оцінювання здійснювали за шкалою забрудненості від 0 % до 100 %, відповідно до якої прокат вважається чистим за відбивної здатності понад 70 %, середньої чистоти – 50–70 %, а за значень нижче 50 % – брудним (табл. 1).

Таблиця 1

Класифікація ступеня забрудненості

Забрудненість прокату, мг/м ²	Відбивна здатність
Чиста поверхня	95 %
До 100	80 %
До 300	70 %
До 400	60 %
До 600–700	40 %
До 900–1 000	20 %
Більш 1 000	–

Для дослідження був вибраний метод реплік, щоб прискорити процес відбору та аналізу проб та мінімізувати вплив людського чинника на неякісну підготовку проб.

Результати. Для визначення факторів, що в умовах діючого прокатного виробництва цеху холодної прокатки ПАТ «Запоріжсталь» впливають на відбивну здатність, проведена дослідницька робота, в ході якої на товарних холоднокатаних рулонах в потоці було відібрано 319 реплік від товарних відпалених та продресированих 319 рулонів. За результатами аналізу були зроблені висновки про чинники, що впливають на відбивну здатність (чистоту поверхні) прокату. Статистична вибірка була оброблена в статистичній програмі «Newral designer», за допомогою цієї програми були визначені коефіцієнти кореляції кожного параметру, який впливає на чистоту поверхні.

На рис. 1 оцифрований вплив вхідних змінних для вихідної змінної «чистота поверхні» в порядку їх значення. Позитивні значення означають, що збільшення вхідної змінної збільшує вихідну змінну. Негативні значення означають, що збільшення вхідної змінної зменшує вихідну змінну. Значення, близькі до нуля, означають, що вихідна змінна не змінюється у разі зміни вхідної змінної. З наданого на рис. 1 графіку видно, що ТОП причин, які впливають на забрудненість холоднокатаного прокату, – це

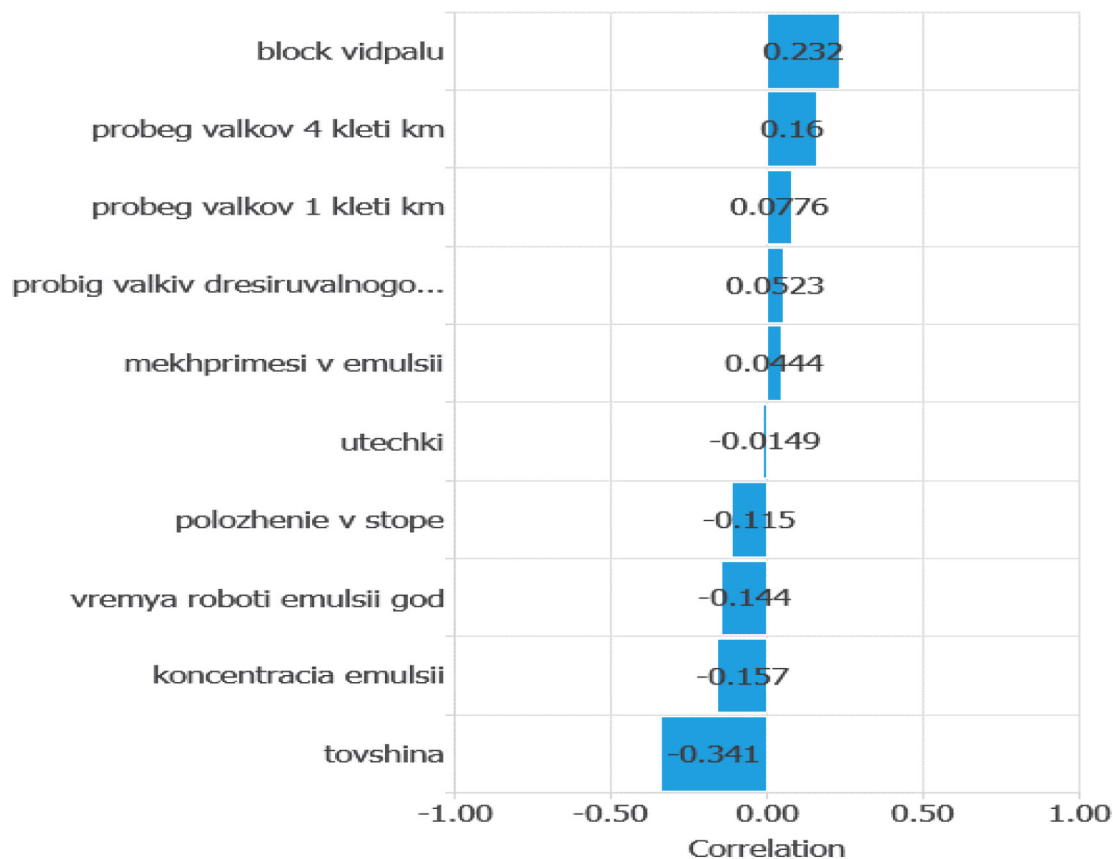


Рис. 1. Коефіцієнт кореляції Пірсона між технологічними параметрами та відбивною здатністю готового товарного прокату

блок відпалу, пробіг валків 4-ї кліті стану «Тандем», товщина прокату, концентрація емульсії та час роботи емульсії.

Більш детально вплив кожного з ТОП параметрів розглянуто нижче.

1) За даними залежності параметра «напрацювання на робочих валках кліті № 4» від коефіцієнта відбивної здатності, видно вплив цього параметра на чистоту поверхні готового холоднокатаного прокату. Так, суттєве зростання коефіцієнта відбивної здатності відзначається під час напрацювання на робочих валках кліті № 4 від 0 до 40 км, від 40 до 100 км відбивна здатність практично не змінюється (рис. 2).

