

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УТВОРЕННЯ МЕТАЛОВМІСНИХ ВІДХОДІВ В УМОВАХ СТАЛЕПРОКАТНОГО ВИРОБНИЦТВА

V. Soroka¹ <https://orcid.org/0009-0008-1344-3923>

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

RESEARCH ON THE PROCESSES OF METAL-CONTAINING WASTE FORMATION IN STEEL ROLLING PRODUCTION

Мета. Комплексна оцінка обсягів утворення металовмісних відходів в умовах сталепрокатного виробництва та розробка ефективних методів утилізації побічних продуктів виробництва.

Методика. Були використані методи дослідження процесів утворення окалини залежно від маси, розміру, складу заготовки та марки сталі. Елементний склад досліджуваних зразків окалини визначили за допомогою рентгенофлуоресцентного спектрометра. Проведено експериментальні дослідження кількісного та якісного складу окалини, що утворюється після проходження заготовки через кільцеву піч.

Результати досліджень. Визначено основні аспекти щодо утворення окалини, кількість утворених відходів, проаналізовані проблеми та шляхи утилізації металовмісних відходів. Проведено комплексне дослідження кількісного та якісного складу окалини, досліджено потенціал використання компонентів окалини, як вторинних ресурсів. Розроблено модель ефективного використання відходів та побічних продуктів виробництва.

Наукова новизна. Набула подальшого розвитку методика оцінки обсягів та складу окалини, що утворюється в сталепрокатному виробництві в залежності від температури та складу атмосфери, часу нагрівання та компонентного складу металу, а також швидкості охолодження заготовки.

Практичне значення. Отримані результати роботи можуть бути застосовані при дослідженнях щодо комплексної переробки металовмісних відходів сталепрокатного виробництва, зменшення негативного впливу на навколишнє середовище, зниження витрат на утилізацію. Запропонована «Модель ефективного використання відходів та побічних продуктів виробництва» забезпечує супровід процесів розробки технології комплексної переробки, перспектив екологізації та захисту навколишнього середовища в умовах металургійного підприємства.

Ключові слова: промислові відходи, металургійне виробництво, окалина, побічні продукти виробництва, утилізація відходів.

Вступ. Металургійна галузь є основним джерелом утворення металовмісних відходів до яких відноситься окалина, шлаки, пил та шлам, що включають в себе залізо, марганець, нікель, хром та інші цінні елементи [1–3]. Тверді відходи металургійного виробництва є джерелом забруднення водних ресурсів, повітря, ґрунтів та негативно впливають на родючість ґрунтів, а також інші компоненти

екосистем. Зберігання відходів призводить до довгострокового забруднення навколишнього середовища, оскільки кількість відходів зростає, а важкі метали накопичуються і зберігаються в екосистемах тривалий період. Така ситуація вимагає розробки технологічних рішень з утилізації відходів та підвищення рівня циркулярності металургійної галузі.

Проблема утворення металовмісних відходів сталепрокатного виробництва є критичним викликом сьогодення. Виробництво сталі супроводжується накопиченням значних обсягів відходів, що створює екологічні проблеми. Останні роки галузь активно впроваджує стратегії утилізації та переробки відходів, щоб зменшити свій вплив на природне середовище та забезпечити збереження ресурсів.

На теперішній час частково вирішується проблема утилізації сталевих шлаку, що утворюється як побічний продукт процесу виробництва сталі, шляхом використання в різних сферах, включаючи будівництво доріг, виробництво цементу та сільському господарстві. Завдяки використанню сталевих шлаку в цих секторах, промисловість не лише зменшує кількість відходів, але й сприяє збереженню ресурсів та енергозбереженню [2].

Розширення можливості залучення відходів, що утворюються під час виробництва металевої продукції, забезпечує економію електроенергії, створення робочих місць та скорочення викидів парникових газів [2, 3]. Необхідність скорочення викидів парникових газів є важливою проблемою, що відображають глобальні спільні цілі, щодо потреби обмеження підвищення температури з метою запобігання катастрофічним наслідкам зміни клімату. Збільшення використання металовмісних відходів може суттєво зменшити викиди, водночас скорочуючи попит на залізну руду. Зокрема, підвищення ефективності використання відходів в процесі вторинного виробництва сталі дозволяє скоротити викиди парникових газів більш ніж на 8,3 тони на кожен додаткову тону продукції, що перевищує ефект від простого збільшення обсягів повторно використаної сировини, що забезпечує скорочення понад 2,2 тони на тону продукції [2, 3].

Для більшості виробництв найважливішими є економічні показники. Тим не менш, екологічні практики можуть забезпечити конкурентну перевагу, покращити репутацію бренду, зменшити споживання енергії та ресурсів, а також витрати, і як результат зменшити кількість відходів, що призведе до кращих економічних показників у довгостроковій перспективі [3, 4].

