

DOI: 10.31319/2519-2884.46.2025.20

УДК 661.8 + 669.1

Рябік П.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-1804-9051, e-mail: pavelriabik@gmail.com

Амосов А.О., здобувач третього (доктора філософії) рівня вищої освіти,

e-mail: amosov.andrii@gmail.com

Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

Riabik Pavlo, Candidate of technical sciences, Docent

Amosov Andrii, Postgraduate Student

Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ОТРИМАННЯ ОКСИДНИХ СПОЛУК З ХЛОРИДНИХ ТРАВІЛЬНИХ РОЗЧИНІВ

У статті представлено комплексний огляд сучасних технологій отримання оксидних сполук із хлоридних травільних розчинів, що генеруються в сталеливарній промисловості. Аналізуються основні проблеми утилізації відпрацьованих травільних розчинів та можливості їх перетворення на цінну вторинну сировину, що дозволяє знизити витрати на первинну сировину та зменшити негативний вплив на довкілля. Розглянуто традиційні методи хімічного осадження, електрохімічні технології, феритизацію, а також сучасні мембранні сепараційні процеси, які забезпечують ефективну регенерацію кислот і відновлення металів із мінімальним споживанням енергії. Результати досліджень підтверджують, що інтеграція термодинамічних, кінетичних та технологічних підходів дозволяє значно підвищити ефективність переробки травільних розчинів та отримання оксидних сполук з високими експлуатаційними характеристиками, що сприяє сталому розвитку промисловості.

Ключові слова: травільні розчини; феритизація; мембранна сепарація; відновлення металів; енергозбереження; сталеливарна промисловість.

This article presents a comprehensive review of modern technologies for obtaining oxide compounds from chloride pickling solutions generated in the steel industry. The review addresses the key challenges associated with the disposal of spent pickling solutions and explores the potential for converting these waste streams into valuable secondary raw materials, thereby reducing the need for virgin resources and mitigating environmental impact. Traditional methods such as chemical precipitation and electrochemical recovery are discussed, along with advanced techniques including ferritization and membrane separation processes, which enable efficient acid regeneration and metal recovery with minimal energy consumption. The findings demonstrate that an integrated approach combining thermodynamic, kinetic, and technological strategies can significantly enhance the recovery efficiency of oxide compounds with superior properties, ultimately contributing to sustainable industrial development.

Keywords: pickling solutions; ferritization; membrane separation; metal recovery; energy saving; steel industry.

Постановка проблеми

Сталеливарна промисловість є одним із найважливіших секторів сучасної економіки, що забезпечує критично важливі матеріали для галузей, таких як будівництво, транспорт та машинобудування. У 2024 році глобальне виробництво сталі перевищило 1,91 мільярда тон, що підкреслює не лише величезний обсяг виробництва, а й стратегічну важливість цієї галузі [1]. Водночас, в Україні зовнішні виклики, зокрема військові конфлікти, спричинили різке зниження виробництва — на 70 % у 2022 році, коли обсяг склав лише 6,26 мільйонів тон. На щастя, завдяки нещодавнім заходам щодо відновлення, виробництво у 2024 році знову сягнуло 7 мільйонів тон (табл. 1), що демонструє як крихкість, так і стійкість галузі [1].

Таблиця 1. Дані про глобальне та українське виробництво сталі (2014—2024) [1]

Рік	Глобальне виробництво (мільйон тон)	Українське виробництво (мільйон тон)
2014	1675	27
2015	1700	25
2016	1620	24
2017	1690	22
2018	1810	21
2019	1870	20
2020	1885	19
2021	1910	18
2022	1880	6.3
2023	1890	6.0
2024	1913	7.0