Отже, прокатку смуг рекомендується проводити з напрацюванням на робочих валках кліті № 4 понад 40 км та понизити величину шорсткості валків кліті № 4 під час насікання.

2) За даними залежності параметра «концентрація емульсії» від коефіцієнта відбивної здатності видно, що чим вища концентрація емульсії (у межах від 1,5 %), тим нижчий коефіцієнт відбивної здатності (рис. 3). Рекомендується підтримувати концентрацію емульсії на мінімальному рівні 1,5–1,9 %.

3) Є закономірність впливу параметра «час роботи прокатної емульсії» на відбивну

здатність готового прокату. Зі збільшенням часу роботи прокатної емульсії середні значення коефіцієнта відбивної здатності знижуються (рис. 4). Чим більший час роботи прокатної емульсії, тим більше вона забруднюється механічними домішками, при цьому, згідно з наведеною статистикою, залежність чистоти поверхні прокату від наявності мехдомішок не така суттєва. Це можна пояснити тим, що під час аналізу мехдомішок в лабораторії частина мехдомішок проходить через паперовий фільтр, не затримуючись на ньому, що впливає на результати аналізу лабораторії. Рекомендується прокатувати метал по замовленнях, які потребують високої чистоти поверхні, з часом роботи емульсії не більше 200 годин.

4) Є закономірність впливу параметра «блок термічних печей» (печі з HNX-атмосферою) на відбивну здатність готового прокату. Так, чистота поверхні рулонів, що відпалюються в термічних печах блоку № 11, вище чистоти поверхні рулонів, що відпалюються в термічних печах інших блоків (рис. 5). Висока чистота поверхні металу, що відпалюється на печах блоку № 11, пояснюється тим, що подача захисного газу в ЦХП проводиться біля цих блоків, тобто тиск захисного газу на

