

В.В. Кухар¹, д-р техн. наук, професор, проректор з науково-дослідної роботи, проф. кафедри металургії та організації виробництва, e-mail: kvv.mariupol@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4863-7233>

О.Ю. Спічак^{1,2}, аспірант¹, начальник відділу холодного прокату технічного управління²,
e-mail: oleksandr.spichak@mipolytech.education, <https://orcid.org/0009-0004-9653-437X>

¹ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» (Запоріжжя, Україна)

²ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ» (Запоріжжя, Україна)

Регресійний аналіз накопичення механічних домішок у прокатних емульсіях та алгоритм прогнозування рівня їх забрудненості

Вступ. Якість та ступінь забруднення прокатних емульсій є визначальними для формування чистоти поверхні холоднокатаного прокату, стабільності процесу деформації та ресурсу мастильно-охолоджувальної рідини. Водночас закономірності накопичення механічних домішок у промислових емульсіях вивчені недостатньо, що ускладнює побудову інженерних моделей прогнозування їхнього ресурсу.

Методи. На базі лабораторних і дослідно-промислових випробувань емульсолів Azmol Delta mark 1, Lubro DL ZPS, Quakerol Zap 4.0/5.0, Rollub 988-AR, Trenoil S740, Оптимал Про та інших, що застосовуються на стані «Тандем» та реверсивному стані 1680 ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ», виконано багатофакторний регресійний аналіз залежності вмісту механічних домішок від часу роботи емульсії та її концентрації. Додатково проаналізовано вплив числа омилення на коефіцієнти регресійних рівнянь, із використанням як стандартних інструментів Microsoft Excel, так і генеративного штучного інтелекту як допоміжного засобу пошуку апроксимацій.

Результати. Показано, що для більшості досліджених емульсолів забруднення описується лінійною моделлю з коефіцієнтами детермінації $R^2 \approx 0,58-0,91$; середній темп приросту вмісту механічних домішок становить $(1,2-3,0) \cdot 10^{-4}$ %/год. Виявлено компенсувальний або підсилювальний вплив концентрації залежно від марки емульсолу, а також істотну роль типу стану й наявності систем очищення. Побудовано узагальнені залежності параметрів регресії від числа омилення та встановлено відсутність універсального оптимуму N для мінімізації забруднення.

Обговорення. На основі отриманих моделей сформовано алгоритм інженерного контролю стану прокатної емульсії, який дозволяє розраховувати граничний час роботи до досягнення допустимого рівня забруднення, коригувати концентрацію емульсії та оптимізувати інтервали часткового оновлення робочої рідини для станів різного типу. Це створює підґрунтя для впровадження адаптивного моніторингу мастильно-охолоджувальних рідин, підвищення ефективності систем очищення та зниження витрати емульсолів без погіршення якості холоднокатаного прокату.

Ключові слова: прокатна емульсія; механічні домішки; холодна прокатка; регресійна модель; число омилення; система очищення емульсії.

Вступ. Якість прокатної емульсії є одним із ключових чинників стабільності процесу холодної прокатки, що забезпечує мастильно-охолоджувальну дію у зоні деформації. У ході тривалої експлуатації емульсійна

система зазнає накопичення механічних домішок — частинок окалини, абразивів та залишків мастил [1—4], що призводить до зміни її реологічних властивостей, зниження ефективності мастильної плівки та підвищення шорсткості поверхні прока-

ту. Контроль концентрації емульсії, кислотного числа (числа омилення), вмісту механічних домішок та своєчасне очищення є критичними для запобігання дефектам поверхні металу й підвищення ресурсу технологічної рідини, на різних підприємствах застосовуються власні методи керування показниками прокатної емульсії — від простого порогового контролю концентрації та забрудненості до багатопараметричних регламентів з періодичними оновленнями.

Вибір параметрів високоякісної емульсії для конкретного прокатного стану є складним завданням, яке вимагає всебічного аналізу умов технологічного процесу. Це включає підбір складу емульсії, попередню лабораторну оцінку, а також тривалі виробничі випробування з контролем різних показників процесу та якісних характеристик одержуваного прокату [5—9]. Низку показників технологічної емульсії можна остаточно визначити тільки у виробничих умовах, зокрема, схильність до утворення дефектів, вплив на якість поверхні, довговічність в експлуатації. Від марки емульсолу відповідно залежать і технологічні параметри емульсії, основні з яких: концентрація емульсії та час її експлуатації до повної заміни. Значний вплив на чистоту поверхні та утворення дефектів холоднокатаного прокату має також ефективність очищення прокатної емульсії [5, 10—15].

У низці робіт [6—9, 11, 14, 15] досліджено вплив складу емульсій, режимів холодної прокатки та параметрів мастильно-охолоджувальних систем на силу тертя, шорсткість поверхні та схильність до дефектів. Показано, що вибір марки емульсолу, концентрації та температурного режиму істотно впливає на чистоту поверхні та стабільність процесу. Роботи [10—13] зосереджені на вдосконаленні систем очищення емульсій та зниженні забрудненості прокатних мастил, однак зазвичай використовують пороговий контроль показників або якісні критерії оцінки стану емульсії без побудови кількісних моделей її «старіння» у часі.

Відомі дослідження з холодної прокатки зосереджуються переважно на впливі складу емульсій, режимів деформації та параметрів мастильно-охолоджувальних систем на силу тертя, шорсткість поверхні та виникнення дефектів. У доступній літературі наявні роботи, що описують особливості зношування, поведінку мастильної плівки, ефективність очищення та деградацію емульсійних систем у процесі експлуатації.

Водночас кількісні моделі, які б відтворювали кінетику накопичення механічних домішок у промислових емульсіях та дозволяли би пов'язати параметри цих моделей із маркою та фізико-хімічними характеристиками емульсолів (зокрема числом омилення), практично не розроблені. Саме тому інженерні рішення щодо вибору концентраційних режимів, оцінки ресурсу емульсії та її часткового оновлення найчастіше базуються на емпіричних або локальних регламентах підприємств.

Постановка проблеми. У сучасній практиці холодної прокатки керування станом прокатних емульсій здебільшого ґрунтується на порогово-

му контролі окремих показників (концентрації, забрудненості, кислотного числа) та емпіричних регламентах оновлення робочої рідини. Кількісні моделі, які б описували кінетику накопичення механічних домішок у промислових емульсіях з урахуванням часу їх роботи, концентрації та фізико-хімічних характеристик емульсолу, практично відсутні. Це ускладнює обґрунтоване планування режимів часткового оновлення (bleed-and-feed), вибір раціональних концентраційних інтервалів, оцінку ресурсу емульсії та оптимізацію роботи систем очищення для станів різного типу.

