

УДК 621.771

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-17>

ПРОМИСЛОВІ ВИПРОБУВАННЯ ПРОКАТНИХ ЕМУЛЬСОЛІВ В УМОВАХ ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ» ДЛЯ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОДУКТУ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРИЙОМІВ РОБОТИ З ПРОКАТНОЮ ЕМУЛЬСІЄЮ

Спічак Олександр Юрійович,

начальник відділу холодної прокатки дирекції з технології та якості

Публічного акціонерного товариства

«Запорізький металургійний комбінат “Запоріжсталь”»

ORCID ID: 0009-0004-9653-437X

Кухар Володимир Валентинович,

доктор технічних наук, професор,

проректор з науково-дослідної роботи

професор кафедри металургії, матеріалознавства і організації виробництва

ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-4863-7233

Широкобоков Віталій Володимирович,

кандидат технічних наук,

доцент кафедри обробки металів тиском,

Національного університету «Запорізька політехніка»

ORCID ID: 0000-0003-4294-7406

У статті представлено результати дослідно-промислових випробувань 22 марок прокатних емульсолів на металургійному комбінаті ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ». Основна мета роботи – визначити оптимальні параметри використання прокатних емульсій при холодному прокатуванні низьковуглецевих сталей, зокрема зниження забрудненості поверхні штаби, покращення чистоти поверхні після кожного технологічного переділу та мінімізація дефектів, що виникають під час відпалу й дресування. У роботі детально описується розроблена методика проведення промислових випробувань емульсолів, включно з етапами добору проб концентрату, очищення обладнання, а також аналізом змін концентрації емульсії та вмісту механічних домішок. Особлива увага приділяється впливу емульсолів на зношування валків, стабільність навантажень на двигуни та якість готового прокату. У процесі дослідження розроблено та затверджено технологічні вимоги до прокатних емульсолів, які стали основою для взаємодії з виробниками мастильних матеріалів. Важливим аспектом роботи є вивчення схильності емульсії до утворення коксових залишків після відпалу та розробка рекомендацій щодо зменшення кількості механічних домішок у прокатних емульсіях. Отримані результати дали змогу покращити процес виробництва холоднокатаного прокату, підвищити його якість та знизити собівартість завдяки оптимізації роботи з емульсіями. Стаття також містить накопичені дані щодо забрудненості прокату й пропозиції щодо подальшого вдосконалення технологічних процесів на основі проведених випробувань.

Ключові слова: емульсол, дослідно-промислові випробування, забрудненість прокату, час роботи емульсії, концентрація емульсії, рівень механічних домішок.

Spichak Oleksandr, Kukhar Volodymyr, Shyrokobokov Vitaliy. Industrial Trials of Rolling Emulsols at PJSC “Zaporizhstal” to Select the Optimal Product and Improve Technological Methods of Working with Rolling Emulsions

The article presents the results of experimental-industrial trials of 22 brands of rolling emulsions at the metallurgical plant PJSC “ZAPORIZHSTAL”. The primary goal of the study was to determine optimal parameters for using rolling emulsions in cold rolling, focusing on reducing strip surface contamination, improving surface cleanliness after each technological stage, and minimizing defects during annealing and tempering. The paper describes in detail the developed methodology for conducting industrial tests of emulsions, including the stages of concentrate sampling, equipment cleaning, and analysis of changes in emulsion concentration and the content of mechanical impurities. Special attention is given to the influence of emulsions on roll wear, motor load stability, and the quality of the finished rolled product. The study also led to the formulation and approval of technical requirements for rolling emulsions, which serve as a basis for collaboration with lubricant manufacturers. A significant aspect of the work is the examination

of emulsions' tendency to form coking residues after annealing and the development of recommendations to reduce the number of mechanical impurities in the rolling emulsions. The findings from these trials enabled improvements in the cold rolling process, enhancing product quality and reducing costs by optimizing emulsion management. The article also provides accumulated data on product contamination and offers suggestions for further improvements in technological processes based on the trial results.

Key words: rolling emulsion, industrial trials, product contamination, emulsion working time, emulsion concentration, mechanical impurity levels.

Вступ. Від якості прокатної емульсії залежить якість поверхні холоднокатаного прокату, наявність на ньому поверхневих забруднень у вигляді сажі, пригару емульсії, плям забруднення [1]. З метою зниження коефіцієнта тертя та енергосилових параметрів, поліпшення чистоти поверхні прокату, зменшення утворення дефектів холоднокатаного прокату на комбінаті «Запоріжсталь» випробовують емульсоли різних виробників [2–3]. У цеху холодного прокату ПАТ «Запоріжсталь» емульсол застосовують:

- для промаслювання травленого гарячекатаного підкату (емульсол наносять при змотуванні рулону в моталку на БТА-4 за допомогою машини електростатичного промаслювання);
- на станах холодної прокатки (безперервному чотирикільтовому стані та реверсивних станах 1680 та 1200). На станах холодної прокатки емульсол застосовують у вигляді розчину (емульсол розбавляється в демінералізованій або технічній воді в концентрації 1,5–3,0 %).

Для умов кожного конкретного виробництва, з урахуванням складу технологічного обладнання, виробником прокатного емульсолу розробляється свій тип та марка емульсолу. Вибір параметрів високоякісної емульсії для конкретного прокатного стану є складним завданням, яке вимагає всебічного аналізу умов технологічного процесу. Це передбачає добір складу емульсії, попередню оцінку в лабораторних умовах, а також тривалі виробничі випробування з контролем різних показників процесу та якісних характеристик прокату [4–7]. Низка показників технологічного мастила остаточно може бути визначена тільки у виробничих умовах: схильність до утворення дефектів, вплив на якість поверхні, довговічність в експлуатації. Основною вимогою мастила для холодної прокатки є охолоджувальна здатність, а також повне вигорання масла під час відпалу за 500 °С.

Немає таких емульсій, які б повністю згорали або випаровувалися під час відпалу, не залишаючи жодних коксових залишків на поверхні металу. Можна говорити лише про порівняльну величину коксових залишків [8]. З огляду на це, крім вибору типу емульсолу, необхідно приділяти велику увагу питанням видалення емульсії

з поверхні штаб, що виходять з останньої кліти стану, та дотримуватися встановлених технологічних параметрів експлуатації прокатної емульсії, як-от концентрація, уміст механічних домішок та гідравлічних масел [9–12]. Установлено, що основним фактором, який визначає забрудненість поверхні прокату, є концентрація прокатного масла в емульсії. З погляду коефіцієнта витяжки, автори роботи [13] рекомендують підтримувати концентрацію емульсії на рівні 2–5 %. При цьому є можливість зниження концентрації емульсолу без погіршення якості прокату, якщо використовувати високоефективні прокатні емульсоли з високим числом омилення [14].