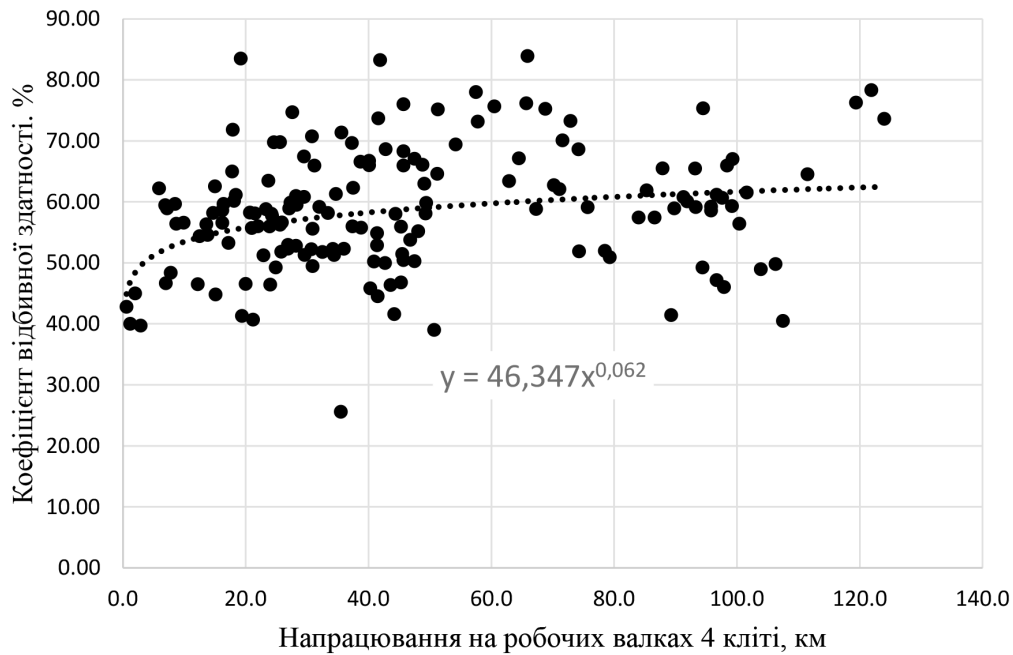


Рис. 2. Вплив напрацювання на робочих валках кліті № 4 на відбивну здатність

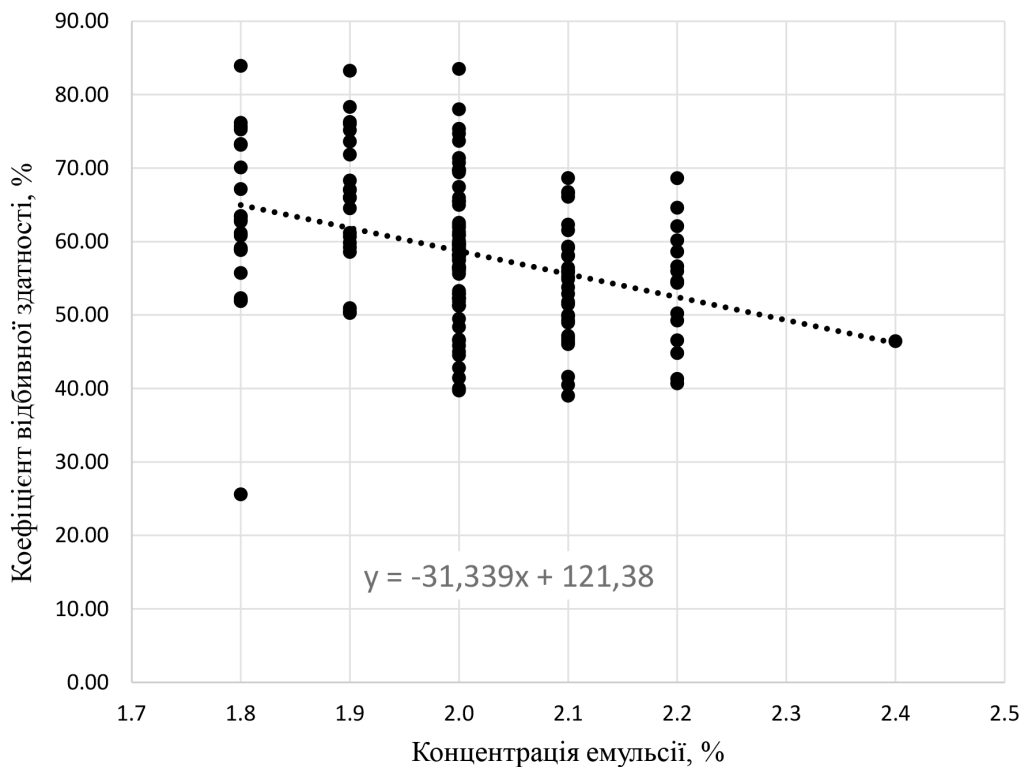


Рис. 3. Вплив концентрації емульсії на відбивну здатність

цих блоках вищий та більша кількість очищувальної поверхні смуги водню потрапляє в піч. Рекомендується для металу з регламентованою чистотою поверхні проводити відпал рулонів у термічних печах блоку № 11. Також за результатами роботи рекомендовано підвищити тиск захисного газу під час відпалу до 100–140 кгс/м² проти теперішніх 60–80 кгс/м².

5) В результаті аналізу також виявлений вплив товщини прокату на його забрудненість. Згідно з рис. 6, чим вища товщина прокату, тим менша його забрудненість. Це може пояснюватися тільки тим, що відносний відсоток обтиснення під час прокатки товстих смуг менший, ніж під час прокатки тонкого прокату, чим більше обтиснення, тим вище коефіцієнт тертя