У зв'язку з цим постає задача розроблення підходу, який забезпечить кількісну оцінку процесу забруднення емульсій та дозволить інтегрувати результати в інженерні процедури моніторингу. Для її розв'язання необхідно:

— побудувати регресійні моделі виду $Y = f(t, C)$ для низки промислових емульсолів, що відображають залежність вмісту механічних домішок Y від часу роботи емульсії t та її концентрації C ;

— оцінити можливу залежність коефіцієнтів регресійних моделей від числа омилення емульсолу в рамках припущення про вплив цього показника на кінетику забруднення та визначити, чи проявляються статистично значущі закономірності;

— на основі побудованих регресійних моделей сформулювати підґрунтя для алгоритмізації інженерного контролю ресурсу прокатної емульсії, що забезпечуватиме практичну можливість планування режимів часткового оновлення (підливання-зливу) робочої емульсії, оптимізації роботи систем очищення та зменшення витрати емульсолів без погіршення якості холоднокатаного прокату.

Мета дослідження. Метою дослідження є розроблення та кількісна оцінка регресійних моделей, що описують кінетику накопичення механічних домішок у промислових прокатних емульсіях залежно від часу їх роботи та концентрації, а також аналіз можливого впливу числа омилення на параметри цих моделей з подальшим формуванням основ для алгоритмізації інженерного контролю ресурсу емульсії.

Об'єкт та методика дослідження. Об'єктом дослідження є процес накопичення механічних домішок у промислових прокатних емульсіях, що використовуються на стані «Тандем» та реверсивному стані 1680 ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ».

Дослідження проводили в умовах цеху холодно-го прокату ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ» на стані «Тандем» та реверсивному стані 1680. Для виявлення закономірностей зміни вмісту механічних домішок на стані «Тандем» від концентрації емульсії та часу її роботи тривалість експерименту було поділено на інтервали між послідовними оновленнями емульсолу. Протягом дослідження емульсію декілька разів доводили до необхідної концентрації; кожний відрізок часу після такого оновлення розглядався як окрема кампанія (див. рис. 1). На практиці оновлення виконувалися після 431, 546, 896 та 1135 годин роботи емульсії.

У межах кожної кампанії за точковими лабора-

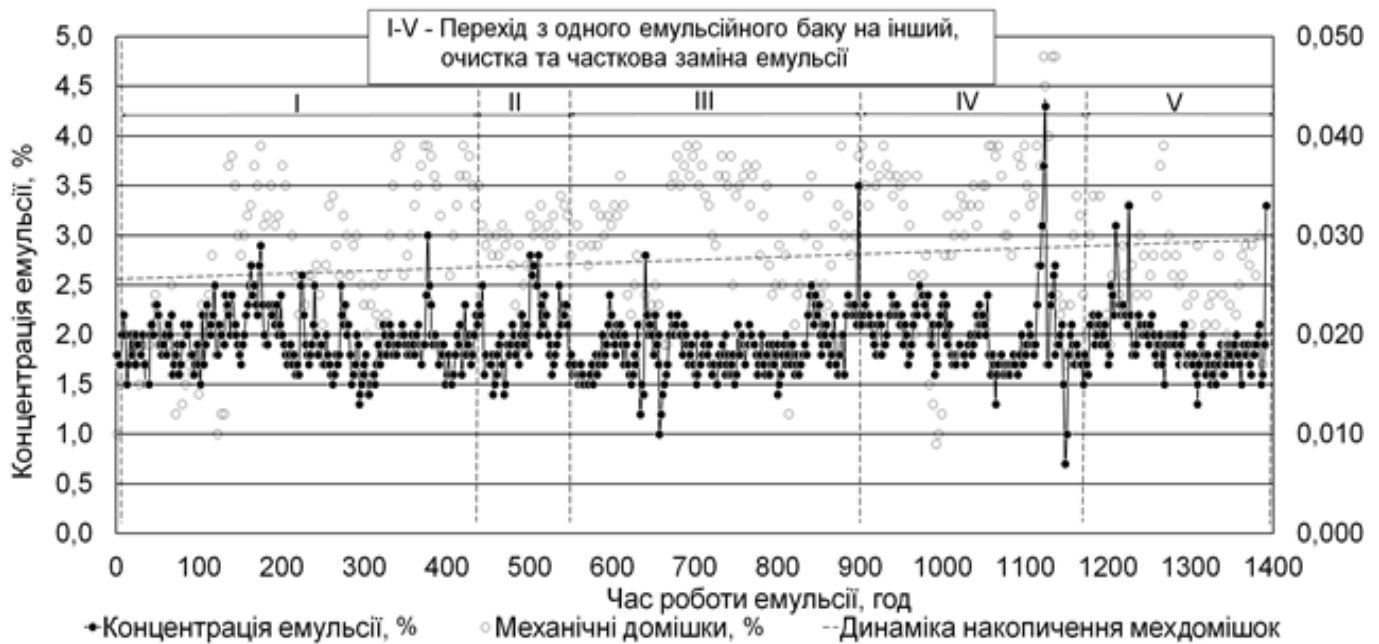


Рис. 1. Графік зміни концентрації та накопичення механічних домішок на прикладі використання емульсолу «Trenoil S740» на стані «Тандем»: I – IV — кампанії роботи емульсії між оновленнями

торними даними будували регресійне рівняння, що описувало залежність вмісту механічних домішок від часу роботи емульсії та її поточної концентрації (рис. 2). Отримані в різних кампаніях залежності усереднювали за коефіцієнтами з метою формування підсумкової розрахункової моделі для кожного емульсолу (узагальнені результати наведено у табл. 1). За таким підходом були побудовані залежності для емульсолів Lubro DL ZPS, Trenoil S740, Quakerol Zap 4.0 та Quakerol Zap 5.0 на стані «Тандем».



Рис. 2. Методика отримання регресійних рівнянь для кожної кампанії роботи емульсії

На реверсивному стані 1680 оновлення емульсії не проводили, тому вся тривалість її експлуатації вважалася єдиною кампанією; саме на основі повного масиву лабораторних аналізів цієї кампанії формували відповідну регресійну залежність. Аналогічний принцип застосовано для емульсолів Rollub 988-AR, Оптимал Про та Azmol Delta Ecoline mark 1 на стані «Тандем», де оновлення також не здійснювали.

Оброблення експериментальних даних виконували методами багатофакторного регресійного аналізу в середовищі Microsoft Excel із використанням засобів

генеративного штучного інтелекту як допоміжного інструмента обчислювальної оптимізації (із повним збереженням відповідальності авторів за наукову інтерпретацію результатів).

Для кожної кампанії формували окреме регресійне рівняння залежності вмісту механічних домішок Y від часу роботи емульсії t та її поточної концентрації C . Загальний вигляд таких рівнянь приймав форму поліноміальної багатофакторної моделі:

$$Y_k = a_{0k} + a_{1k} \cdot t + a_{2k} \cdot C + \dots, \quad (1)$$

де a_{ik} — коефіцієнти моделі, отримані для k -ої кампанії; $k = 1, 2, \dots, n$ — кількість кампаній, визначених проміжками часу між оновленнями емульсолу.

Для побудови узагальненої моделі, що відображає типову кінетику забруднення для конкретного емульсолу, коефіцієнти моделей окремих кампаній усереднювали. За умови рівнозначного внеску всіх кампаній застосовували просте середнє:

$$\bar{a}_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n a_{ik}, \quad (2)$$

де $\bar{a}_i$ — усереднене значення i -го коефіцієнта; a_{ik} — значення цього коефіцієнта для k -ої кампанії.