При збільшенні концентрації механічних домішок в емульсії, спостерігається погіршення відбивної здатності поверхні прокату після стану. Погіршення чистоти поверхні прокату пов'язане не зі збільшенням вмісту заліза в емульсії як таким, а з тим, що збільшення вмісту заліза в емульсії є наслідком погіршення умов прокатки, що призводить до збільшення зносу валків і штаби, а також до збільшення кількості частинок заліза на штабі [15–18].

Мета статті – у промислових умовах розробити методику випробувань прокатних емульсолів, визначити з них оптимальний для конкретних заданих умов та на основі результатів випробувань сформулювати основні технологічні прийоми роботи з прокатною емульсією.

Матеріали та методи дослідження. Задля вибору оптимального емульсолу на реверсивному стані 1680 ПАТ «Запоріжсталь» випробувано 22 види емульсолів, пройшли випробування на реверсивному стані та випробувані на стані «Тандем» 14 з них. За результатами цих промислових випробувань побудовано графіки зміни концентрації емульсії та мехдомішок, проаналізовано величину забрудненості холоднокатаного прокату на кожному з переділів та досліджено вплив прокатного емульсолу на спрацьовування прокатних валків.

Для проведення промислових випробувань прокатних емульсолів розроблено спеціальну, єдина для всіх продуктів методику, яка передбачає такі стадії:

1. При надходженні на комбінат дослідного емульсолу відбирається проба концентрату

для проведення лабораторних досліджень фізико-хімічних показників та визначення відповідності вимогам нормативної документації на емульсол.

2. Перед початком проведення дослідно-промислових випробувань дослідного емульсолу картер, обладнання та емульсійна система прокатного стану ретельно очищаються від забруднень і промиваються (з використанням розчину мийного засобу). Устаткування ретельно оглядається щодо виявлення витоків масла з гідравлічних систем. У разі виявлення витоків сторонніх олив в емульсійну систему стану проведення дослідно-промислових випробувань до усунення цих витоків не допустиме.

3. Після холодної прокатки від дослідних рулонів проводиться відбір проб металу для визначення забрудненості поверхні прокату та шорсткості.

4. Відпал дослідних рулонів проводиться в печах з HNx -газом. Не допускається доукомплектування дослідного відпалу рулонами, прокатаними на різних емульсолах. Холоднокатані рулони, від яких відбираються проби на забрудненість, установлюються у відпалі в те саме місце (першими) по висоті стопи.

5. Під час дресування від дослідних рулонів відбирають проби на забрудненість до та після дресування й на шорсткість.

Під час випробувань також оцінюються всі основні технологічні параметри емульсолу:

- 1) відсортуння за дефектами;
- 2) стабільність (відсутність різких коливань) навантажень на двигуни клітей стану та товщини штаби під час прокатки;
- 3) наявність налипання бруду на ролики прокатного стану;
- 4) здатність нанесення емульсолу в електростатичному промаслювальнику БТА-4;
- 5) чистота поверхні готового прокату;
- 6) передчасний вихід з ладу робочих валків з огляду на сколи.

За результатами випробувань також оцінюється витрата та економічна доцільність використання кожної марки емульсолу.

Результати. За результатами роботи отримано статистичні дані щодо забрудненості прокату, зміни технологічних параметрів (концентрації, вмісту механічних домішок та витоків гідравлічного масла) прокатної емульсії та зміни шорсткості валків останньої кліті безперервного стану залежно від напрацювання на валках.

У результаті аналізу отриманих даних забрудненості прокату зроблено такі висновки:

- для прокату, виробленого на реверсивному стані, середній коефіцієнт зниження

забрудненості від прокатки до відпалу становить 2,41 (завдяки вигорянню жирового складника та вигорянню частини механічних домішок), від відпалу до дресування – 1,88 (завдяки облітанню механічного пилу під час дресування), загальний – 4,52;

- для прокату, виробленого на безперервному стані «Тандем», середній коефіцієнт зниження забрудненості від прокатки до відпалу становить 3, від відпалу до дресування – 1,65, загальний – 5,1;

- чіткої залежності рівня забрудненості прокату від показника числа омилень прокатного емульсолу не встановлено.

За результатами аналізу отриманих відсортуння прокату за дефектами «пригар», «плями забруднення» та технологічних параметрів прокатної емульсії побудовано графіки зміни концентрації емульсії та механічних домішок у процесі кампанії з експлуатації прокатної емульсії (типові графіки наведено на рис. 1–8), з яких випливає:

- після 150 годин роботи різко зростає кількість накопичених механічних домішок у прокатній емульсії, після цього терміну емульсія потребує оновлення. Таке оновлення за результатами випробувань регламентовано проводити через кожні 150 годин роботи емульсії (проводиться шляхом перекачування в чистий бак $\frac{3}{4}$ емульсії та видалення брудного осаду $\frac{1}{4}$ бака). Під час роботи емульсії на стані «Тандем» понад 400 годин при оновленнях немає різкого зниження кількості механічних домішок, що негативно впливає на утворення поверхневих забруднень при відпалі. Тому максимальний час роботи прокатної емульсії на стані «Тандем» встановлено 400 годин. На реверсивному стані граничний час роботи емульсії встановлено 300 годин (на реверсивному стані 1680 менший обсяг емульсійної системи, ніж на чотирикільтьового стану «Тандем», та менш ефективна система очищення емульсії);

Зміна концентрації та механічних домішок у період проведення випробувань емульсолів на реверсивному стані 1680 (рис. 1–4).

Зміна концентрації та механічних домішок у період проведення випробувань емульсолів на безперервному чотирикільтьовому стані «Тандем» (рис. 5–8).