Окрім безпосереднього виробництва сталі, процес травлення є необхідним для видалення оксидних шарів з поверхні сталі: він генерує величезну кількість кислотних відходів, що називаються травильними розчинами. Щорічно у світі виробляється понад 30 мільйонів тон таких розчинів, а в Україні цей показник становить приблизно 300 000 тон [2, 3]. Традиційно ці розчини сприймалися як відходи, що створювали значні проблеми з утилізацією та екологічними ризиками через високу концентрацію розчинених металів (заліза, марганцю, нікелю) та кислот. Проте останні дослідження кардинально змінили це сприйняття, довівши, що травильні розчини можна перетворити на цінну вторинну сировину для синтезу високочистих оксидних сполук. Така трансформація не лише зменшує забруднення навколишнього середовища, а й знижує потребу у використанні первинних сировинних ресурсів, сприяючи економії коштів та циркулярній економіці. Інновації, такі як вдосконалені мембранні сепарації, розпилювальна сушка та феритизація, значно підвищили ефективність відновлення, що робить обробку травильних розчинів перспективною для сталого розвитку промисловості.

Аналіз сучасних досліджень та публікацій

Сучасні дослідження надають комплексне розуміння методів обробки травильних розчинів з акцентом на економічну та екологічну ефективність. Традиційні методи хімічного осадження, які використовують реагенти, такі як гідроксид натрію або оксалева кислота, дозволяють перетворити розчинені металеві йони у нерозчинні гідроксида чи оксалати. Наприклад, додавання NaOH спричиняє осадження $\text{Fe}(\text{OH})_3$ який після спікання перетворюється у Fe_2O_3 . Хоча цей метод є простим і підходить для невеликих виробництв, він часто супроводжується утворенням великих обсягів осаду, що вимагає додаткової обробки та утилізації, яка підвищує витрати та екологічне навантаження [4, 5].

Електрохімічні методи, що використовують електричну енергію для відновлення металевих іонів, дозволяють отримувати метали високої чистоти, зокрема нікель та кобальт. Цей підхід має переваги у вигляді високої якості продукту, проте потребує значних енергетичних витрат, особливо при обробці розчинів з низькою концентрацією іонів. Останні інновації у розробці електродів та використанні відновлювальних джерел енергії сприяють зниженню енергоспоживання, роблячи ці методи більш ефективними [6, 7].

Феритизація — один із найбільш перспективних методів, що дозволяє перетворити розчинені металеві йони на стабільні ферити (наприклад, магнетит, Fe_3O_4) при контрольованих умовах. Наприклад, реакція FeCl_3 з аміаком при помірних температурах призводить до осадження магнетиту, який потім легко відокремлюється за допомогою магнітних методів. Дослідження показали, що оптимізація параметрів процесу (наприклад, початкова концентрація іонів, температура та метод активації, термічна чи за допомогою змінних магнітних полів) може забезпечити майже повне очищення розчину, із залишковою концентрацією іонів заліза менше $0,03 \text{ мг/дм}^3$ [7, 10]. Цей підхід дозволяє не лише ефективно відновлювати метали, але й отримувати

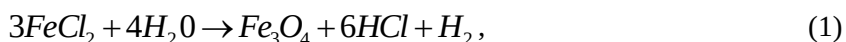
вати ферити з високими магнітними властивостями, що є важливими для застосувань у високотехнологічних галузях.

Інноваційні мембранні технології значно розширюють можливості обробки травильних розчинів. Процеси, такі як нанофільтрація, зворотний осмос і дифузійний діаліз, дозволяють селективно розділяти кислоти та металеві іони, забезпечуючи безперервну регенерацію травильних розчинів. Дослідження Zhang and Chen [8] доводять, що мембранні фільтри можуть ефективно очищати стічні води, відновлюючи високочистий HCl з мінімальними залишковими домішками. Крім того, інтегровані системи, розроблені Culcasi and Gueccia [15], дозволяють поєднати мембранну сепарацію з реактивним осадженням, що знижує споживання хімічних реагентів і мінімізує утворення вторинних відходів. Економічні аналізи та процесні моделювання, представлені у роботах Vascone and Cipollina [12], показують, що ці інтегровані технології можуть бути ефективно масштабованими до рівня пілотних установок. Такий підхід відкриває нові перспективи для широкомасштабного застосування.