Згідно з статистикою World Steel Association Україна на 2022-2023 роки посідає 24 місце по виробництву сирової сталі в світі [5]. Щорічно українські металургійні підприємства викидають понад 4 мільйони тон забруднюючих речовин в атмосферу і формують близько 25 мільйонів тон твердих відходів. Регіони з розвиненою металургійною промисловістю часто стикаються з екологічними проблемами. Велику кількість промислових відходів утворюють інтегровані металургійні підприємства, що реалізують повний виробничий цикл «чавун – сталь – прокат», де відходи генеруються на кожному етапі виробництва. На окремих металургійних підприємствах можуть утворюватися до 80 видів відходів. Серед них особливу роль відіграють технологічні відходи – вторинні матеріали, які є

невід'ємною частиною технологічного процесу. В залежності від внутрішньої організації та оснащення підприємства, при виробництві однієї тони сталі утворюється до 1,5 тони вторинної сировини [6–8].

Для забезпечення екологічної рівноваги та сталого розвитку, існує потреба в комплексному аналізі та дослідженні ефективних технологій переробки відходів. Враховуючи потребу в сталі в будівництві, енергетиці та машинобудуванні, а також повоєнній відбудові, неминуче зростання виробництва сталі що в свою чергу призведе до збільшення відходів сталепрокатного виробництва, що несе загрозу для сталого розвитку виробничих систем. Саме тому, виникає потреба в дослідженні процесів утворення та накопичення відходів в металургійному виробництві з метою розробки ефективних шляхів їх подальшої утилізації.

Основні результати. Значною проблемою на сталепрокатних виробництвах є утворення окалини. Окалина, що утворюється в процесі металургійного виробництва, під дією високих температур містить токсичні елементи, що має негативний вплив на стан організмів у тому числі людини.

Під час процесу гарячої (від 800 до 1200°C) прокатки сталі (рис. 1), за рахунок взаємодії з повітрям, метал окислюється та утворює на своїй поверхні тонкий шар різної товщини (лускаті частинки) так звану окалину, що є корозійним матеріалом. Згодом при деформації металу під час подальшої обробки, окалина розтріскується та обсипається.



Рис. 1. Процес утворення окалини під час гарячої прокатки сталі

Окалина відносяться до IV класу небезпеки відходів, складається з оксидів заліза і має синювато-чорний колір. У ній містяться 3 типи оксидів: вюстит (FeO), гематит (Fe_2O_3) і магнетит (Fe_3O_4), який є сумішшю перших двох. Окалина складається з двох шарів, зовнішній – щільний і з відтінком червоного кольору, та внутрішнім пористим шаром чорно-сірого кольору, ці два шари крихкі та мають феромагнітні властивості.

Склад залізної окалини змінюється залежно від умов утворення, окалина складається з 65–74% FeO і 36–28% Fe_2O_3 , перший шар містить більше Fe_2O_3 – від 31 до 37%, а зовнішній шар – навіть до 53%. Окалина може містити оксиди Si , Ca , Ni , Al , Mn , S , P та інших металів [1–3, 8–10].

Окалина не містить небезпечних, легкозаймистих, радіоактивних або вибухових речовин. Допустима норма масла в окалині менше 1%. Проведено аналіз використання окалини в світі, деякі види широко використовуються інші знаходяться на стадії розробки [4, 6–10].

На підприємствах з повним металургійним циклом, де виробляють чавун, сталь і прокат, відходи поділяються на два основних види: пил та шлаки. У випадку використання мокрого газоочищення пил перетворюється на шлам. Найбільш цінними відходами для чорної металургії є залізовмісні матеріали, такі як пил, шлам і окалина, тоді як шлаки переважно знаходять застосування в інших промислових сферах.

Нагрівання металу перед прокаткою збільшує його пластичність та зменшує опір до деформації. Нагрівання є однією з ключових і основних у процесі прокатки. Воно повинно забезпечити рівномірний розподіл температури по всьому перерізу прокатуваного металу, мінімізувати його окислення та знеуглецювання. Під час окислення сталі головну роль відіграє процес дифузії атомів заліза на поверхню, а не дифузія атомів кисню вглиб металу. Вже при кімнатній температурі поверхня заліза швидко покривається тонкою плівкою оксиду. Наступна стадія окислення, що спостерігається при температурі 150–700°C, полягає у формуванні шару окалини, що складається з зовнішнього шару Fe_2O_3 (гематит), середнього шару Fe_3O_4 (магнетит) та внутрішнього шару FeO (вюстит). Однак, внутрішній шар FeO утворюється при температурах вище 570°C. Шарувата структура окалини, що стає видимою при товщині шару 0,1 мм, добре помітна на мікрофотографіях [7–10].