У випадках, коли тривалість окремих кампаній істотно відрізнялася (наприклад, за різної періодичності оновлення емульсії або різної кількості лабораторних аналізів), застосовували вагове усереднення коефіцієнтів:

$$\bar{a}_i = \frac{\sum_{k=1}^n T_k \cdot a_{ik}}{\sum_{k=1}^n T_k}, \quad (3)$$

Залежності вмісту механічних домішок від часу роботи та концентрації емульсії

Марка емульсолу	В'язкість кінематична за 50 °С, мм²/с	Число омилення, мгКОН/г	R²	Коефіцієнти рівняння (5)		
				a (вільний коефіцієнт)	b (коефіцієнт при X)	c (коефіцієнт при X₁)
Стан «Тандем»						
Azmol Delta Ecoline mark1	19,53	87,9	0,597	0	0,000036	0,005902
Lubro DL ZPS	26,19	92,46	0,887	0,009913	0,000228	−0,002025
Quakerol Zap 4.0	40,58	164,44	0,9997	0	0,000054	0,002311
Quakerol Zap 5.0	—	172,25	0,648	0,008255	0,000083	0,009829
Rollub 988-AR	28,67	138,5	0,714	0,01692	0,000056	−0,003419
Trenoil S740	30,26	170	0,58	−0,00514	0,00004	0,00117
Оптимал Про	32,29	46,4	0,675	0,008049	0,000121	−0,001472
Реверсивний стан 1680						
Lubro DL ZPS	26,19	94,3	0,91	−0,01032	0,000162	0,005696
CBK марки А	28,58	74,42	0,763	0,013433	0,00015669	−0,003137
Hydroway 840	13,02	90,35	0,862	0,0018426	0,00017381	0,0008131
Оптимал Про	32,29	51,24	0,907	0,000428	0,000122	0,00151
Rollub 988-AR	28,67	141,6	0,804	−0,0072	0,00026265	0,0062886

де T_k — тривалість k -ої кампанії або інша вагова характеристика (кількість аналізів, обсяг вибірки тощо).

Після усереднення всіх коефіцієнтів формували підсумкову регресійну модель:

$$Y = \bar{a}_0 + \bar{a}_1 \cdot t + \bar{a}_2 \cdot C + \dots, \quad (4)$$

яку використовували як інтегральну розрахункову залежність для конкретного емульсолу (див. табл. 1). Застосована методика забезпечувала коректне описання середньої кінетики забруднення, мінімізуючи вплив відмінностей між окремими кампаніями та підвищуючи статистичну стійкість моделей.

Результати та обговорення. У даній статті наведено результати лабораторних і дослідно-промислових випробувань промислових емульсолів, що застосовуються на стані типу «Тандем» та реверсивних станах. Дослідження охоплювало такі продукти, як Azmol Delta mark 1, Lubro DL ZPS, Quakerol Zap 4.0/5.0, Rollub 988-AR, Trenoil S740 та Оптимал Про.

Дослідно-промислові випробування емульсолу Azmol Delta mark 1 в системі мастильно-охолоджувальної рідини охоплюють інтервал часу понад 600 годин роботи емульсії при змінній концентрації в межах 1,5—3,9 %. Згідно з даними, у процесі експлуатації спостерігається поступове зростання вмісту механічних домішок у робочій рідині — від 0,008 % на початковій стадії до 0,06—0,065 % після тривалої циркуляції. Така динаміка підтверджує інтенсивне накопичення твердих частинок у системі за відсутності повного очищення.

Порівняння значень концентрації та домішок свідчить, що в окремі проміжки часу спостерігається певна антифазність: при зниженні концентрації нижче 2 % вміст домішок збільшується, що вказує на змен-

шення диспергуючої здатності емульсії. У діапазоні 2,5—3,0 % вміст твердих частинок стабілізується або зростає повільніше, що свідчить про підвищення стабільності дисперсної системи при оптимальному вмісту мастильної фази. Проте перевищення концентрації понад 3,5 % знову спричиняє посилення забруднення, що пояснюється підвищенням в'язкості й утрудненим видаленням домішок із зони деформації.

Отримані числові дані демонструють загальну тенденцію до лінійного зростання показника Y у часі з корекційним впливом концентрації, який може бути як позитивним, так і негативним залежно від складу емульсії. Такий характер зміни є типовим для систем, що працюють без фільтрації, де процес накопичення механічних домішок відбувається рівномірно у часі.

Для кожного типу емульсолу побудовано емпіричні рівняння виду:

$$Y = a + b \cdot X + c \cdot X_1, \quad (5)$$

де Y — вміст механічних домішок, %; $X = t$ — час роботи емульсії, год; $X_1 = C$ — концентрація емульсії, %; a , b , c — коефіцієнти регресійного рівняння (5).

Отримані результати, консолідовані в табл. 1, свідчать, що накопичення механічних домішок відбувається переважно за лінійним законом (5), залежно від тривалості експлуатації та концентрації емульсії.

Коефіцієнти детермінації R^2 для більшості моделей перевищують 0,7, що підтверджує адекватність опису процесу. Найвищі значення R^2 (до 0,91) зафіксовані для систем із відключеним очищенням, тобто в умовах замкнутого циклу циркуляції (реверсивний стан 1680). Це свідчить про мінімальний вплив зовнішніх чинників і стабільність умов експе-

рименту, що дає змогу точніше оцінити швидкість забруднення емульсії.

Порівняння коефіцієнтів регресійних моделей засвідчує, що приріст вмісту механічних домішок із часом (коефіцієнт b) становить у середньому $(1,2-3,0) \cdot 10^{-4} \%$ /год.

Водночас вплив концентрації (c) має компенсувальний або підсилювальний характер залежно від типу емульсії:

— для продуктів Lubro DL ZPS і Rollub 988-AR підвищення концентрації знижує рівень механічних домішок, що пояснюється поліпшенням стабільності дисперсії;

— для Quakerol Zap 5.0 та Hydroway спостерігається зворотна тенденція, пов'язана з підвищенням в'язкості та схильністю до осадження твердих частинок.

Порівняння результатів для станів різного типу показало, що наявність системи очищення є визначальним фактором у процесі накопичення забруднень.