- з графіків видно різкі коливання концентрації та механічних домішок у процесі прокатки – це зумовлено малим об'ємом емульсійної системи реверсивного стану 1680 – 13 м^3 (як і стану «Тандем» – 36 м^3). Для того щоб забезпечити виконання заданих параметрів емульсії у встановлених діапазонах, встановлено

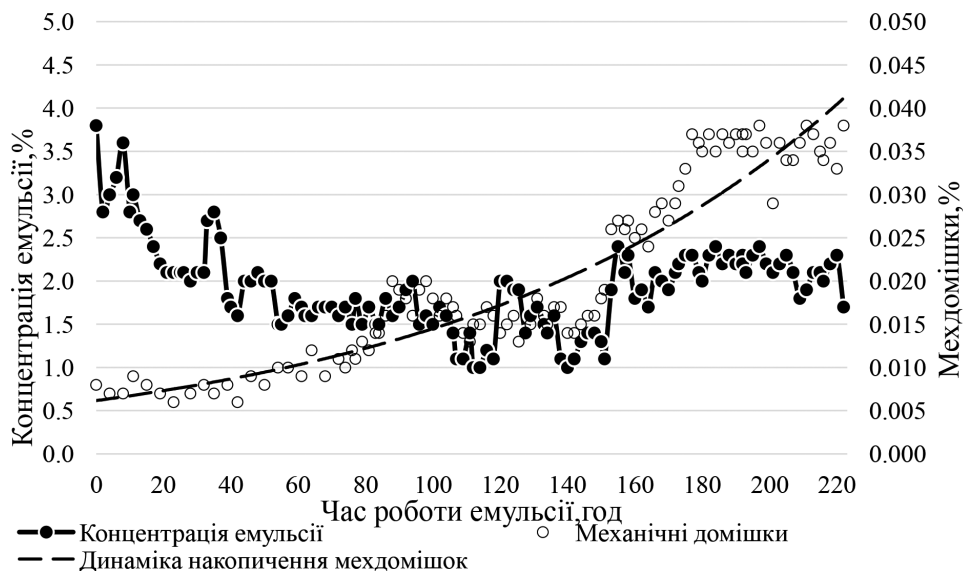


Рис. 1. Випробування емульсолу LUBRO DL ZPS на реверсивному стані 1680

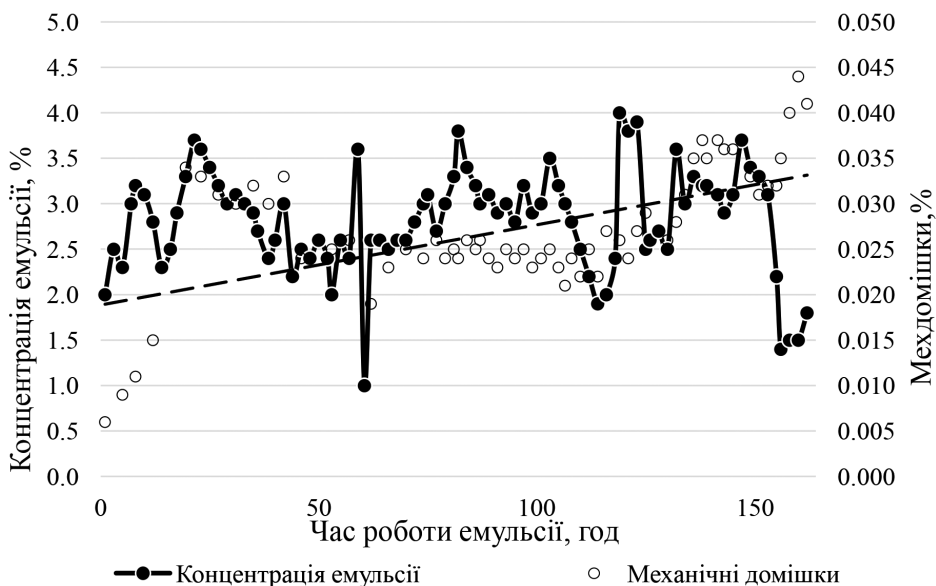


Рис. 2. Випробування емульсолу ROLLUB 988-AR на реверсивному стані 1680

періодичність відбору проб на концентрацію емульсії кожні 2 години, на мехдомішки – кожні 4 години. Періодичність аналізу для визначення витоків у прокатній емульсії встановлено на реверсивному стані раз на тиждень, на стані «Тандем» – тричі на тиждень (такий аналіз виконується близько трьох годин, відрізняється високою трудомісткістю, тому встановлено максимальну частоту з урахуванням можливостей лабораторії).

– після деяких перевалок опорних валків прокатного стану з чищенням картера відзначено різкий сплеск умісту механічних домішок у прокатній емульсії і, як наслідок, наявність

відсортуння прокату по плямах забруднення в цей період. Це відбувалося через попадання в трубопроводи бруду, накопиченого в картерах під час їх чищення. Щоб усунути вплив цього чинника на якість прокату, ухвалено рішення проводити циркуляцію емульсії через очисну систему після чищення картера протягом не менш ніж 2 години після очищення картерів до пуску стану в роботу. Система очищення емульсії при цьому прибирає всі забруднення, що потрапили в трубопровід. Також для виключення попадання бруду в трубопровід і далі в емульсійну систему встановлено спеціальний порядок очищення обладнання, за