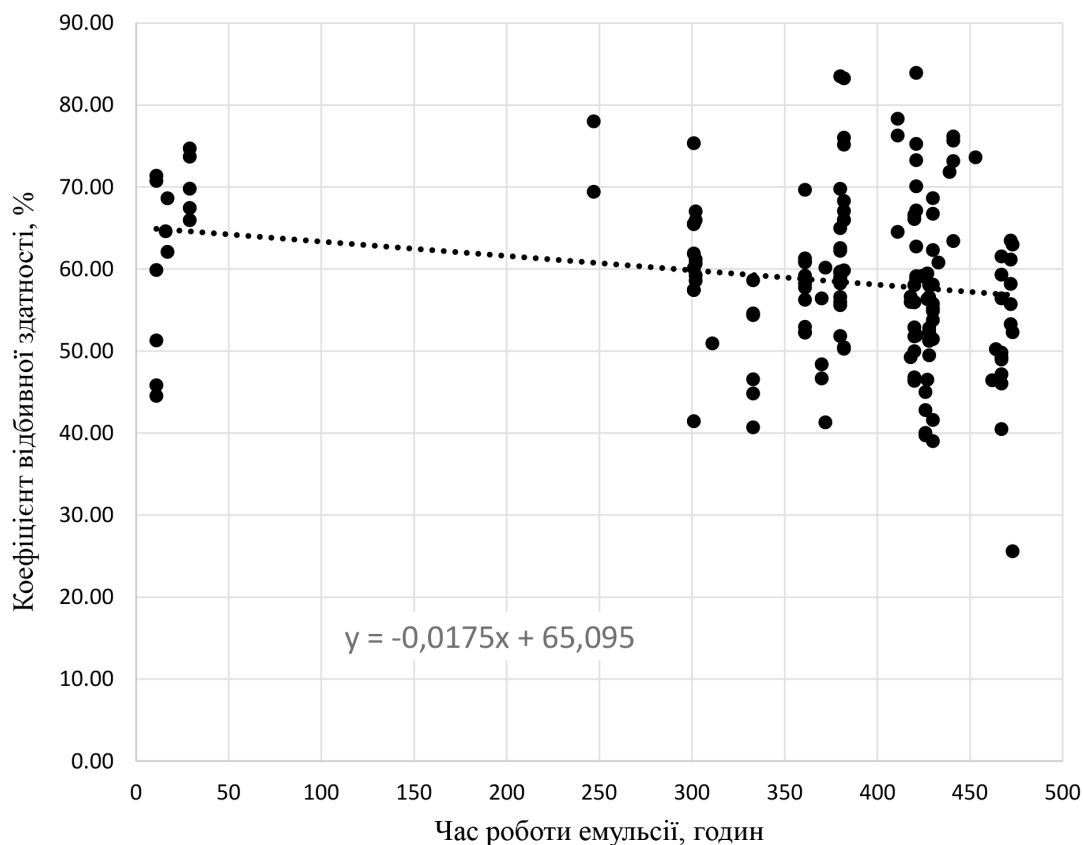


Рис. 4. Вплив часу роботи емульсії на відбивну здатність

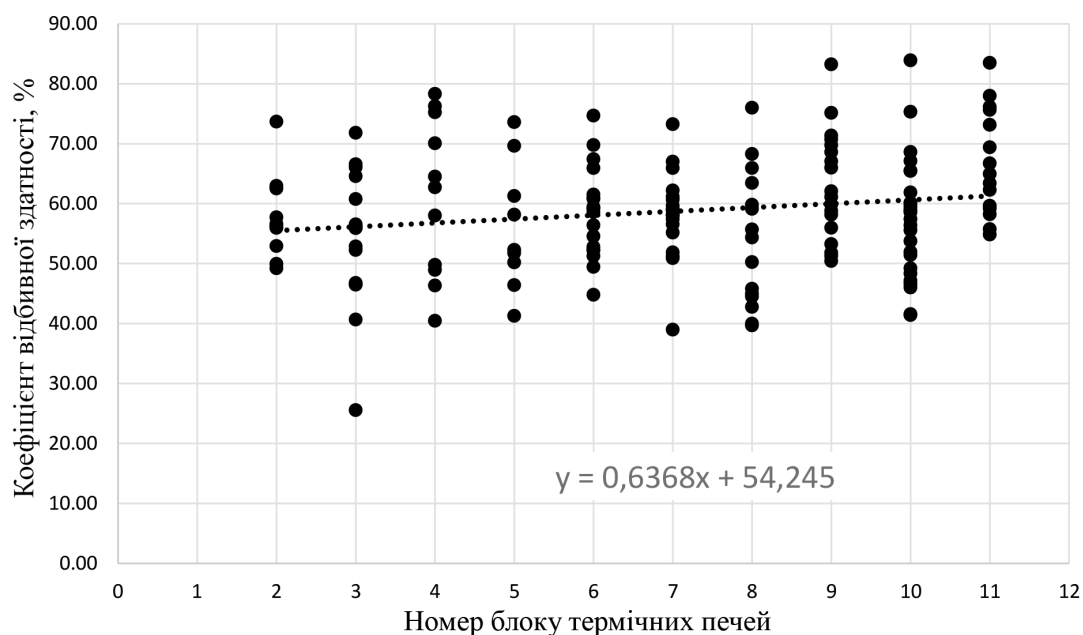


Рис. 5. Вплив блоку печей на відбивну здатність

та тим більше продуктів зносу з валків та смуги залишається на смузі після прокатки.

При цьому такі технологічні параметри, як рівень гідравлічних витоків в прокатну емульсію, напрацювання на робочих валках першої кліті стану «Тандем», напрацювання на робочих

валках дресирувального стану та положення рулону в стопі під час відпалу, справляють незначний вплив на показник забрудненості холоднокатаного прокату.

За результатами аналізу статистичних даних відбивної здатності холоднокатаного прокату

в потоці оптимальними параметрами технології виробництва з підвищеними вимогами до чистоти поверхні є такі.

1) За переділом прокатки:

– напрацювання на робочих валках кліті № 4 – понад 40 км;

– концентрація емульсії – 1,5–1,9 %;

– час роботи емульсії – не більше 200 годин.

2) Відпал проводити у термічних печах блоку № 11– це найближчий блок до підводу захисного газу.

Також окремо рекомендовано понизити шортність робочих валків кліті № 4 під час насікання та підвищити тиск захисного газу під час відпалу.

На підставі висновків та запропонованих рекомендацій щодо параметрів прокатки, відпалу та дресування була проведена дослідна плавка 1013411-DX51D розмірами $1,88 \times 1\,017$ мм (12 рулонів). Результати чистоти поверхні цієї плавки та параметри виробництва представлені у табл. 2.

Параметри технології виробництва плавки 1 013 411 такі.

1) Прокатка виконана за таких параметрів:

– напрацювання на робочих валках кліті № 4 – 79,9–88,5 км (понад 40 км згідно з рекомендацією);

– концентрація емульсії – 1,8 % (1,5–1,9 % згідно з рекомендацією);

– час роботи емульсії – 178 год.

2) Відпал 12 рулонів дослідної плавки проводили в термічних печах блоку № 11. Коефіцієнт відбивної здатності на рулонах дослідної плавки становив 49,0–73,8 %, в середньому – 63,4 %.

Для порівняння була взята плавка 133445 DX51D $1,78\text{--}1,98 \times 1\,250$ мм (9 рулонів), яка була прокатана на стані Тандем на цієї ж кампанії емульсії, але без обмежень технологічних параметрів:

– прокатка на робочих валках кліті № 4 – 5,1–11,5 км;

– концентрація емульсії – 2,4 %;

– час роботи емульсії – 297 год;

– відпал – блок № 5.

На проведеній плавці встановлено, що дотримання рекомендованих параметрів покращує загальну чистоту поверхні на 10,3 % (рис. 7).

Такі результати наочно підтверджує box-plot-діаграма (рис. 8).

Box-plot демонструє, що дослідні рулони характеризуються вищим середнім рівнем відбивної здатності (~63,5 %) та меншим розкидом результатів порівняно з рулонами без обмежень технології (~53,1 %). У контрольній групі нижня медіана і ширший інтерквартильний діапазон вказують на більш нестабільну якість поверхні. Це підтверджує ефективність впроваджених технологічних параметрів.