Виклад основного матеріалу

Відновлення цінних оксидних сполук із травильних розчинів це комплексний процес, який включає не лише хімічні перетворення, а й ретельний контроль параметрів, що впливають на кінцеву якість продукту та ефективність процесу. Травильні розчини містять значну кількість розчинених металів і кислот, які, якщо їх не обробляти, можуть спричиняти значне забруднення ґрунтів і водних ресурсів. Проте, завдяки сучасним технологіям, ці відходи можна перетворити на високоякісні продукти, такі як високочисті оксиди заліза, спінельні ферити та інші оксидні сполуки, що мають широкий спектр застосувань у промисловості [3, 10].

Термодинамічний аналіз: Успіх процесу відновлення базується на термодинамічній спроможності реакцій, що відбуваються в системі. Однією з ключових реакцій є утворення магнетиту (Fe_3O_4) із залізовмісного розчину:



що має зміну вільної енергії (ΔG) -124 кДж/моль, що свідчить про спонтанність цієї реакції [16]. Така сильна екзергія забезпечує протікання процесу майже без додаткової енергії за належних умов. До того ж, альтернативні маршрути, такі як осадження феруму оксалатом ($FeC_2O_4 \cdot 2H_2O$) за допомогою оксалевої кислоти, дозволяють отримати високоякісні оксиди після кальцинації. Термодинамічні діаграми для системи $Fe-H_2O-Cl$ показують, що оптимальна температура реакції знаходиться в межах $60-80^\circ C$, це забезпечує ефективне прискорення реакційної кінетики та знижує енергоспоживання. Введення каталізаторів або стабілізаторів ще більше знижує енергетичний бар'єр. Це дозволяє процесу відбуватися при м'якших умовах, що є особливо важливим для енергоефективності в промислових масштабах.

Кінетичні міркування: Кінетика процесу визначає швидкість, з якою розчинені металеві іони перетворюються у оксидні сполуки. Рівняння Арреніуса

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (2)$$

де k — константа швидкості реакції, A — передекспоненційний фактор (характеризує частоту зіткнень молекул та їх орієнтацію), E_a — енергія активації (Дж/моль), R — універсальна газова стала (Дж/(моль·К)), T — абсолютна температура (К), демонструє, що навіть незначне підвищення температури може експоненціально збільшити швидкість реакції. Для процесів феритизації характерна енергія активації в межах $35-50$ кДж/моль, це означає, що навіть невелике підвищення температури на $10^\circ C$ може подвоїти швидкість реакції [16]. Це підкреслює важливість точного контролю температури для досягнення високої конверсії при мінімальних енергетичних витратах. Оптимальний рівень рН, який зазвичай знаходиться між 8 та 9, сприяє ефективній нуклеації та росту феритових кристалів, забезпечуючи високий вихід і чистоту продукту. Дослідження також вказують, що використання поверхнево-активних речовин допомагає запобігти агломерації частинок, покращуючи морфологію та магнітні властивості кінцевого

продукту. Такий детальний аналіз кінетичних параметрів дозволяє оптимізувати умови процесу та розробити сучасні реактори з високою продуктивністю.

Інноваційні технології відновлення: Інтеграція сучасних технологій значно покращує відновлення оксидних сполук із травильних розчинів. Однією з передових технологій є установка Рутнера, яка об'єднує етапи попередньої концентрації, хімічної реакції та магнітного відокремлення в єдиний безперервний процес. Ця установка демонструє економію енергії на рівні 15—20 % у порівнянні з традиційними методами та здатна обробляти до 200 000 тон травильного розчину на рік при високій ефективності відновлення нікелю (до 92 %) [6]. Її висока пропускна здатність та ефективність є критичними для впровадження на великому виробництві.

Мембранні технології також відіграють вирішальну роль у сучасних системах відновлення. Використовуючи нанофільтрацію, зворотний осмос та дифузійний діаліз, можна селективно розділяти кислоти та металеві іони, що дозволяє безперервно регенерувати травильні розчини. Дослідження, проведені Zhang and Chen [8], показали, що мембранні фільтри можуть забезпечити високочисте відновлення HCl з мінімальним залишковим вмістом металів. Інтеграція мембранних процесів з реактивним осадженням, як описано в роботах Culcasi and Guessia [15], знижує споживання реагентів і мінімізує утворення вторинних відходів. Основним параметром таких процесів є осмотичний тиск (ΔP), який задається рівнянням