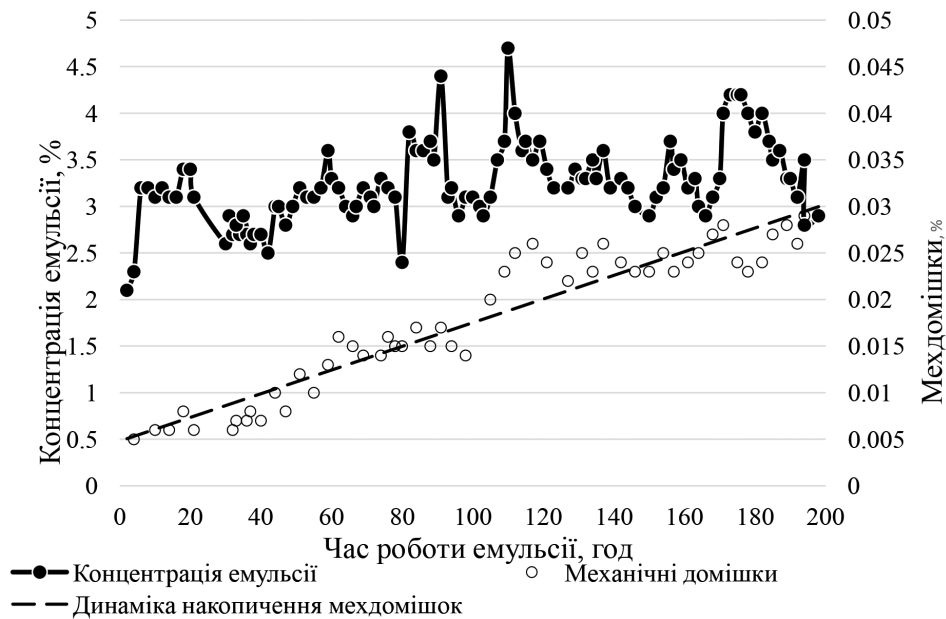


Рис. 3. Випробування емульсолу «ОПТИМАЛ-ПРО» на реверсивному стані 1680

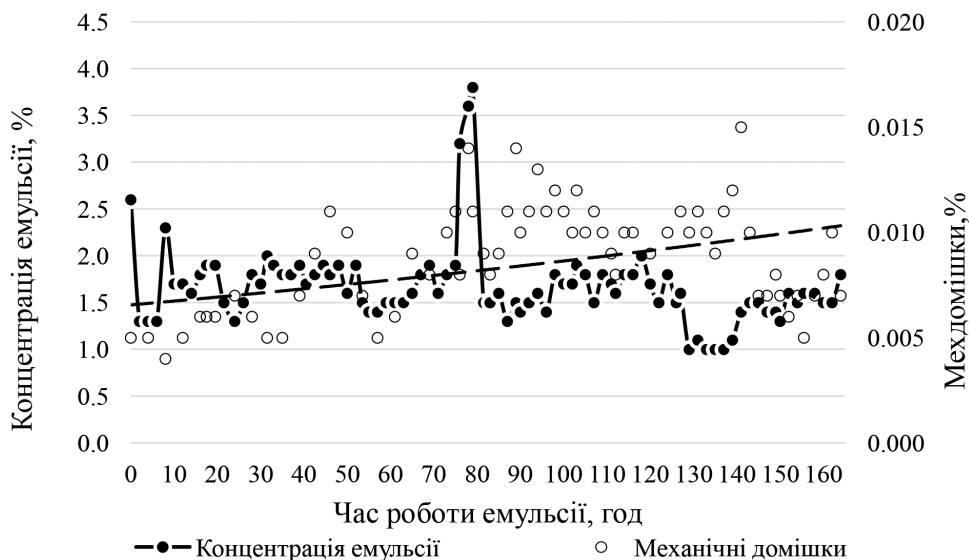


Рис. 4. Випробування емульсолу TRENOIL S740 на реверсивному стані 1680

якого бак-відстійник, розташований між зливом емульсії з картера й емульсійним баком, чистили тільки після чищення картерів стану, оскільки піднятий з картера бруд через трубопровід стікає в бак-відстійник та знову забруднює емульсію.

— також під час випробувань установлено підвищене відсорткування по плямах забруднень на рулонах, прокатаних відразу після запуску прокатного стану після тривалого простою. Це відбувалося через те, що за простої емульсії в баку прокатного стану частково розшаровувалася й на штабу потрапляли незаемульговані краплі емульсолу. Для усунення цього впливу перед

запуском стану емульсію розігрівали парою до 45 °С та ставили на циркуляцію задля її перемішування. Під час стоянок регламентовано постійно перемішувати прокатну емульсію за великим контуром (через прокатний стан та емульсійний колектор з насосом) для забезпечення кращої якості перемішування емульсії та виключення критичного перегріву емульсії вище 65 °С;

— для зниження витрати емульсолу при стоянках стану з ввімкненою системою очищення емульсії регламентовано проводити кантування очисних ванн раз на 4 години для економії емульсолу (при роботі стану кантування очисних ванн проводиться кожні 2 години);

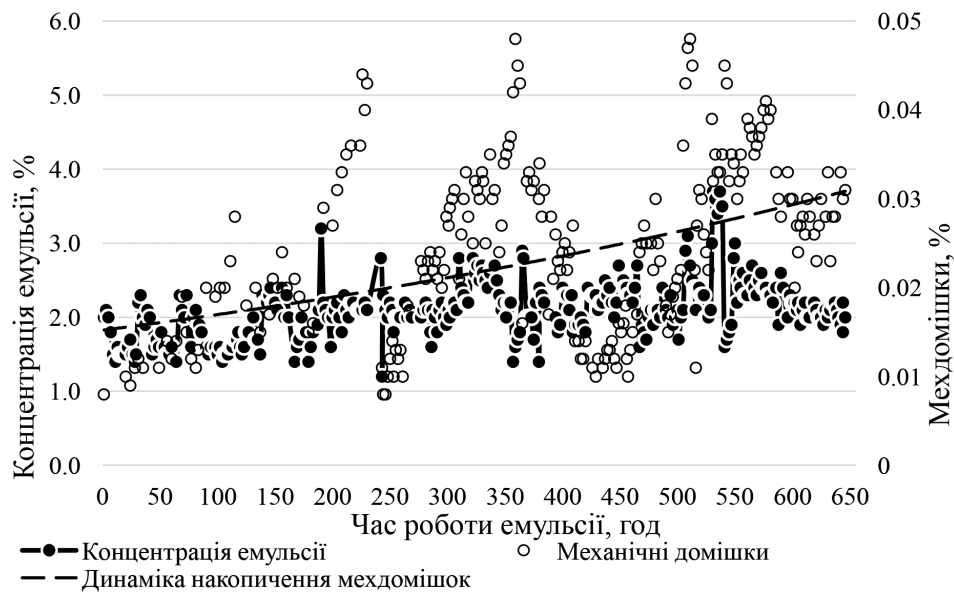


Рис. 5. Випробування емульсолу LUBRO DL ZPS на безперервному чотирикільтьовому стані «Тандем»

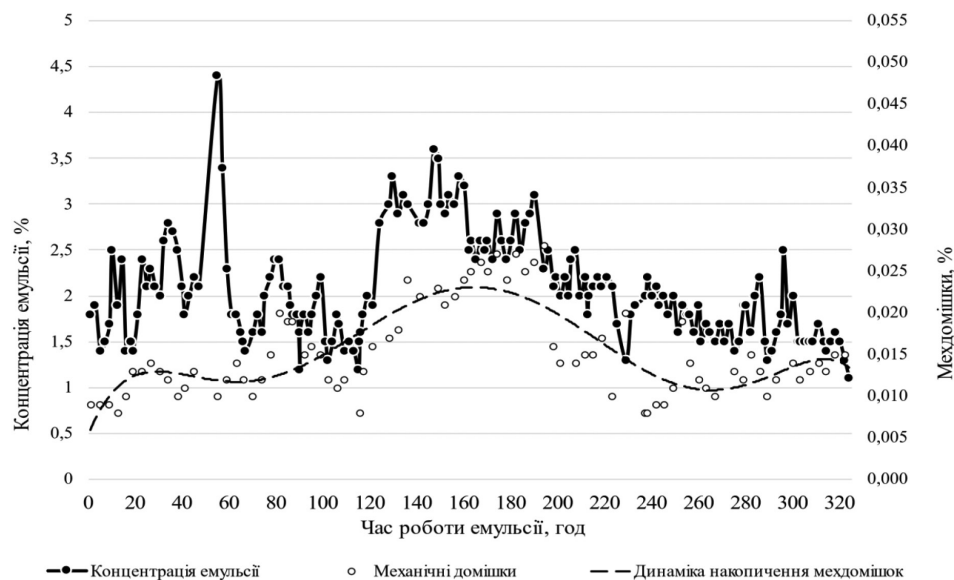


Рис. 6. Випробування емульсолу ROLLUB 988 – AR на безперервному чотирикільтьовому стані «Тандем»