У випадку безперервної фільтрації вміст механічних домішок зростає значно повільніше, ніж у замкнених системах, де циркуляція емульсії відбувається без оновлення. Для реверсивного стану 1680 найвищі значення $R^2 = 0,862-0,91$ отримано для емульсолів Hydroway та Lubro DL ZPS,

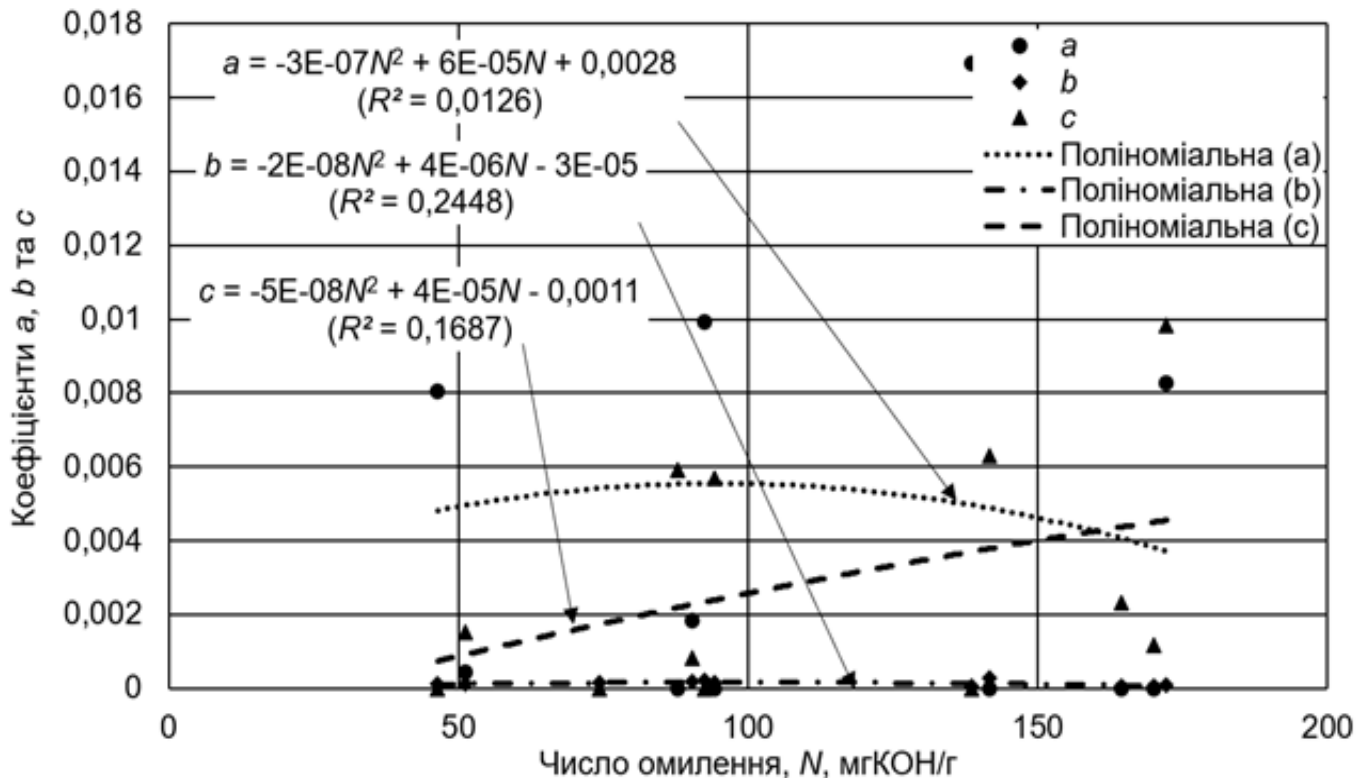


Рис. 3. Апроксимація коефіцієнтів a , b та c рівняння (5) поліномами 2-го ступеня залежно від числа омилення N емульсолу (узагальнені дані для двох станів)

які відзначаються стабільним кислотним числом і високою стійкістю емульсійної системи до зсувних деформацій у зоні прокатки.

Крім того, було виконано регресійний аналіз залежності коефіцієнтів a , b та c рівняння (5) від числа омилення N . На першому етапі апроксимацію здійснювали в Microsoft Excel поліномами 2-го ступеня для повної сукупності експериментальних точок без розподілу за серіями дослідів, проведених на стані «Тандем» і на реверсивному стані 1680 (рис. 3). Як свідчать значення коефіцієнтів детермінації ($R^2 < 0,25$), побудовані квадратичні моделі забезпечують низький рівень узгодженості з експериментальними даними.

На другому етапі виконали роз'єднання даних для стану «Тандем» і реверсивного стану 1680 на дві групи та провели окремі апроксимації засобами Microsoft Excel поліномами 2-го рівня для кожної групи. В результаті було виявлено, що для реверсивно-

го стану коефіцієнт детермінації R^2 помітно зростає, див. позиції (а) та (б) на рис. 4—6. Тоді як для узагальнених кривих об'єднання вибірок зумовлює появу слабо помітної двогорбості й не дає стабільно високих значень R^2 при використанні апроксимації поліномами 2-го ступеня. Значення R^2 для реверсивного стану 1680 є вищими, ніж для стану «Тандем», приблизно у 1,9 раза для коефіцієнта a , у 4 рази для коефіцієнта b та майже у 3 рази для коефіцієнта c . Більш високі значення R^2 , отримані для реверсивного стану 1680, пояснюються не лише впливом оновлення емульсії (оскільки апроксимація на стані «Тандем» виконувалася окремо в межах кожної кампанії), а значно вищою однорідністю експлуатаційних умов на реверсивному стані. Натомість на стані «Тандем» застосування емульсолів різних марок з різними фізико-хімічними характеристиками спричиняє різноспрямовану поведінку коефіцієнтів a , b і c та відповідне зниження рівня кореляції.

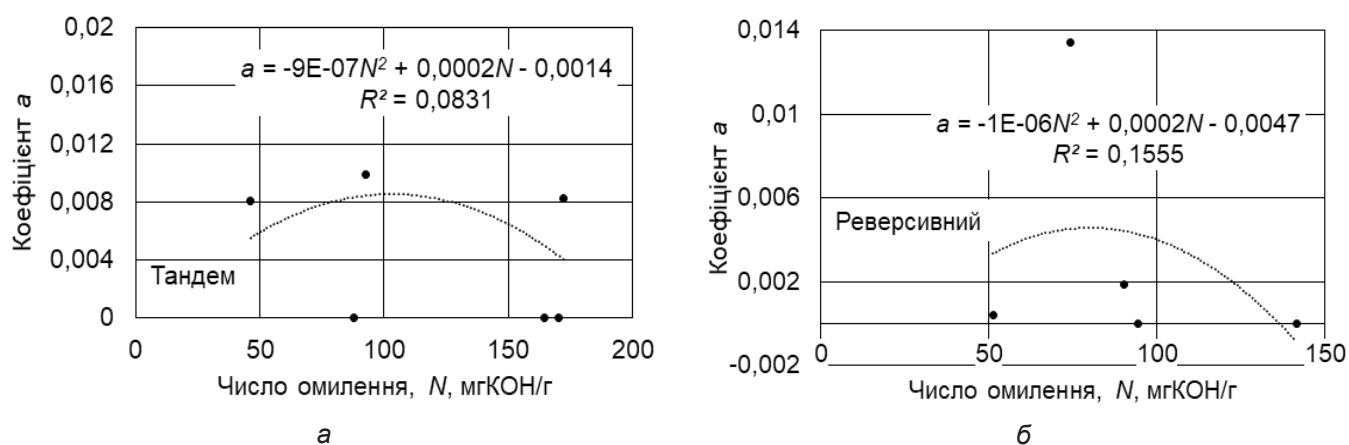


Рис. 4. Апроксимація залежності коефіцієнта a рівняння (5) від числа омилення N емульсолу для стану «Тандем» (а) та реверсивного стану 1680 (б)