$$\Delta P = RT \times \sum_i c_i, \quad (3)$$

де ΔP є осмотичним тиском (Па), R — газова стала (Дж/(моль·К)), T — абсолютна температура (К), а c_i — концентрація компонента i з кожного боку мембрани (моль/м³). Оптимізація ΔP забезпечує високі швидкості потоку при мінімальних витратах енергії [15]. Оптимізація цього параметру дозволяє досягати високих швидкостей потоку при мінімальних енергетичних витратах. Дослідження свідчать, що при оптимальному режимі роботи можна зменшити втрати кислоти до 85%, а новітні технології з протизасмічувальними покриттями значно подовжують термін служби мембран, що робить ці технології економічно ефективними [12, 15].

Енергозбереження — ще один важливий аспект. Хлоридні травильні розчини працюють при низьких температурах (30—40°C) і споживають всього 150—200 кВт·год/м³, що є значно нижчим за системи на основі сірчаної (60—80°C, 250—300 кВт·год/м³) або нітратної кислоти (80—100°C, 350—400 кВт·год/м³) (табл. 2). Нижча температура роботи сприяє зниженню витрат на опалення та охолодження, а менша кількість токсичних викидів знижує потребу у використанні додаткових систем для контролю забруднення. Дослідження показують, що перехід від сірчаної або нітратної до хлоридних систем може знизити енергетичні витрати на 20—30 % [16, 17].

Таблиця 2. Порівняння робочої температури та енергоспоживання для різних типів травильних розчинів

Тип травильного розчину	Робоча температура (°C)	Енергоспоживання (кВт·год/м ³)
Хлоридні травильні розчини	30–40	150–200
Травильні розчини на основі сірчаної кислоти	60–80	250–300
Травильні розчини на основі нітратної кислоти	80–100	350–400

Крім цього, численні дослідження демонструють можливості синтезу високоякісних матеріалів із травильних відходів. Робота Tang et al. [7] доводить, що переробка феричного солі у травильних рідинах дозволяє отримати нано-розмірний оксид заліза з чудовими магнітними властивостями, що є надзвичайно важливим для електронних та каталізаторних застосувань. Аналогічно, дослідження Narasimhan et al. [13] показали, що синтез марганець-цинкового фериту з використанням феррової травильної рідини та піролізитої руди забезпечує продукт висо-

кої чистоти та покращеними магнітними характеристиками. Дослідження Gao [16] підтверджують, що використання травильних відходів для високоефективного витягування металів із сапролітової руди дозволяє синтезувати спінельні ферити з відмінними магнітними характеристиками. Ці результати свідчать про те, що сучасні технології дозволяють комплексно переробляти відходи, перетворюючи їх у комерційно цінні продукти.

Синтез оксидних сполук з травильних розчинів відбувається при різних температурних режимах та з різними питомими енерговитратами в залежності від виду розчину (табл. 3).

Таблиця 3. Питомі енерговитрати синтезу оксидних сполук з травильних розчинів (при тиску 0.1 Мпа)

Тип травильного розчину	Робоча температура (°C)	Питомі енерговитрати (кДж/кг)
Хлоридні травильні розчини	500–550	3350–4600
Травильні розчини на основі сірчаної кислоти	800–1000	7500–17900
Травильні розчини на основі нітратної кислоти	1000–1100	8000–19300

На загальні питомі енерговитрати у процесі синтезу оксидних сполук також впливає середовище, у якому відбувається цей процес. Одним із важливих факторів є газовий склад робочої атмосфери. Дослідження показують, що за умов підвищеної концентрації метану у газовій фазі спостерігається суттєве зниження енерговитрат. Це пояснюється особливостями термохімічних реакцій, що відбуваються в таких середовищах, де метан сприяє утворенню активних компонентів, які покращують кінетику синтезу оксидів. Завдяки цьому можна не тільки зменшити витрати на енергію, а й підвищити загальну ефективність процесу. Враховуючи ці аспекти, перспективним є впровадження технологій, що передбачають використання високоентальпійних енергоносіїв, які здатні оптимізувати витрати тепла та підвищити продуктивність синтезу [15, 16].