— практично встановлено, що при рівні витоків гідравлічних масел 50 % та вище різко зростає відсортуння прокату за дефектом «пригар емульсії». У разі отримання кількості витоків гідравлічних масел на рівні 41–50 %, рекомендовано проводити часткову заміну емульсії – не менш ніж 50% загального об'єму емульсії, при отриманні кількості витоків понад 50 % – проводити повну заміну технологічної емульсії;

— на рисунку 8 показано, що в разі накопичення мехдомішок в емульсії 0,04 % і більше спостерігається сплеск відсортуння за дефектом «плями забруднення». Для уникнення

цього запропоновано при накопиченні емульсією механічних домішок у кількості 0,040 % і більше проводити контроль рівня емульсії в баку і за необхідності вживати оперативних заходів щодо його відновлення. Кантування очисних ванн системи очищення емульсії проводити щогодини до зниження мехдомішок до рівня нижче 0,035 %;

— під час випробувань також визначено, що через неповне емульгування прокатного емульсолу в період його добавок чи приготування нової емульсії можливе утворення дефекту «пригар емульсії». Візуально в процесі холодної прокатки цього не видно, але

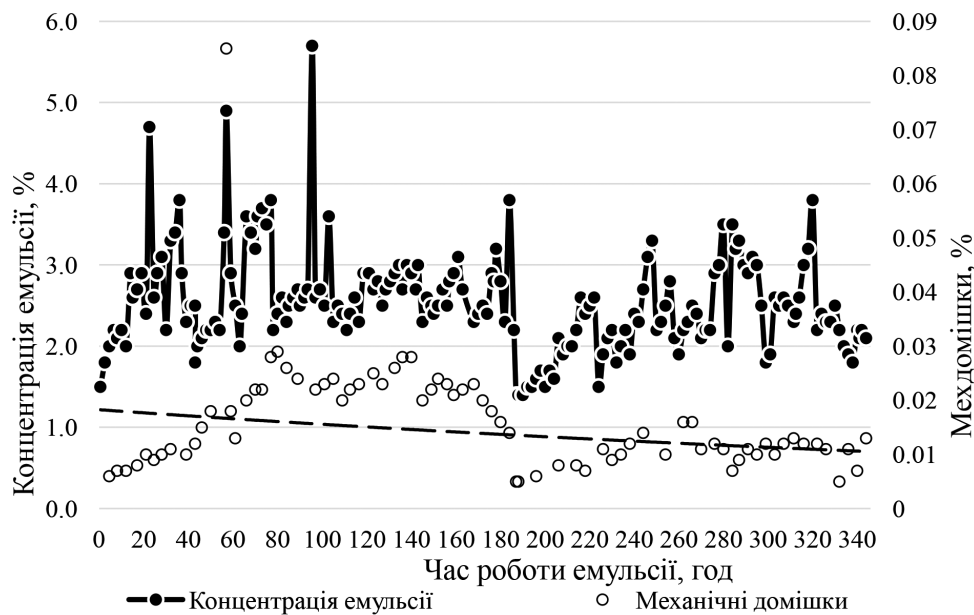


Рис. 7. Випробування емульсолу «ОПТИМАЛ-ПРО» на безперервному чотирикільтовому стані «Тандем»

Зростання концентрації емульсії та механічних домішок протягом 12 годин (одна зміна) внаслідок падіння рівня емульсії через непрацюючий автодобір води. На рулонах, прокатаних у цю зміну відзначено різке зростання відсортуння за дефектом

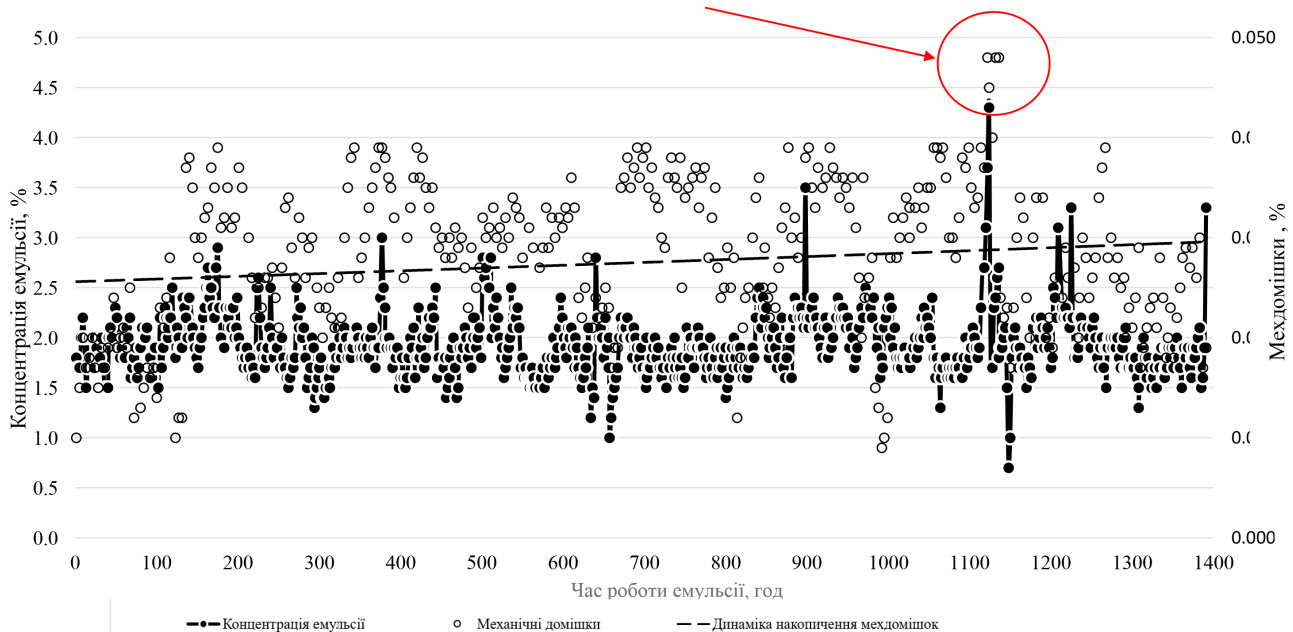


Рис. 8. Випробування емульсолу TRENOIL S740 на безперервному чотирикільтовому стані «Тандем»