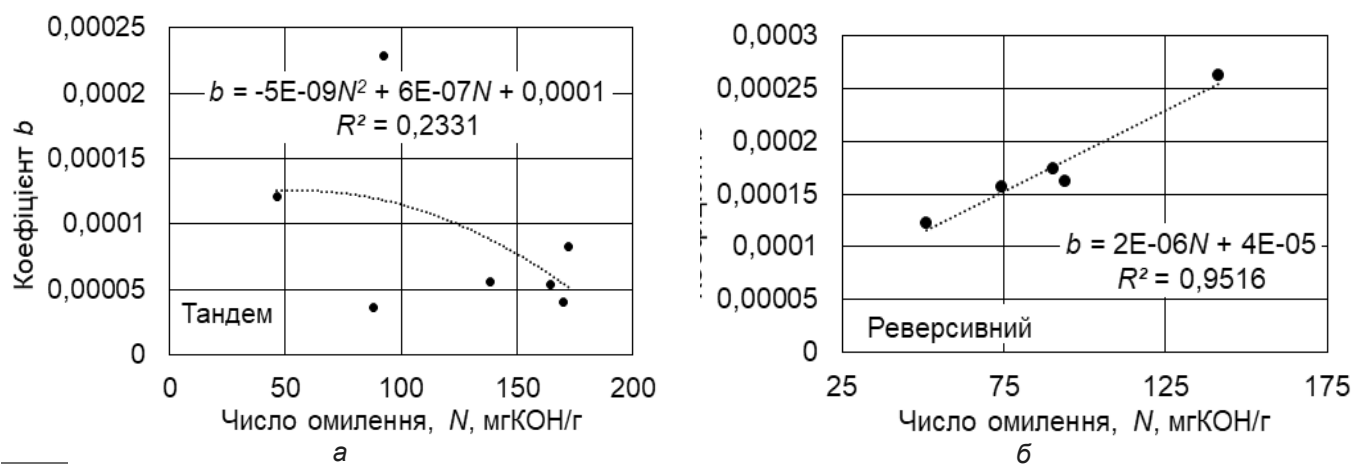


Рис. 5. Апроксимація залежності коефіцієнта b рівняння (5) від числа омилення N емульсолу для стану «Тандем» (а) та реверсивного стану 1680 (б)

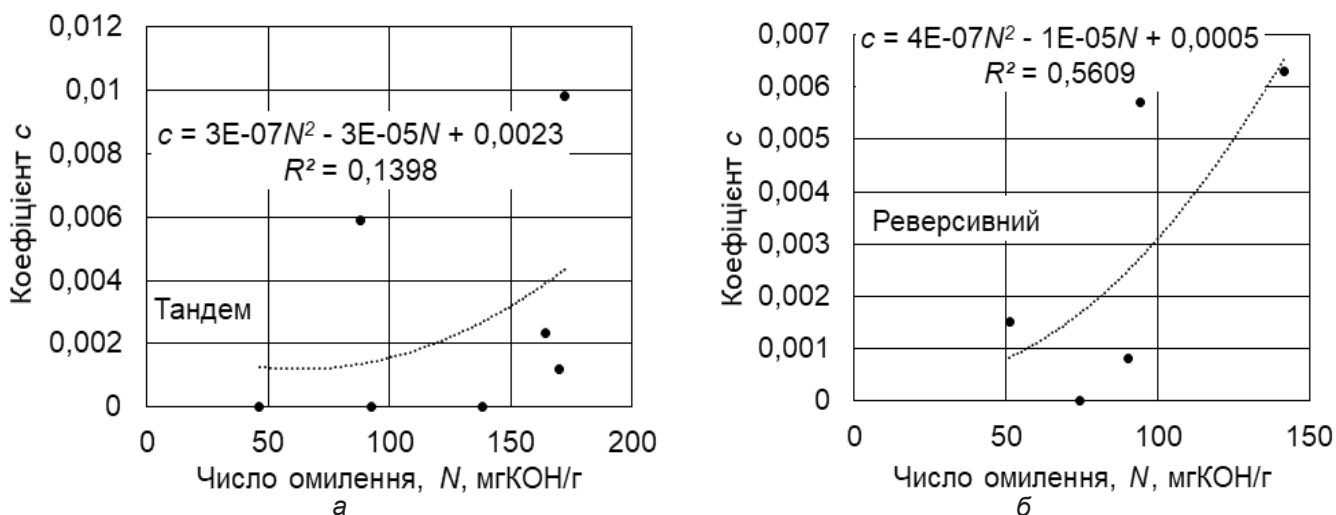


Рис. 6. Апроксимація залежності коефіцієнта c рівняння (5) від числа омилення N емульсолу для стану «Тандем» (а) та реверсивного стану 1680 (б)

На третьому етапі дослідження із застосуванням генеративного штучного інтелекту було підібрано регресійні рівняння, здатні забезпечити вищі значення коефіцієнта детермінації для узагальнених даних обох станів. Завданням було отримання універсальних моделей, що описують залежність приросту вмісту механічних домішок у часі (коефіцієнт b) та впливу концентрації емульсії (коефіцієнт c) від числа омилення N . У результаті сформовано набір рівнянь —

поліноми різних ступенів і суму двох Гаусіанів, які, згідно зі значеннями коефіцієнта детермінації, більш адекватно відтворюють характер кривих із двома локальними максимумами, притаманними двом прокатним станам; отримані залежності зведено до табл. 2.

Таким чином, поведінка залежності коефіцієнта a від числа омилення N демонструє загальну нелінійність, що нагадує «двогорбість», та зумовлена використанням різних марок емульсолів з відмінними

Регресійні залежності коефіцієнтів $a(N)$, $b(N)$, $c(N)$, отримані за узагальненими даними обох станів

Коефіцієнт	Тип моделі	Аналітичний вираз	R^2
$a(N)$	Поліном 4-го порядку	$a(N) = -9,67 \cdot 10^{-10} \cdot N^4 + 4,23 \cdot 10^{-7} \cdot N^3 - 6,49 \cdot 10^{-5} \cdot N^2 + 4,05 \cdot 10^{-3} \cdot N - 8,12 \cdot 10^{-2}$	0,48
$b(N)$	Поліном 2-го порядку	$b(N) = -1,886 \cdot 10^{-8} \cdot N^2 + 3,759 \cdot 10^{-6} \cdot N - 2,531 \cdot 10^{-5}$	0,25
	Поліном 7-го порядку	$b(N) = 1,0573 \cdot 10^{-15} \cdot N^7 - 7,8652 \cdot 10^{-13} \cdot N^6 + 2,4235 \cdot 10^{-10} \cdot N^5 - 3,9983 \cdot 10^{-8} \cdot N^4 + 3,8064 \cdot 10^{-6} \cdot N^3 - 2,0881 \cdot 10^{-4} \cdot N^2 + 6,1103 \cdot 10^{-3} \cdot N - 7,3512 \cdot 10^{-2}$	0,366
	Сума двох Гаусіанів	$b(N) = 1,4877 \cdot 10^{-4} \cdot e^{\frac{(N-83,851)^2}{6552,72}} + 2,6191 \cdot 10^{-4} \cdot e^{\frac{(N-142,098)^2}{0,5998}}$	0,62
$c(N)$	Лінійна	$c(N) = 3,6444 \cdot 10^{-5} \cdot N - 0,002065$	0,147
	Поліном 7-го порядку	$c(N) = 1,057 \cdot 10^{-15} \cdot N^7 - 7,865 \cdot 10^{-13} \cdot N^6 + 2,423 \cdot 10^{-10} \cdot N^5 - 3,998 \cdot 10^{-8} \cdot N^4 + 3,806 \cdot 10^{-6} \cdot N^3 - 2,088 \cdot 10^{-4} \cdot N^2 + 6,11 \cdot 10^{-3} \cdot N - 7,351 \cdot 10^{-2}$	0,707
	Сума двох Гаусіанів	$c(N) = 0,002628 \cdot e^{\frac{(N-83,51)^2}{1434,89}} + 0,003104 \cdot e^{\frac{(N-157,34)^2}{815,1}} + 0,000221$	0,358