Ефективне використання травильних розчинів неможливе без організації замкнутого технологічного циклу, який забезпечує раціональне використання сировини, мінімізацію втрат і зменшення екологічного навантаження на навколишнє середовище. Основою такого підходу є інтеграція процесів регенерації та повторного використання компонентів травильних розчинів. Одним із ключових рішень у цьому напрямку є регенерація соляної кислоти з її подальшим поверненням у цикл виробництва. Це дозволяє не лише зменшити потребу у використанні свіжої кислоти, а й суттєво скоротити кількість відходів, що підлягають утилізації. Використання таких методів у поєднанні з ефективним розподілом енергоресурсів дозволяє значно покращити економічні показники виробництва та створити технологічні схеми, що відповідають сучасним вимогам сталого розвитку.

Реалізація замкнутого технологічного циклу також включає заходи з використання залишкового тепла, що генерується у процесі синтезу. Це може бути досягнуто за рахунок застосування теплообмінних систем, що дозволяють використовувати вторинну енергію для нагрівання вихідних реагентів або підтримання робочої температури в інших виробничих процесах. Таким чином, енергетична ефективність підвищується, а загальні витрати на виробництво скорочуються. Це особливо важливо у промислових масштабах, де навіть незначна економія енергоресурсів у розрахунку на одиницю продукції може мати суттєвий фінансовий ефект.

Наведений аналіз демонструє, що сучасні методи одержання високоякісних оксидних сполук з травильних розчинів базуються на глибокому розумінні термодинаміки, кінетики та сучасних технологій відновлення. Завдяки оптимізації умов процесу та використанню для синтезу оксидних сполук високоентальпійних енергоносіїв можливо значно підвищити ефективність відновлення, знизити витрати енергії та мінімізувати негативний екологічний вплив. Отримані продукти мають широкий спектр застосувань, що сприяє підвищенню конкурентоспроможності та екологічної стійкості сталеливарної промисловості.

Висновки

Травильні розчини на хлоридній основі, завдяки нижчим енерговитратам і меншому негативному впливу на довкілля, упевнено постають як найперспективніше джерело для синтезу оксидних сполук заліза, марганцю, нікелю та інших металів. Результати досліджень свідчать про те, що саме застосування високоентальпійних енергоносіїв здатне забезпечити оптимальні термічні умови для перетворення відпрацьованих травильних розчинів на високоякісні вторинні матеріали, які можуть бути використані у широкому спектрі напрямів: від виготовлення електронних компонентів і каталізаторів до будівельних матеріалів із підвищеною функціональністю.

Термодинамічний аналіз показує, що ключові реакції, включно з утворенням магнетиту — за умови правильно підбраного технологічного режиму — мають достатній енергетичний потенціал для спонтанного перебігу за відносно невисоких температур. У поєднанні з ретельним контролем параметрів — насамперед температури та pH — можна досягти високої ефективності перетворень і отримати оксидні сполуки із заданими характеристиками. Застосування високоентальпійних енергоносіїв, зокрема, дозволяє прискорити ці реакції і водночас утримати загальні витрати енергії на прийнятному рівні.

Серед основних чинників, що роблять цей підхід привабливим для промисловості, варто виділити можливість замкненого циклу й регулярної регенерації кислот. Така система дає змогу суттєво скоротити обсяги відходів, знизити використання первинних реагентів та водночас підвищити економічну привабливість у масштабному виробництві. Оптимізація процесу, що включає термодинамічні, кінетичні та технологічні аспекти, веде до створення інтегрованих схем обробки травильних розчинів і дозволяє майже повністю уникнути утворення шкідливих відходів.

Загалом, комплексне впровадження високоентальпійних теплоносіїв, системи регенерації соляної кислоти та інших інноваційних рішень суттєво посилює позитивні ефекти від утилізації хлоридних травильних розчинів: зменшення енергоспоживання, мінімізація екологічних ризиків і формування стабільної платформи для розвитку циркулярної економіки. Такий підхід ілюструє високий потенціал сталого розвитку металургійної галузі та прокладає шлях до створення технологічних систем нового покоління, здатних ефективно перетворювати травильні відходи на цінні ресурси.