не до кінця розчинений концентрат потрапляє в емульсійний колектор, звідки опиняється на штабі. Підвищена кількість емульсолу на штабі призводить до дефекту «пригар емульсії». Щоб усунути вплив цього чинника, розроблено спеціальну технологію додавання емульсії, яка полягає в тому, що кількість додавань емульсолу для підтримки концентрації в зміні мінімізовано (додавання емульсії робили з урахуванням наведення концентрації у 2,7

% з поступовим зниженням її до 1 % в процесі роботи без додавань концентрату), а всі додавання емульсії виробляють у момент перевалок або простоїв стану з перемішуванням емульсії через стан. Це дало змогу скоротити на 20 % кількість знятих із замовлення рулонів через пригари емульсії. Повністю прибрати вплив цього чинника вдалося тільки після установки дозатрону – приладу, який змішує воду з емульсомом і забезпечує рівномірне подання

емульсії в емульсійний бак під час роботи прокатного стану.

У процесі проведених випробувань різних видів емульсолів також досліджували вплив числа омилення (яке характеризує змащувальні якості прокатного емульсолу) на виробку робочих валків прокатного стану (яку оцінювали по зміні шорсткості штаби, а відповідно й валків, протягом однієї кампанії роботи). Усього побудовано 12 таких залежностей на різних видах емульсолів. На рис 9–12 наведено типові графіки, які характеризують залежність шорсткості штаби після холодної прокатки залежно від напрацювання на робочих валках кліті № 4 на різних типах емульсолів з різним

числом омилення. Проби на вимірювання шорсткості штаби відбирали після холодної прокатки на стані «Тандем» протягом однієї й тієї ж кампанії робочих валків залежно від напрацювання на валках. Із цих залежностей можна дійти висновку, що при використанні вискоєфективних емульсолів з високим числом омилення мало змінюється зношування валків прокатного стану, відповідно недоцільно підвищувати напрацювання на робочих валках на іншому виді емульсолу, який, наприклад, має більш високе число омилення.

Висновки. 1. За даними дослідно-промислових випробувань прокатних емульсолів сформовано та документально затверджено основні