Аналіз даних табл. 2 дав змогу побудувати гістограму розподілу відбивної здатності

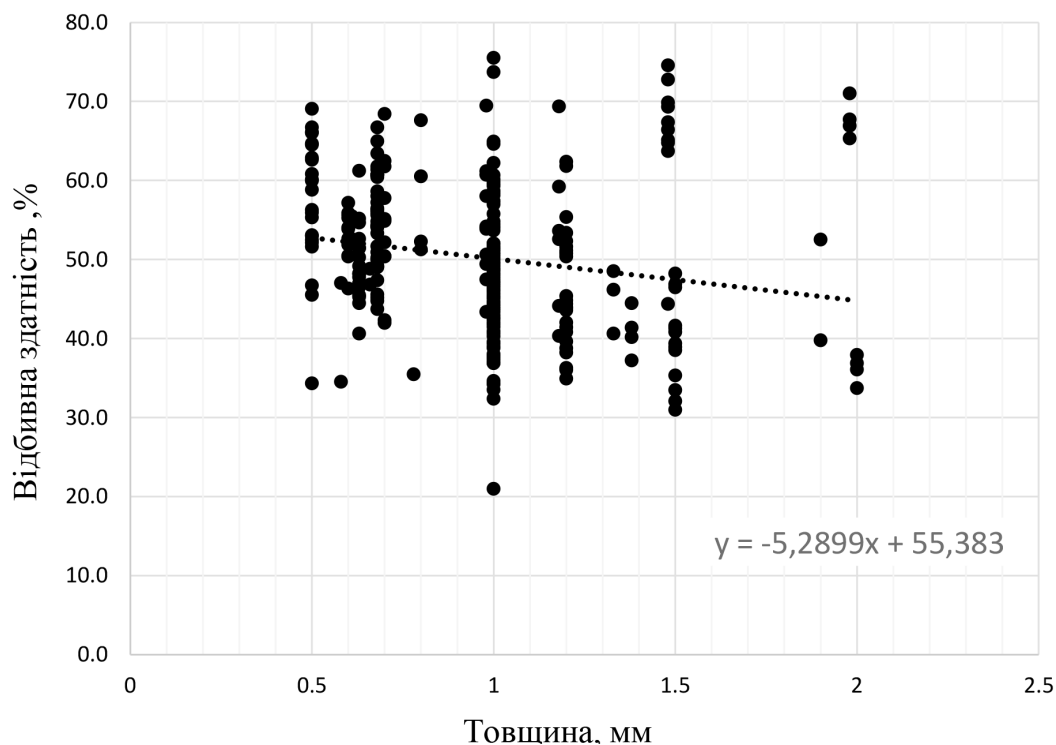


Рис. 6. Залежність відбивної здатності від товщини холоднокатаного прокату

Таблиця 2

Результати визначення чистоти поверхні дослідної плавки та рулонів без обмежень технології

Номер рулону	Білий фон (репліки), %	Вимірювання, бал		Середній результат вимірювань, бал	Відбивна здатність, %
Дослідні рулони					
4 493	82,5	58,6	59,4	59	71,5
4 494	82,8	59,4	57	58,2	70,3
4 495	82,8	50	49,8	49,9	60,3
4 496	82,5	49,7	46,7	48,2	58,4
4 497	82,8	54,1	57,7	55,9	67,5
4 498	82,8	62,7	59,5	61,1	73,8
4 499	82,8	44,4	46,1	45,3	54,6
4 500	81,9	41,4	38,8	40,1	49,0
4 501	82,8	53,7	50,1	51,9	62,7
4 502	82,8	53,3	48,2	50,75	61,3
4 503	81,9	57	57,1	57,05	69,7
4 504	81,9	51,2	50,6	50,9	62,1
В середньому					63,5
Рулони без застосування обмежень технології					
5 680	81,9	31,5	34,02	32,76	40
5 681	82	41,2	39,16	40,18	49
5 682	82,3	41	41,3	41,15	50
5 683	81,5	45,6	48,94	47,27	58
5 684	82	44,2	46	45,1	55
5 685	82	43,7	46,5	45,1	55
5 686	81,9	46,9	48,104	47,502	58
5 687	81,6	45,6	47,424	46,512	57
5 688	82,9	45,2	47,648	46,424	56
В середньому					53,1



Рис. 7. Середні значення відбивної здатності дослідної плавки та плавки у потоці

(рис. 9) та карт Шухарта (рис. 10). При цьому карту Шухарта побудовано у комбінованому вигляді для порівняння відхилень варіантів без обмежень технологічного процесу (базовий) та дослідних рулонів.

Гістограма показує, що більшість рулонів дослідної плавки зосереджено у діапазоні 60–74 %, тоді як рулони без обмежень – переважно

у зоні 49–58 %. Зсув розподілу вправо відображає систематичне підвищення чистоти поверхні за рахунок оптимізації технологічних умов. Чітке розділення модальних значень двох груп свідчить про статистично значиму різницю між ними. Такий зсув пояснюється на карті Шухарта (рис. 10).

Комбінована карта Шухарта дає змогу одночасно оцінити стабільність процесу за старими