фізико-хімічними властивостями та, відповідно, підвищеною варіабельністю даних. Об'єднання вибірок двох станів збільшує розкид точок, але не формує окремих екстремумів. Для коефіцієнта $b(N)$ спостерігаються два локальні максимуми: перший у діапазоні $N \approx 80\text{--}100$ мгКОН/г (характерний для стану «Тандем»), другий у межах $N \approx 140\text{--}160$ мгКОН/г (характерний для реверсивного стану 1680). Проміжна зона $N \approx 115\text{--}130$ мгКОН/г утворює локальний мінімум, який є математичним наслідком поєднання двох груп даних і не відображає фізичного оптимуму швидкості накопичення механічних домішок. Для коефіцієнта $c(N)$ також фіксуються два локальні максимуми, розташовані приблизно в діапазонах $N \approx 80\text{--}100$ і $N \approx 145\text{--}165$ мгКОН/г. Впадина між ними є результатом сумісного аналізу точок двох технологічно відмінних станів і не може бути трактована як реальний технологічний мінімум впливу концентрації на забруднення емульсії.

Побудовані регресійні рівняння (див. табл. 1) можуть бути використані для прогнозування оптимальної тривалості експлуатації мастильно-охолоджувальної рідини до моменту досягнення граничного рівня забруднення, що є важливим елементом системи моніторингу технічного стану прокатних емульсій.

На основі проведених математичних досліджень розроблений алгоритм контролю стану прокатної емульсії, який має практичне значення для прогнозування параметрів емульсії та зниження її витрати. Алгоритм у текстовому вигляді наведено нижче.

В основу алгоритму покладено модель за формулою (5). Коефіцієнти a , b та c беруться з регресійної

моделі конкретного емульсолу (див. табл. 1).

Оцінка ресурсу.

Граничний час роботи до забруднення:

$$t^* = \frac{Y_{\max} - (a + c \cdot X_1)}{b}. \quad (6)$$

Для більшості емульсолів $b = (1,2\text{--}3,0) \cdot 10^{-4}$ %/год. Рекомендований поріг $Y_{\max} = 0,05$ % (природна «верхня межа», за якої емульсія вже візуально мутна, має осад, підвищену в'язкість і погіршене змочування).

Регулювання концентрації.

Якщо $c < 0$: збільшити X_1 у межах технологічного режиму (Lubro DL ZPS, Rollub 988-AR).

Якщо $c > 0$: зменшити або стабілізувати X_1 (Quakerol Zap 4.0/5.0, Hydroway, Оптимал Про).

Оптимальний діапазон $X_1 = 1,8\text{--}2,8$ %.

Корекція за типом стану.

«Тандем» (із фільтрацією):

$R^2 = 0,58\text{--}0,68$, темп росту Y уповільнений.

Перевіряти роботу системи очищення кожні 100—150 годин роботи.

Реверсивний 1680 (без очищення):

$R^2 = 0,86\text{--}0,91$, темп росту максимальний.

Проводити часткове оновлення емульсії (bleed-and-feed) кожні 250—300 год.

Критерії управління.

Якщо $\Delta Y/\Delta X = \Delta Y/\Delta t > 3 \times 10^{-4}$ %/год $\rightarrow$ достроково оновити 20—30 % об'єму.

Якщо при цьому $c < 0 \rightarrow$ збільшити X_1 на +0,3 %;

Якщо $c > 0 \rightarrow$ зменшити X_1 на -0,2 % і скоротити цикл циркуляції.

Таким чином, проведене дослідження вперше дало кількісну характеристику кінетики забруднення промислових прокатних емульсій, показавши, що приріст механічних домішок стабільно описується лінійною моделлю, чутливою до часу роботи, концентрації та умов циркуляції рідини. Виявлені коефіцієнти регресії демонструють відмінності між станами із фільтрацією та без неї, підтверджуючи вирішальну роль ефективності очищення, а аналіз залежностей від числа омилень засвідчує його опосередкований вплив через фізико-хімічні властивості емульсолів. На відміну від робіт Strasser [1, 2], Antonicelli [6], Dubey [9] та Lyons [13], де зосереджено увагу на терті, стабільності мастильної плівки чи загальних аспектах деградації емульсій, у цьому дослідженні вперше побудовано кількісні регресійні моделі накопичення домішок у реальних умовах холодної прокатки та сформовано основу для алгоритмічного прогнозування ресурсу емульсії, оптимізації концентраційних режимів і підвищення ефективності систем очищення.

Висновки та перспективи дослідження

1. Підтверджено лінійний характер забруднення прокатних емульсій у часі. На основі багатофакторного регресійного аналізу встановлено, що зміна вмісту механічних домішок для всіх досліджених емульсолів адекватно описується рівнянням виду $Y = a + b \cdot X + c \cdot X_1$, де час роботи емульсії $X = t$ та її концентрація $X_1 = C$ є визначальними факторами. Для більшості емульсолів коефіцієнти детермінації перебувають у діапазоні $R^2 \approx 0,58\text{--}0,91$, що підтверджує придатність лінійної моделі для інженерних розрахунків і прогнозування ресурсу емульсій у промислових умовах фільтрувальних і нефільтрувальних систем.

2. Виявлено кількісні закономірності накопичення механічних домішок. Показано, що коефіцієнт b , який характеризує середній темп зростання вмісту механічних домішок у часі, для різних емульсолів становить орієнтовно $(1,2\text{--}3,0) \cdot 10^{-4}$ %/год. Коефіцієнт c відображає роль концентрації: для Lubro DL ZPS, Rollub 988-AR та Оптимал Про підвищення концентрації X_1 зменшує забрудненість емульсії (компенсувальний ефект за рахунок покращення диспергування частинок), тоді як для Quakerol Zap 5.0 та Hydroway 840 збільшення концентрації, навпаки, прискорює накопичення домішок через зростання в'язкості та схильність до утримання твердих включень у об'ємі емульсії.