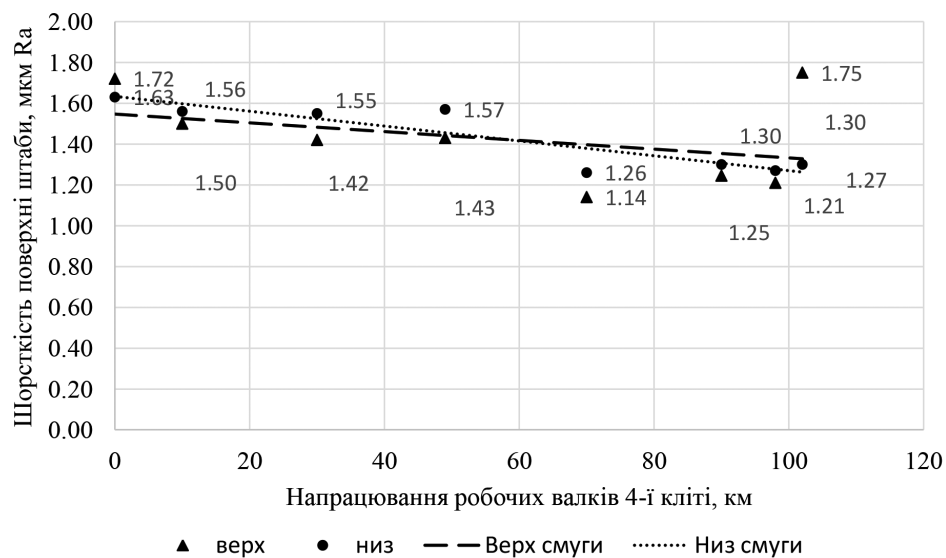


Рис. 9. «Агріол ОМ», число омилення 27 мг КОН/г

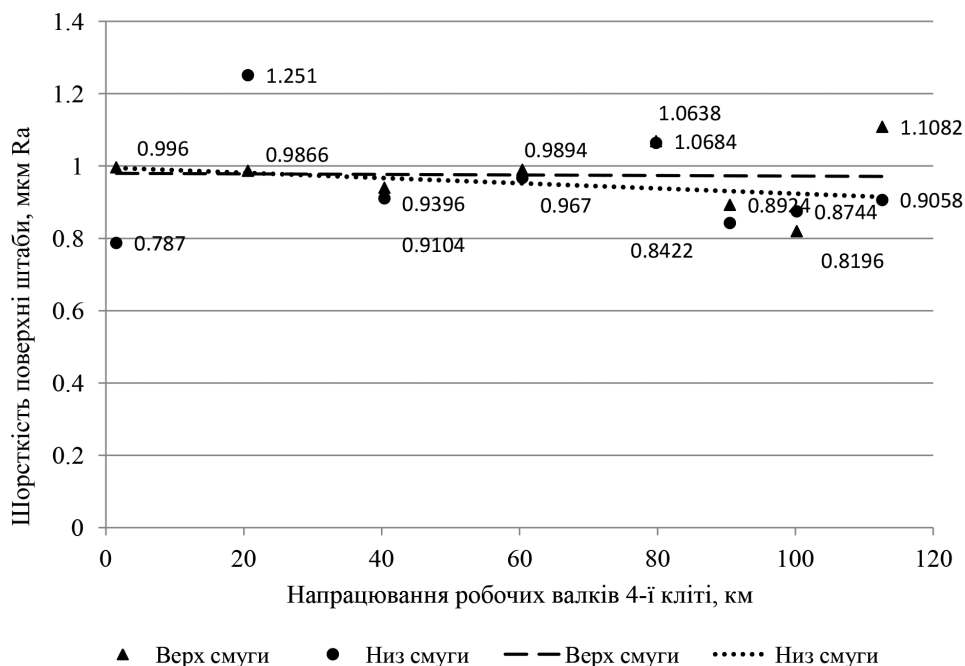


Рис. 10. «Універсал – 1ТС», число омилення 35 мг КОН/г

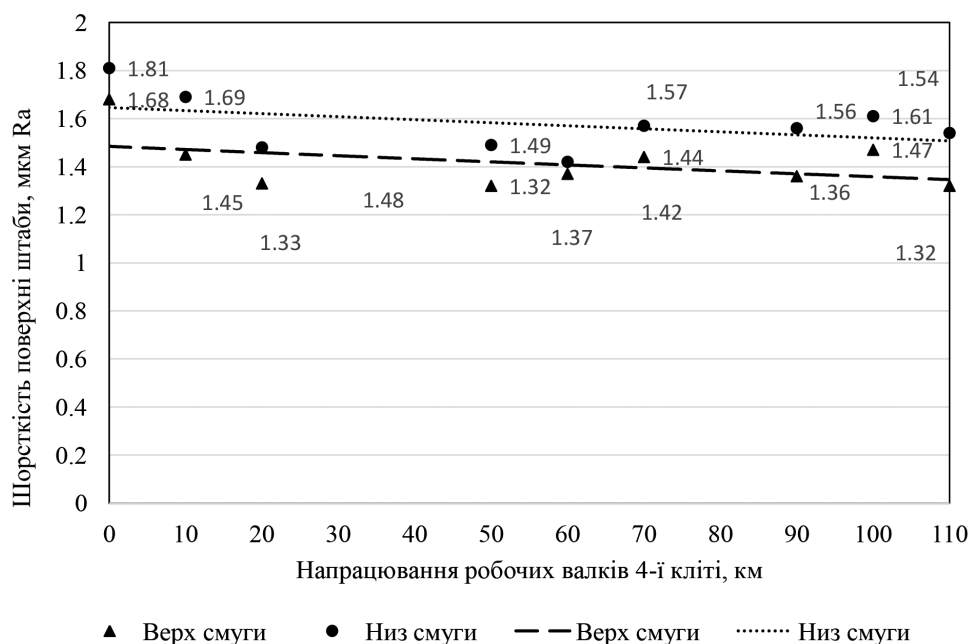


Рис. 11. Quakerol ZAP 3.0, число омилення 174 мг КОН/г

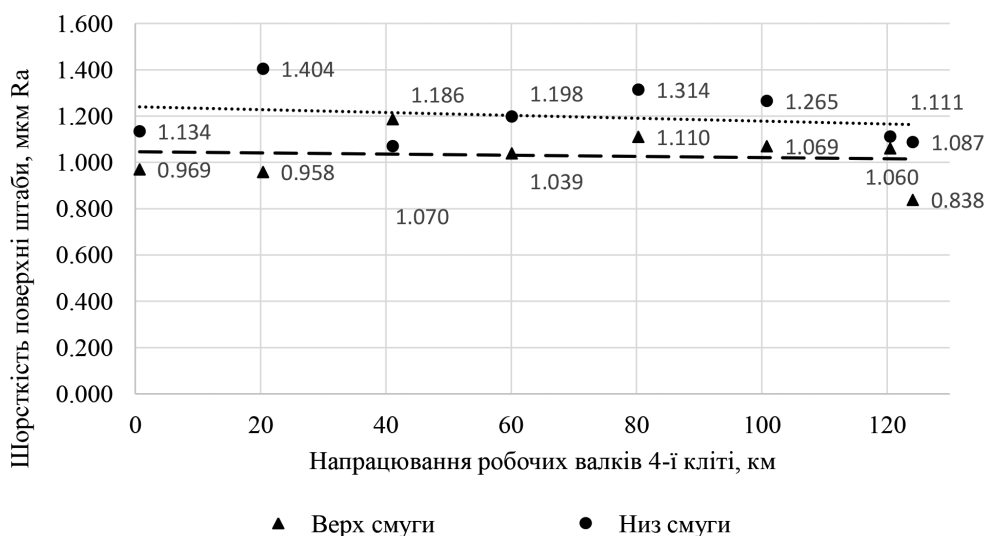


Рис. 12. Rolkleen EP 2744 SCH, число омилення 170 мг КОН/г

технологічні прийоми роботи з прокатними емульсолами. Цими прийомами керуються на виробництві ПАТ «Запоріжсталь» на ділянці прокатних станів. Вибрано до використання 2 найбільш ефективні емульсоли, які відповідають всім вимогам якості в умовах наявного прокатного обладнання.

2. Під час роботи не встановлено значного впливу числа омилення прокатного емульсолу на виробіток валків стана холодної прокатки, відповідно недоцільно підвищувати напрацювання на робочих валках при зміні марки емульсолу, який, наприклад, має більш високе число омилення.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Kukhar V., Malii Kh., Spichak O. Influence of emulsols type on energy-power consumption and surface contamination at DC01 steel cold rolling on the continuous four-stand mill. *Problems of Tribology*. 2022. Vol. 27, No. 4/106-2022. P. 19–26. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-106-4-19-26>
2. Kukhar V., Korenko M., St'opin V., Karmazina I., Elchaninov A., Hurkovska S., Prysiashnyi A., Zubrytskyi V. Operation Modes of Electric Motors of Reversing Cold Rolling Mill 1680 while Rolling with Emulsions. 2019 *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine:

Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, September 23–25, 2019. P. 46–49. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896465>.

3. Kukhar V., Spichak O., Karmazina I., Malii K., Gribkov E., Dobronosov Y. Synthesis Analysis of Energy Intensity Dependence for Tandem Mills Thin-Plate Rolling on Various Grade Emulsols Rheological Properties. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine, 2023. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402500>

4. 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, Issue 4. P. 121. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp7040121>.

5. Shirizly A., Lenard J. G. Emulsions Versus Neat Oils in the Cold Rolling of Carbon Steel Strips. *Journal of Tribology*. 2000. Vol. 122, Issue 3. P. 550–556. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.555400>

6. Wang J., Wan S., Yi G., Yu X., Shan Y. Microstructural Evolution of Emulsion-Lubricated Cold-Rolled Steel Interface. *ACS Applied Engineering Materials*. 2024. Vol. 2, Issue 8. P. 2201–2218. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsaenm.4c00374>

7. Tieu A., Kosasih P. Experimental and numerical study of O/W emulsion lubricated strip rolling in mixed film regime. *Tribology Letters*. 2007. Vol. 25. P. 23–32. <https://doi.org/10.1007/s11249-006-9131-7>

8. Cheremisinoff N. P. *Handbook of Chemical Processing Equipment*. Butterworth-Heinemann, 2000. 576 p.

9. Smeulders B., Zhu B., Song Z., Zhang D., Melsen J., Schellingerhout P. Friction and surface microstructure in steel cold rolling investigated in pilot mill trials. *Iron & Steel Technology*. 2018. Vol. 15, No. 2. P. 60–68.