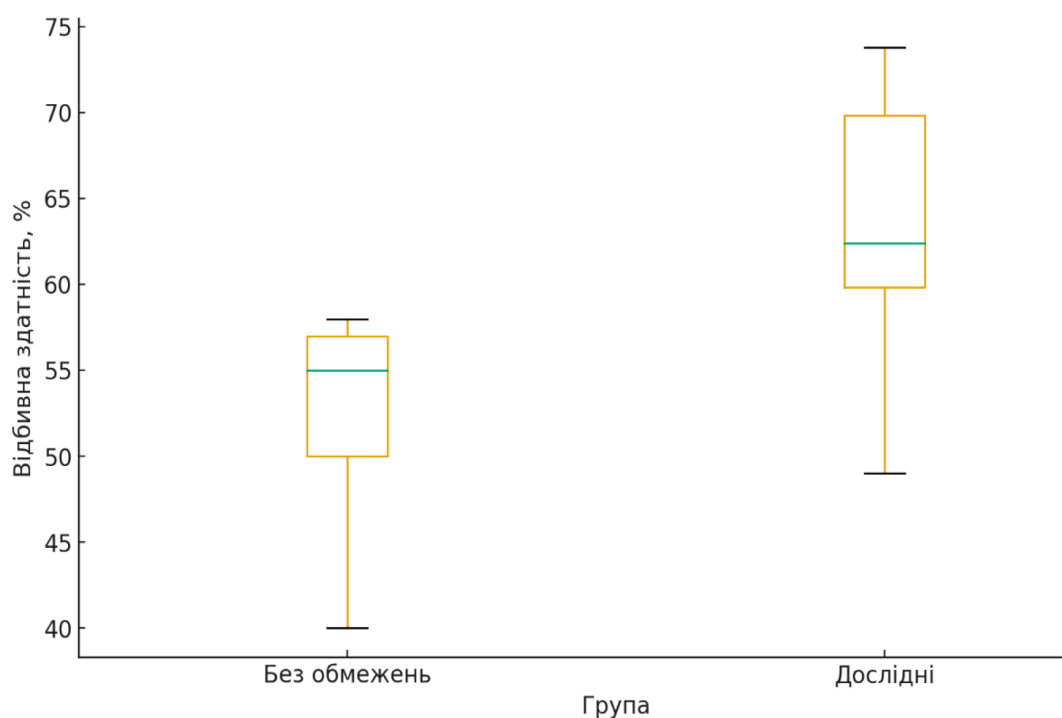


Рис. 8. Вох-plot-діаграма для відбивної здатності рулонів двох плавок

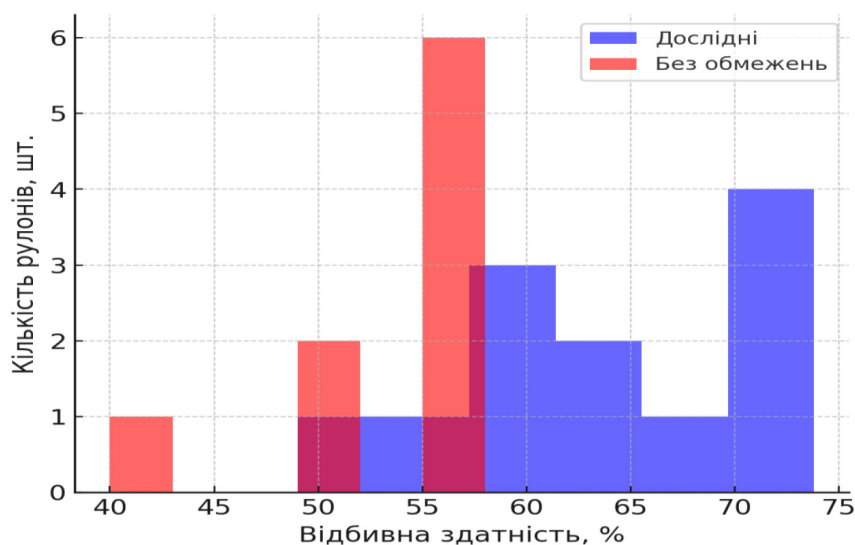


Рис. 9. Гістограма розподілу відбивної здатності

параметрами («без обмежень») та після впровадження оптимізованих режимів («дослідні рулони»). Базовий процес характеризується середнім рівнем відбивної здатності на рівні 53,1 % та контрольними межами 44,5–61,8 %, що вказує на обмежені можливості технології забезпечувати високу чистоту поверхні. Після оптимізації параметрів середнє значення зросло до 63,4 %, а верхня контрольна межа піднялась до 83,8 %, що підтверджує суттєвий зсув процесу у «кращий» бік.

Позитивним результатом є підвищення середнього рівня відбивної здатності, а також зсув більшості точок вище старих меж, що

підтверджує ефективність технологічних заходів. Водночас негативним є те, що варіація процесу також зросла (σ підвищилась з 2,88 % до 6,80 %), що свідчить про більшу чутливість якості поверхні до відхилень окремих факторів.

Висновки. На основі проведеного дослідження можна сформулювати такі висновки.

1) Методом статистичного аналізу даних, отриманих у промислових умовах, виявлено технологічні чинники, що справляють найбільший вплив на чистоту поверхні холоднокатаного прокату. ТОП параметрів: блок відпалу, пробіг робочих валків 4-ї кліті стану «Тандем»,