3. Встановлено суттєвий вплив типу стану та наявності систем очищення на кінетику забруднення емульсії. Для стану «Тандем» із фільтрацією швидкість накопичення твердих частинок є нижчою, однак варіабельність умов (різні марки емульсолів, періодичні оновлення, відмінні реологічні властивості) знижує рівень узагальненої кореляції. Для реверсивного стану 1680, що працює в умовах замкнутого контуру циркуляції без очищення, темп росту вмісту

механічних домішок Y максимальний, але значення R^2 систематично вищі (до 0,91) завдяки більш однорідним експлуатаційним умовам.

4. Встановлено, що число омилень не формує універсального «оптимуму» N для мінімізації приросту забруднення. Регресійний аналіз залежностей $a(N)$, $b(N)$, $c(N)$ від числа омилень N показав, що при об'єднанні даних двох станів прості квадратичні моделі дають низькі значення коефіцієнта детермінації ($R^2 < 0,25$). Для залежностей $b(N)$ та $c(N)$ виявлено два локальні максимуми («двогорбистість»), які відповідають різним інтервалам числа омилень, характерним для стану «Тандем» та реверсивного стану 1680. Проміжна область $N \approx 115\text{--}130$ мгКОН/г формує локальний мінімум/«плато», що є математичним наслідком змішання двох вибірок і не може інтерпретуватися як фізичний оптимум складу емульсолу.

5. Встановлено характер залежностей коефіцієнтів $a(N)$, $b(N)$, $c(N)$ від числа омилень N . Застосування для опису розширених моделей — поліномів вищих ступенів та сум двох Гаусіанів — дало змогу поліпшити узгодженість узагальнених залежностей $b(N)$ та $c(N)$ з експериментальними даними (до $R^2 \approx 0,62$ для $b(N)$ та $R^2 \approx 0,707$ для окремих поліноміальних апроксимацій $c(N)$). Сумарні Гаусіани задовільно відтворюють структуру вибірок із двома локальними максимумами, пов'язаними з різними технологічними режимами двох станів, але, з огляду на помірні значення R^2 , такі моделі доцільно використовувати переважно для якісної інтерпретації впливу числа омилень, а не для високоточної кількісної оцінки.

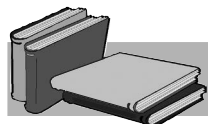
6. На основі побудованих моделей сформовано алгоритм інженерного контролю та прогнозування стану прокатної емульсії, який включає розрахунок граничного часу роботи до досягнення допустимого рівня забруднення $Y_{\max}$, рекомендації щодо корекції концентрації залежно від знаку коефіцієнта c , а також диференційовані підходи до режимів часткового оновлення емульсії для стану «Тандем» та реверсивного стану 1680. Додатково запропоновано практичні критерії оцінки ресурсу емульсії на основі моделі (5), зокрема: прогноз часу досягнення граничного рівня забруднення $t^* = \frac{Y_{\max} - (a + c \cdot X_1)}{b}$, корекція концентрації відповідно до знаку коефіцієнта c ; типові регламенти обслуговування (для «Тандему» — контроль ефективності очищення кожні 100—150 год, для реверсивного стану — часткове оновлення 20—30 % об'єму кожні 250—300 год); критерій дострокового втручання за темпом забруднення $\Delta Y / \Delta t > 3 \cdot 10^{-4}$ %/год. Такий підхід дозволяє обґрунтовано встановлювати інтервали bleed-and-feed, оцінювати ефективність систем очищення та зменшувати витрату емульсолу без погіршення якості прокату.

7. Практична цінність проведених досліджень полягає у можливості використання отриманих регресійних моделей та алгоритму контролю для адаптивного моніторингу мастильно-охолоджувальних рідин у реальних умовах холодної про-

катки. Регресійні моделі дозволяють прогнозувати поведінку конкретної емульсії, визначати оптимальні концентраційні режими, оцінювати ефективність систем очищення та встановлювати обґрунтовані інтервали оновлення робочої рідини для різних станів і марок емульсолів.

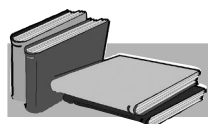
8. Подальші дослідження доцільно спрямувати на поглиблення фізико-хімічної інтерпретації отриманих

залежностей. Перспективними напрямками є: розширення масиву даних (зокрема за рахунок нових марок емульсолів), урахування гранулометричного складу твердих частинок, температурних та гідродинамічних факторів, а також валідація запропонованих залежностей на інших типах станів і в різних схемах очищення емульсії.



ЛІТЕРАТУРА

1. Strasser D., Bergmann M., Smeulders B., Paesold D., Krimpelstätter K., Schellingerhout P., Kainz A., Zeman K. A novel model-based approach for the prediction of wear in cold rolling. *Wear*. 2017. Vol. 376—377. Part B. P. 1245—1259. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.056>
2. Strasser D., Bergmann M., Smeulders B., Paesold D., Krimpelstätter K., Schellingerhout P., Kainz A., Zeman K. Wear generation during cold strip rolling — a model based analysis. *Proceedings of the 3rd European Steel Technology and Application Days*. 2017. P. 2141—2150.
3. Pesci C. et al. Controlling wear and surface cleanliness during cold rolling (LOWWEAR). Brussel. 2012. 156 p. <https://doi.org/10.2777/23177>
4. Montmitonnet P., Delamare F., Rizoulières B. Transfer layer and friction in cold metal strip rolling processes. *Wear*. 2000. Vol. 245. Issues 1—2. P. 125—135. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00473-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00473-7)
5. Грудев А.П., Зильберг Ю.А., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. Москва: Металлургия, 1982. 312 с.
6. 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. <https://doi.org/10.3390/jmmp7040121>
7. Кухар В.В., Спічак О.Ю., Пашинський В.В., Малій Х.В. Випробування емульсолів для холодної прокатки на сажотворення при відпалі рулонів. *Обробка матеріалів тиском*. 2024. № 1(53). С. 116—125. [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1\(53\)116](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1(53)116)
8. Kukhar V., Spichak O., Pashynskiy V., Malii Kh., 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. No. 2. P. 5—16. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15862796>
9. Dubey S.P., Sharma G.K., Shishodia K.S., Sekhon G.S. Study on the Performance of Oil-in-Water Emulsions during Cold Rolling of Steel Strip. *Tribology Transactions*. 2005. Vol. 48. Issue 4. P. 499—504. <https://doi.org/10.1080/05698190500313494>
10. Спічак О.Ю., Кухар В.В. Вплив технологічних факторів на чистоту поверхні холоднокатаного листового прокату. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 5. С. 209—219. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-24>
11. Zi Shu-E. Improvement of Emulsion System of Cold Rolling Mill in Pansteel. *Steel Rolling*. 2014. Vol. 31. Issue 1. P. 60—62. URL: <http://www.chinarolling.com/gby/zg/EN/Y2014/V31/I1/60> (дата звернення: 09.12.2025).
12. Спічак О.Ю., Шестопалов О.В., Кухар В.В., Малій Х.В. Удосконалення системи очищення прокатної емульсії у процесі холодної прокатки з технологічними мастилами. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2024. № 2. С. 20—27. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-2-3>
13. Lyons E.H.Jr. The Contamination and Electrolytic Cleaning of Cold Rolled Steel. *Transactions of The Electrochemical Society*. 1941. Vol. 80. No. 1. P. 367. <https://doi.org/10.1149/1.3071345>
14. Chakraborty S., Giri S.S., Pandit A., Bhagat A.N., Prakash R., Jha A.K. Effect of Ageing of Rolling Oil on the Performance of Cold-Rolled Steel. *Lubrication Science*. 2024. Vol. 36. Issue 6. P. 457—467. <https://doi.org/10.1002/lis.1708>
15. Li Y., Sun J.L. Recognition and Control of the Influence Factors on the Surface Defects of Cold Rolled Strip with Emulsion Lubrication. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 456. P. 498—502. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.456.498>