10. Taheri R. *Cold rolling lubrication efficacy and anti-coalescence stability of composite TiO_2 - SiO_2 nanoparticle-stabilised soybean oil-in-water emulsions*: a thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy from the University of Wollongong: March 2021. Wollongong. 214 p.

11. Krimpelstätter K., Bergmann M., Pröll C. Primetals' lubrication expertise boosts new innovation in hot and cold rolling. *10th International Rolling Conference and 7th European Rolling Conference*, Graz, Austria, June 6–9, 2016. P. 35–39.

12. Krimpelstätter K., Flaxa A. Minimum Quantity Roll-Gap Lubrication System — Field of Large Potential to Reduce Your OPEX. *The Iron and Steel Technology Conference and Exposition: AISTech 2013 Proceedings*, Pittsburgh, 5–9 May, 2013. P. 1655–1662.

13. Radu T., Ciocan A. Behavior of Cold Rolling Emulsions in the Obtaining Process of Steel Strips. *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati*. Fascicle IX. Metallurgy and Materials Science. 2014. № 1. P. 57–63.

14. Василев Я. Д., Замогильний Р. О., Самокиш Д. М. Інженерна методика визначення антифрикційної ефективності емульсолів для холодної прокатки по їх фізико-хімічним властивостям. *Теорія і практика металургії*. 2018. № 6. С. 15–21.

15. Mekicha M. A. *Wear particles formation in cold rolling*. PhD Thesis – University of Twente. Enschede: University of Twente, 2021. 143 p.

16. Sun J. L., Zhang B. T., Dong C. Effects of ferrous powders on tribological performances of emulsion for cold rolling strips. *Wear*. 2017. Vol. 376–377, Part A. P. 869–875. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.012>

17. Dick K., Lenard J. G. 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, Issue 1. P. 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.091>

18. Jin Sh., Li X., Gao H., Wang P., Zhang D. Analysis and Prospects of Lubrication and Friction Characteristics in Cold Strip Rolling: A Review. *Steel Research International*. 2024. <https://doi.org/10.1002/srin.202400258>.

REFERENCES:

1. Kukhar, V., Malii, Kh., & Spichak, O. (2022). Influence of emulsols type on energy-power consumption and surface contamination at DC01 steel cold rolling on the continuous four-stand mill. *Problems of Tribology*, 27(4), 19–26. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-106-4-19-26>

2. Kukhar, V., Korenko, M., St'opin, V., Karmazina, I., Elchaninov, A., Hurkovska, S., Prysiashnyi, A., & Zubrytskyi, V. (2019). Operation modes of electric motors of reversing cold rolling mill 1680 while rolling with emulsions. In *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)* (pp. 46–49). Kremenchuk, Ukraine: Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896465>

3. Kukhar, V., Spichak, O., Karmazina, I., Malii, K., Gribkov, E., & Dobronosov, Y. (2023). Synthesis analysis of energy intensity dependence for tandem mills thin-plate rolling on various grade emulsols rheological

- properties. In *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)* (pp. 1–4). Kremenchuk, Ukraine. <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402500>
4. 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>
5. Shirizly, A., & Lenard, J. G. (2000). Emulsions versus neat oils in the cold rolling of carbon steel strips. *Journal of Tribology*, 122(3), 550–556. <https://doi.org/10.1115/1.555400>
6. Wang, J., Wan, S., Yi, G., Yu, X., & Shan, Y. (2024). Microstructural evolution of emulsion-lubricated cold-rolled steel interface. *ACS Applied Engineering Materials*, 2(8), 2201–2218. <https://doi.org/10.1021/acsaenm.4c00374>
7. Tieu, A., & Kosasih, P. (2007). Experimental and numerical study of O/W emulsion lubricated strip rolling in mixed film regime. *Tribology Letters*, 25, 23–32. <https://doi.org/10.1007/s11249-006-9131-7>
8. Cheremisinoff, N.P. *Handbook of Chemical Processing Equipment*. Butterworth-Heinemann, 2000. 576 p.
9. Smeulders, B., Zhu, B., Song, Z., Zhang, D., Melsen, J., & Schellingerhout, P. (2018). Friction and surface microstructure in steel cold rolling investigated in pilot mill trials. *Iron & Steel Technology*, 15(2), 60–68.
10. Taheri, R. (2021). Cold rolling lubrication efficacy and anti-coalescence stability of composite TiO₂-SiO₂ nanoparticle-stabilized soybean oil-in-water emulsions [PhD thesis]. University of Wollongong.
11. Krimpelstätter, K., Bergmann, M., & Pröll, C. (2016). Primetals' lubrication expertise boosts new innovation in hot and cold rolling. In *10th International Rolling Conference and 7th European Rolling Conference* (pp. 35–39), Graz, Austria.
12. Krimpelstätter, K., & Flaxa, A. (2013). Minimum quantity roll-gap lubrication system — Field of large potential to reduce your OPEX. In *The Iron and Steel Technology Conference and Exposition: AISTech 2013 Proceedings* (pp. 1655–1662), Pittsburgh, PA.
13. Radu, T., Ciocan, A. (2014). Behavior of Cold Rolling Emulsions in the Obtaining Process of Steel Strips. *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle IX. Metallurgy and Materials Science*, (1), 57–63.
14. Vasilev, Y.D., Zamohilny, R.O., & Samokysh, D.M. (2018). Inzhenerna metodyka vyznachennia antyfriksiinoi efektyvnosti emul'soliv dlia kholodnoi prokatky po yikh fizyko-khimichnym vlastyvoostiam [Engineering Method for Determining the Anti-Friction Efficiency of Emulsols for Cold Rolling Based on Their Physico-Chemical Properties]. *Teoriia i praktyka metalurhii – Theory and Practice of Metallurgy*, (6), 15–21. [in Ukrainian].
15. Mekicha, M.A. (2021). *Wear particles formation in cold rolling* [PhD thesis]. University of Twente.
16. Sun, J. L., Zhang, B. T., & Dong, C. (2017). Effects of ferrous powders on tribological performances of emulsion for cold rolling strips. *Wear*, 376–377, 869–875. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.012>
17. Dick, K., & Lenard, J. G. (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(1), 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.091>
18. Jin, S., Li, X., Gao, H., Wang, P., & Zhang, D. (2024). Analysis and prospects of lubrication and friction characteristics in cold strip rolling: A review. *Steel Research International*. <https://doi.org/10.1002/srin.202400258>