Список використаної літератури

1. World Steel Association. World Steel in Figures 2023 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://worldsteel.org> (дата звернення: 09.01.2025).
2. Markets and Markets. Iron Oxide Market by Type and Application - Global Forecast to 2030 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://marketsandmarkets.com> (дата звернення: 11.01.2025).
3. Lastivka O. V. Energy-saving technology for processing spent pickling solutions // *Environmental Safety and Resource Use*. 2022. № 3. С. 22–34.
4. Yatskov M., Korchyk N., Budenkova N., Mysina O., Kirilyuk S. Determining rational parameters for the treatment of concentrated wastewater // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Т. 2, № 10. С. 14–25.
5. Baerhold F. Acid Recovery in the Steel and Metallurgical Industry – Process Characteristics and Fuel Saving Options. 2016.
6. Alorro R., Hiroyoshi N., Ito M., Tsunekawa M. Recovery of Precious Metals from Chloride Solution by Magnetite // *XXV International Mineral Processing Congress Proceedings*. 2010.
7. Tang J., Pei Y., Hu Q., Pei D., Xu J. Recycling of Ferric Salt in Steel Pickling Liquors: Preparation of Nano-sized Iron Oxide // *Procedia Environmental Sciences*. 2016. Vol. 31. P. 778–784.
8. Zhang J., Chen G. Purification of Pickling Wastewater from the Steel Industry Using Membrane Filters // *Environmental Engineering Research*. 2020. Vol. 27.
9. Gueccia R., Winter D. An Integrated Approach for the HCl and Metals Recovery from Waste Pickling Solutions // *Chemical Engineering Research and Design*. 2021. Vol. 168.
10. Devi A., Singhal A., Gupta R., Panzade P. A Study on Treatment Methods of Spent Pickling Liquor // *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2014.

11. Ciminelli V., Braga H. Magnetite Recovery from Pickling Liquors // *Hydrometallurgy*. 2006. Vol. 84. P. 37–42.
12. Bascone D., Cipollina A. Simulation of a Regeneration Plant for Spent Pickling Solutions via Spray Roasting // *Desalination and Water Treatment*. 2016. Vol. 57.
13. Narasimhan B., Kumar S., Sankara Narayanan T. S. N. Synthesis of Manganese Zinc Ferrite Using Ferrous Pickle Liquor and Pyrolusite Ore // *Environmental Chemistry Letters*. 2011. Vol. 9. P. 243–250.
14. Liu Q., Cao Y., Zhou M. Efficient Recycling and Utilization Strategy for Steel Spent Pickling Solution // *Coatings*. 2024. Vol. 14. Article ID 784.
15. Culcasi A., Gueccia R. Design of a Novel Membrane-Integrated Waste Acid Recovery Process from Pickling Solution // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 236. Article ID 117623.
16. Gao J. High-efficiency Leaching of Valuable Metals from Sapolite Laterite Ore Using Pickling Waste Liquor for Synthesis of Spinel-type Ferrites // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 10. P. 988–1001.
17. Özdemir T., Öztin C., Kincal N. Treatment of Waste Pickling Liquors: Process Synthesis and Economic Analysis // *Chemical Engineering Communications*. 2006. Vol. 193. P. 548–563.
18. Tang J., et al. The Recycling of Ferric Salt in Steel Pickling Liquors: Preparation of Nano-sized Iron Oxide // *Procedia Environmental Sciences*. 2016. Vol. 31. P. 778–784.

ANALYTICAL REVIEW OF OBTAINING OXIDE COMPOUNDS FROM CHLORIDE PICKLING SOLUTIONS

Abstract

This article presents a comprehensive review of modern technologies for synthesizing oxide compounds from chloride pickling solutions, a major waste byproduct of the steel industry. Given that over 30 million tons of pickling solutions are generated globally each year, and approximately 300,000 tons in Ukraine alone, effective waste management is critical.

The study explores methods to convert these waste streams into valuable secondary raw materials, reducing dependency on primary resources while mitigating environmental impacts.