REFERENCES

1. Strasser, D., Bergmann, M., Smeulders, B., Paesold, D., Krimpelstätter, K., Schellingerhout, P., Kainz, A., & Zeman, K. (2017). A novel model-based approach for the prediction of wear in cold rolling. *Wear*, 376-377, Part B, 1245-1259. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.056>
2. Strasser, D., Bergmann, M., Smeulders, B., Paesold, D., Krimpelstätter, K., Schellingerhout, P., Kainz, A., & Zeman, K. (2017). Wear generation during cold strip rolling – a model based analysis. *Proceedings of the 3rd European Steel Technology and Application Days*, 2141-2150.
3. Pesci, C. et al. (2012). Controlling wear and surface cleanliness during cold rolling (LOWWEAR). <https://doi.org/10.2777/23177>
4. Montmitonnet, P., Delamare, F., & Rizoulières, B. (2000). Transfer layer and friction in cold metal strip rolling processes. *Wear*, 245(1-2), 125-135. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00473-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00473-7)
5. Hrudev, A. P., Zilberg, Yu. A., & Tilik, V. T. (1982). Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem [Friction and lubrication in metal forming]. *Metallurgiya* [in Russian].
6. 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>
7. Kukhar, V. V., Spichak, O. Yu., Pashynskiy, V. V., & Malii, Kh. V. (2024). Vyprobuvannia emulsoliv dlia kholodnoi prokatky na sazhuvoutvorennia pry vidpali ruloniv [Testing of emulsions for cold rolling for soot-formation during coil annealing]. *Obrobka materialiv tyskom*, 1(53), 116-125. [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1\(53\)116](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1(53)116) [in Ukrainian].
8. Kukhar, V., Spichak, O., Pashynskiy, V., Malii, Kh., 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>
9. Dubey, S. P., Sharma, G. K., Shishodia, K. S., & Sekhon, G. S. (2005). Study on the Performance of Oil-in-Water Emulsions during Cold Rolling of Steel Strip. *Tribology Transactions*, 48(4), 499-504. <https://doi.org/10.1080/05698190500313494>
10. Spichak, O. Yu., & Kukhar, V. V. (2025). Influence of technological factors on the surface cleanliness of cold-rolled steel sheets. *Scientific Journal of Metinvest Polytechnic. Series: Technical Sciences*, 5, 209-219. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-24> [in Ukrainian].
11. Zi, S.-E. (2014). Improvement of Emulsion System of Cold Rolling Mill in Pansteel. *Steel Rolling*, 31(1), 60-62. <http://www.chinarolling.com/gby/zg/EN/Y2014/V31/I1/60>
12. Spichak, O. Yu., Shestopalov, O. V., Kukhar, V. V., & Malii, Kh. V. (2024). Improvement of the rolling emulsion cleaning system in the process of cold rolling with technological lubricants. *Scientific Journal of Metinvest Polytechnic. Series: Technical Sciences*, 2, 20-27. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-2-3> [in Ukrainian].
13. Lyons, E. H. Jr. (1941). The Contamination and Electrolytic Cleaning of Cold Rolled Steel. *Transactions of The Electrochemical Society*, 80(1), 367. <https://doi.org/10.1149/1.3071345>
14. Chakraborty, S., Giri, S. S., Pandit, A., Bhagat, A. N., Prakash, R., & Jha, A. K. (2024). Effect of Ageing of Rolling Oil on the Performance of Cold-Rolled Steel. *Lubrication Science*, 36(6), 457-467. <https://doi.org/10.1002/lis.1708>
15. Li, Y., & Sun, J. L. (2013). Recognition and Control of the Influence Factors on the Surface Defects of Cold Rolled Strip with Emulsion Lubrication. *Applied Mechanics and Materials*, 456, 498-502. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.456.498>

Надійшла/Received 12.12.2025

Прийнята/Accepted 21.02.2026

Опублікована/Published 31.03.2026

Summary

V.V. Kukhar¹, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Vice-Rector for Research, Professor of the Department of Metallurgy and Production Organization, e-mail: kvv.mariupol@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4863-7233>

O.Yu. Spichak^{1,2}, PhD Student¹, Head of the Cold Rolling Department of the Technical Directorate², e-mail: oleksandr.spichak@mipolytech.education, <https://orcid.org/0009-0004-9653-437X>

¹TECHNICAL UNIVERSITY "METINVEST POLYTECHNIC" LLC (Zaporizhzhia, Ukraine)

²PJSC "ZAPORIZHSTAL" (Zaporizhzhia, Ukraine)

Regression Analysis of Accumulation of Mechanical Impurities in Rolling Emulsions and Algorithm for Predicting their Contamination Level

Introduction. The quality and contamination level of rolling emulsions are critical for process stability in cold rolling, surface cleanliness of steel strip and the service life of lubricant-coolant systems. However, the quantitative laws of mechanical impurity accumulation in industrial emulsions are still insufficiently described, which limits the development of engineering tools for predicting emulsion life.

Methods. Laboratory and pilot-industrial tests were carried out for several commercial emulsions (Azmol Delta mark 1, Lubro DL ZPS, Quakerol Zap 4.0/5.0, Rollub 988-AR, Trenoil S740, Optimal Pro, etc.) used on a Tandem mill and a 1680 reversing mill at Zaporizhstal PJSC. Multi-factor regression analysis was applied to relate the content of mechanical impurities to emulsion operating time and concentration. In addition, the influence of saponification number on the regression coefficients was studied using standard Microsoft Excel tools and generative artificial intelligence as an auxiliary instrument for selecting approximation models.

Results. It is shown that, for most emulsions, contamination can be described by a linear model with coefficients of determination $R^2 \approx 0.58-0.91$; the average growth rate of mechanical impurities is $(1.2-3.0) \cdot 10^{-4} \text{ \%}/\text{h}$. The concentration effect is either compensating or amplifying, depending on the emulsion brand, while the mill type and cleaning system strongly affect contamination kinetics. Generalised dependences of regression parameters on saponification number were obtained, and no universal optimum N for minimising contamination was found.

Discussion. Based on the derived models, an engineering algorithm for monitoring and predicting the state of rolling emulsions was proposed. It enables the calculation of the allowable operating time before reaching a limit contamination level, optimisation of emulsion concentration and justification of bleed-and-feed intervals for different mill types. The proposed approach provides a basis for adaptive monitoring of lubricant-coolant systems, improving the efficiency of cleaning units and reducing emulsion consumption without loss of cold-rolled product quality.

Keywords

Rolling emulsion; mechanical impurities; cold rolling; regression model; saponification number; emulsion cleaning system.