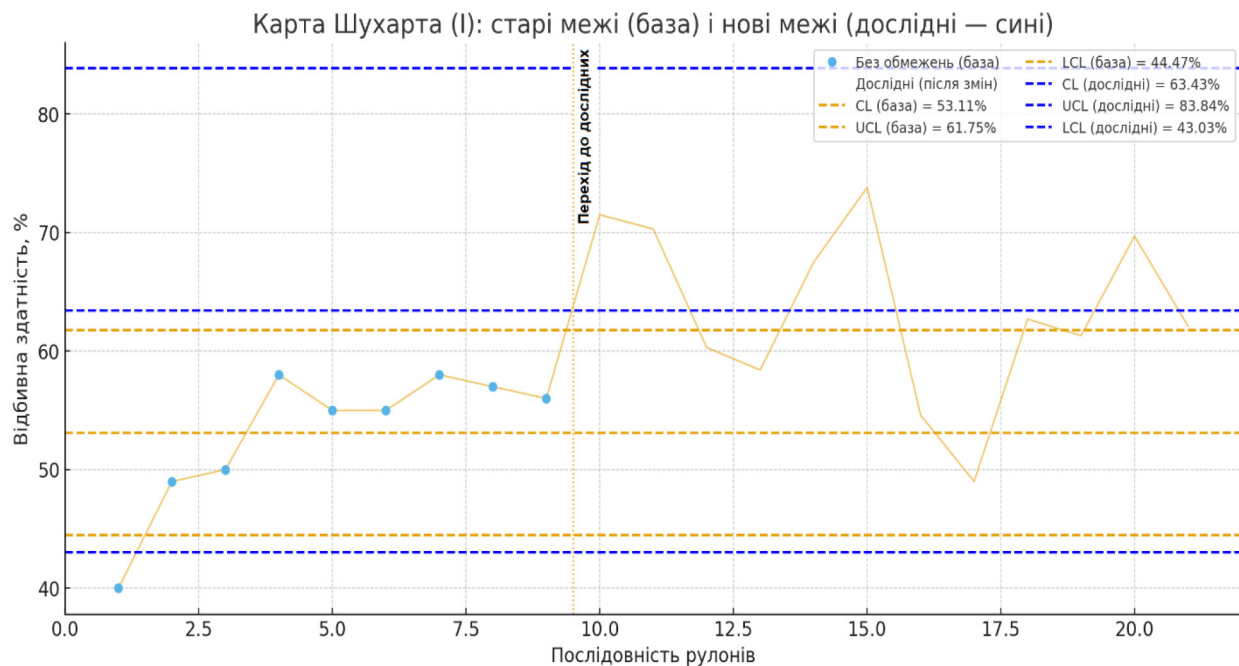


Рис. 10. Карта Шухарта для розподілу відбивної здатності

товщина прокату, концентрація прокатної емульсії та час її використання.

Вперше встановлено граничні значення для кожного з визначених параметрів. Проведений промисловий експеримент підтвердив, що дотримання цих умов дає змогу підвищити відбивну здатність металу на 10,3 %, що є новим науково обґрунтованим результатом.

Такі технологічні фактори, як напрацювання валків першої кліти стану «Тандем», валків дрейфувального стану, рівень гідравлічних витоків у прокатну емульсію та положення рулону в стопі під час відпалу, мають статистично незначний вплив на показник чистоти поверхні.

Для підвищення якості продукції рекомендовано знизити шорсткість робочих валків кліти № 4 до 3,0–3,5 мкм Ra (замість 4,5–5,0 мкм Ra), що не приводить до утворення дефекту «ізмол» і забезпечує більш чисту поверхню прокату.

Оптимізація режиму відпалу в печах з HNX-захисним газом шляхом підвищення тиску

до 100–140 кгс/м² (замість 60–80 кгс/м²) дала змогу збільшити чистоту поверхні після відпалу у 1,6 рази. Це підтверджує практичну ефективність запропонованих заходів.

Використання карт Шухарта показало стійкий позитивний зсув процесу у бік підвищення відбивної здатності після впровадження оптимізованих параметрів. Це свідчить про необхідність перерахунку контрольних меж і впровадження статистичного моніторингу для забезпечення стабільності нового рівня процесу.

Отримані результати мають вагому практичну значущість, оскільки підтверджують можливість масштабування рекомендованих параметрів у серійному виробництві холоднокатаного прокату. Це особливо важливо для продукції з підвищеними вимогами до зовнішнього вигляду (автомобілебудування, пакувальна індустрія) та сприяє підвищенню конкурентоспроможності підприємств металургійного профілю.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Bergmann M., Krimpelstätter K. Minimum quantity lubrication MQL – substitutes traditional emulsion lubrication in tandem cold mill. *AISTech Conference Proceedings*. Nashville, Tenn., 8–11 May, 2017. Warrendale (Pa). 2017. P. 3549–3555.
2. Pesci C., et al. Controlling wear and surface cleanliness during cold rolling (LOWWEAR). Brussel. 2012. 156 p. DOI: <https://doi.org/10.2777/23177>
3. Спічак О., Кухар В., Широкобоков В. Промислові випробування прокатних емульсолів в умовах ПАТ «Запоріжсталь» для вибору оптимального продукту та вдосконалення технологічних прийомів роботи з прокатною емульсією. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 3. С. 135–145. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-17>