Traditional methods such as chemical precipitation and electrochemical recovery are analyzed alongside advanced techniques, including ferritization and membrane separation. These modern approaches facilitate efficient acid regeneration and metal recovery while significantly minimizing energy consumption. The research highlights that integrating thermodynamic, kinetic, and technological strategies improves process efficiency, enabling the reduction of energy usage by up to 30% compared to conventional methods.

Additionally, high-enthalpy heat carriers and optimized acid regeneration systems further enhance sustainability by lowering environmental risks and reinforcing circular economy principles in metallurgical industries.

Overall, the findings indicate that an integrated approach to processing chloride pickling solutions can transform waste into high-performance oxide compounds, fostering sustainable industrial practices and reducing the ecological footprint of steel production.

References

1. World Steel Association. (2023). *World Steel in Figures 2023*. Retrieved from <https://worldsteel.org>
2. Markets and Markets. (2022). *Iron Oxide Market by Type and Application - Global Forecast to 2030*. Retrieved from <https://marketsandmarkets.com>
3. Lastivka, O. V. (2022). Energy-saving technology for processing spent pickling solutions. *Environmental Safety and Resource Use*, (3), 22–34.
4. Yatskov, M., Korchyk, N., Budenkova, N., Mysina, O., & Kirilyuk, S. (2024). Determining rational parameters for the treatment of concentrated wastewater. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10), 14–25.

5. Baerhold, F. (2016). Acid Recovery in the Steel and Metallurgical Industry - Process Characteristics and Fuel Saving Options.
6. Alorro, R., Hiroyoshi, N., Ito, M., & Tsunekawa, M. (2010). Recovery of Precious Metals from Chloride Solution by Magnetite. *XXV International Mineral Processing Congress Proceedings*.
7. Tang, J., Pei, Y., Hu, Q., Pei, D., & Xu, J. (2016). Recycling of Ferric Salt in Steel Pickling Liquors: Preparation of Nano-sized Iron Oxide. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 778–784.
8. Zhang, J., & Chen, G. (2020). Purification of Pickling Wastewater from the Steel Industry Using Membrane Filters. *Environmental Engineering Research*, 27.
9. Gueccia, R., & Winter, D. (2021). An Integrated Approach for the HCl and Metals Recovery from Waste Pickling Solutions. *Chemical Engineering Research and Design*, 168.
10. Devi, A., Singhal, A., Gupta, R., & Panzade, P. (2014). A Study on Treatment Methods of Spent Pickling Liquor. *Clean Technologies and Environmental Policy*.
11. Ciminelli, V., & Braga, H. (2006). Magnetite Recovery from Pickling Liquors. *Hydrometallurgy*, 84, 37–42.
12. Bascone, D., & Cipollina, A. (2016). Simulation of a Regeneration Plant for Spent Pickling Solutions via Spray Roasting. *Desalination and Water Treatment*, 57.
13. Narasimhan, B., Kumar, S., & Sankara Narayanan, T. S. N. (2011). Synthesis of Manganese Zinc Ferrite Using Ferrous Pickle Liquor and Pyrolusite Ore. *Environmental Chemistry Letters*, 9, 243–250.
14. Liu, Q., Cao, Y., & Zhou, M. (2024). Efficient Recycling and Utilization Strategy for Steel Spent Pickling Solution. *Coatings*, 14, 784.
15. Culcasi, A., & Gueccia, R. (2019). Design of a Novel Membrane-Integrated Waste Acid Recovery Process from Pickling Solution. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117623.
16. Gao, J. (2020). High-efficiency Leaching of Valuable Metals from Sapolite Laterite Ore Using Pickling Waste Liquor for Synthesis of Spinel-type Ferrites. *Journal of Materials Research and Technology*, 10, 988–1001.
17. Özdemir, T., Öztin, C., & Kincal, N. (2006). Treatment of Waste Pickling Liquors: Process Synthesis and Economic Analysis. *Chemical Engineering Communications*, 193, 548–563.
18. Tang, J., et al. (2016). The Recycling of Ferric Salt in Steel Pickling Liquors: Preparation of Nano-sized Iron Oxide. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 778–784.

Надійшла до редколегії 03.04.2025