4. Labiapari W., de Alcântara C., Costa H., De Mello J. Wear debris generation during cold rolling of stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol. 223. P. 164–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2015.03.050>
5. Dick K., Lenard J. The effect of roll roughness and lubricant viscosity on the loads on the mill during cold rolling of steel strips. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 168. P. 16–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.091>
6. Ge S., Zhao X., Zhou W., Xu X., Tang X., Ren J., Zhang J., Yi Y. The influence of annealing temperature on the microstructure and performance of cold-rolled high-conductivity and high-strength steel. *Crystals*. 2025. Vol. 15. No. 5. P. 469. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst15050469>
7. Krimpelstätter K., Bergmann M., Pröll C. Primetals lubrication expertise boosts new innovation in hot and cold rolling. *10th International Rolling Conference*. Graz, Austria. 2016. P. 35–39.
8. Krimpelstätter K., Flaxa A. Minimum quantity roll-gap lubrication system – field of large potential to reduce your OPEC. *The Iron and Steel Technology Conference and Exposition: AISTech 2013 Proceedings*. Pittsburgh Pa, 5–9 May, 2013. Warrendale (Pa). 2013. P. 1655–1662.
9. Antonicelli M., Liuzzo U., Palumbo G. Evaluation of the effect of a natural-based emulsion on the cold rolling process. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2023. Vol. 7. No. 4. P. 121. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp7040121>
10. Montmitonnet P., Bouadjadja N., Luong L., Bertrandie J., Dietsch H. On the mechanism by which chromium improves strip surface cleanliness in steel strip cold rolling. *Key Engineering Materials*. 2018. Vol. 767. P. 240–247. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.767.240>
11. Jacobs L., Vervaeet B., Hermann H., Agostini M., Kurzynski J., Jonsson N., et al. Improving strip cleanliness after cold rolling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2011. Vol. 225. No. 9. P. 959–969. DOI: <https://doi.org/10.1177/1350650111413639>
12. De Mello J., Gonçalves J., Costa H. Influence of surface texturing and hard chromium coating on the wear of steels used in cold rolling mill rolls. *Wear*. 2013. Vol. 302. P. 1295–1309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.02.006>
13. Simão J., Aspinwall D. Hard chromium plating of EDT mill work rolls. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999. Vol. 92–93. P. 281–287. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00124-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00124-7)
14. Deltombe R., Dubar M., Dubois A., Dubar L. A new methodology to analyze iron fines during steel cold rolling processes. *Wear*. 2003. Vol. 254. P. 211–221. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00005-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00005-X)
15. Huat S., Dubar M., Deltombe R., Dubois A., Dubar L. Asperity deformation, lubricant trapping and iron fines formation mechanism in cold rolling processes. *Wear*. 2004. Vol. 257. P. 471–480. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.01.012>
16. Zelinski P. Keep your coolant in circulation. *Modern Machine Shop*. 1998. Vol. 70. No. 12. P. 96–98.

REFERENCES:

1. Bergmann, M., & Krimpelstätter, K. (2017). Minimum quantity lubrication MQL – substitutes traditional emulsion lubrication in tandem cold mill. *AISTech Conference Proceedings* (pp. 3549–3555). Warrendale, PA.
2. Pesci, C., et al. (2012). Controlling wear and surface cleanliness during cold rolling (LOWWEAR). Brussels: European Commission. <https://doi.org/10.2777/23177>
3. Spichak, O., Kukhar, V., & Shyrokobokov, V. (2025). Industrial trials of rolling emulsions at PJSC “Zaporizhstal” for selecting the optimal product and improving technological methods of rolling emulsion usage. *Metinvest Polytechnic Scientific Journal. Technical Sciences Series*, (3), 135–145. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-17> [in Ukrainian].
4. Labiapari, W., de Alcântara, C., Costa, H., & De Mello, J. (2015). Wear debris generation during cold rolling of stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 223, 164–170. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2015.03.050>
5. Dick, K., & Lenard, J. (2005). The effect of roll roughness and lubricant viscosity on the loads on the mill during cold rolling of steel strips. *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.091>
6. Ge, S., Zhao, X., Zhou, W., Xu, X., Tang, X., Ren, J., Zhang, J., & Yi, Y. (2025). The influence of annealing temperature on the microstructure and performance of cold-rolled high-conductivity and high-strength steel. *Crystals*, 15(5), 469. <https://doi.org/10.3390/cryst15050469>
7. Krimpelstätter, K., Bergmann, M., & Pröll, C. (2016). Primetals lubrication expertise boosts new innovation in hot and cold rolling. *10th International Rolling Conference* (pp. 35–39). Graz, Austria.

8. Krimpelstätter, K., & Flaxa, A. (2013). Minimum quantity roll-gap lubrication system – field of large potential to reduce your OPEC. *AISTech 2013 Proceedings* (pp. 1655–1662). Warrendale, PA.
9. Antonicelli, M., Liuzzo, U., & Palumbo, G. (2023). Evaluation of the effect of a natural-based emulsion on the cold rolling process. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7 (4), 121. <https://doi.org/10.3390/jmmp7040121>
10. Montmitonnet, P., Bouadjadja, N., Luong, L., Bertrandie, J., & Dietsch, H. (2018). On the mechanism by which chromium improves strip surface cleanliness in steel strip cold rolling. *Key Engineering Materials*, 767, 240–247. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.767.240>
11. Jacobs, L., Vervaeet, B., Hermann, H., Agostini, M., Kurzynski, J., Jonsson, N., et al. (2011). Improving strip cleanliness after cold rolling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 225(9), 959–969. <https://doi.org/10.1177/1350650111413639>
12. De Mello, J., Gonçalves, J., & Costa, H. (2013). Influence of surface texturing and hard chromium coating on the wear of steels used in cold rolling mill rolls. *Wear*, 302, 1295–1309. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.02.006>
13. Simão, J., & Aspinwall, D. (1999). Hard chromium plating of EDT mill works rolls. *Journal of Materials Processing Technology*, 92–93, 281–287. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00124-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00124-7)
14. Deltombe, R., Dubar, M., Dubois, A., & Dubar, L. (2003). A new methodology to analyse iron fines during steel cold rolling processes. *Wear*, 254, 211–221. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00005-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00005-X)
15. Huart, S., Dubar, M., Deltombe, R., Dubois, A., & Dubar, L. (2004). Asperity deformation, lubricant trapping and iron fines formation mechanism in cold rolling processes. *Wear*, 257, 471–480. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.01.012>
16. Zelinski, P. (1998). Keep your coolant in circulation. *Modern Machine Shop*, 70 (12), 96–98.

Стаття надійшла: 11.08.2025

Стаття прийнята: 04.09.2025

Опублікована: 10.11.2025