Рис. 2. Внутрішня (пориста) та зовнішня частина шару окалини

Процес подальшого наростання шару окалини на сталевій поверхні (зразку, злитку, заготівці, виробі) відбувається наступним чином, шар FeO , що утворюється на поверхні металу, розділяється на дві частини. Внутрішня частина цього шару, яка є більш пористою, відокремлена від зовнішньої чіткою межею (див. рис. 2). Ця межа дозволяє окалині легко відділятися від металу, залишаючи на його поверхні лише тонкий внутрішній шар [4–6]. Поверхня розділу між внутрішнім і зовнішнім шарами окалини збігається з початковою зовнішньою поверхнею сталевого зразка. Внутрішній пористий шар FeO утворюється в результаті дифузії атомів кисню з окалини до металу, тоді як основний шар оксидів утворюється завдяки дифузії атомів заліза в окалину [6–10].

Процес окалиноутворення та зневуглецювання при нагріванні в полум'яних печах. В залежності від складу сталі, температури поверхні, режиму нагріву та охолодження, вмісту кисню в оточуючому середовищі шар окалини може мати різну будову і склад, а також обсяг її утворення.

Зневуглецювання – процес при якому вміст вуглецю зменшується на поверхні шару металу при його нагріванні в окиснюваному середовищі. Зневуглецювання збільшується із підвищенням температури. Безвуглецевий шар не піддається загартуванню. При нагріванні зневуглецювання пов'язане з окисненням. При $t > 1100^\circ\text{C}$ окислення інтенсивніше, ніж зневуглецювання, і після видалення окалини зневуглецьованого шару не виявляється [1–2, 6–10].

Утворення окалини на залізі залежить від таких факторів:

1. Температура. Тонкий шар окалини утворюється при температурі $200\text{--}400^\circ\text{C}$. При температурі $600\text{--}700^\circ\text{C}$ процес утворення окалини пришвидшується. При температурі понад 900°C утворення окалини стає найінтенсивнішим.

2. Склад атмосфери. Коли нагріте залізо вступає в реакцію з киснем (O_2) відбувається окислення, при наявності води (H_2O) процес пришвидшується, також вуглекислий газ (CO_2) може впливати на склад та структуру оксидного шару, при наявності інертних газів (Ar , N_2) швидкість окислення зменшується.

3. Тиск навколишнього середовища. Підвищений тиск кисню збільшує швидкість утворення окалини.

4. Час нагрівання металу. Товщина шару окалини на пряму залежить від часу за якого нагрівається залізо.

5. Склад заліза. Леговані сталі сповільнюють окислення, в порівнянні з чистим залізом.

6. Швидкість при якій охолоджується сплав заліза. Чим швидше охолодження тим відшарування окалини стає більш інтенсивним, а також відбувається її розтріскування, а при повільному охолодженні оксидний шар стає щільним.

Таким чином одним із визначальних чинників, що впливають на товщину шару окалини на залізі, є температура, за якої завершується процес прокатки. Найбільш оптимальним є рівень температури близько 850°C . При підвищенні температури, особливо понад 900°C , спостерігається суттєве збільшення товщини окалини [6–10].

Методика дослідження. Проведені досліді на металургійному підприємстві що виробляє сталеві труби, що використовуються в різних галузях промисловості зокрема в енергетичній, нафтовій, газовій промисловості. Зокрема проведено спостереження, розрахунки та досліді в яких розглядалась утворена структура, розмір та маса окалини зі сплаву металів після проходження заготівки (сплаву металу певної форми) через кільцеву піч (піч в якій рівномірно нагрівається сплав металу до певної температури за рахунок спалювання природного газу).

Для дослідів було відібрано 10 зразків окалини. Їх характеристика представлена в табл. 1 та на рис. 3 та 4, зображено процес вимірювання маси відібраних зразків окалини.



Рис. 3. Відібрані зразки окалини



Рис. 4. Відбір і замір проб

Таблиця 1

Характеристики зразків окалини

Досліджуваний параметр	Номер зразка									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Маса, кг	0,1465	0,1683	0,1238	0,0871	0,150	0,245	0,250	0,121	0,200	0,191
Площа, м ²	0,00846	0,01124	0,00594	0,00471	0,0073	0,0092	0,0128	0,0037	0,0081	0,0047

Сумарна маса зразків склала 1,4917 кг, сумарна площа 0,07145 м².

Результати елементного аналізу окалини. Відібрано 10 зразків з поверхні заготовок для прокату труб для встановлення елементного складу окалини. Аналіз було проведено з використанням портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра *PROSpector* (рис. 5 та табл. 2).



Рис. 5. Результати спектрального аналізу складу окалини

Таблиця 2

Результати дослідження елементного складу зразків окалини, %

Елементи	Номер зразку									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fe	99,61± 0,04	96,25± 0,09	99,1± 0,04	99,47± 0,19	99,52± 0,05	99,61± 0,04	99,10± 0,04	99,59± 0,04	99,53± 0,04	99,61± 0,04
Mn	0,24± 0,04	1,94± 0,05	0,25± 0,04	0,19± 0,05	0,37± 0,04	0,22± 0,04	0,25 ± 0,04	0,35 ± 0,04	0,33 ± 0,04	0,24± 0,04
Co	0,05± 0,13	0,02 ± 0,14%	0,08 ± 0,14	0,05 ± 0,08	0,02 ± 0,08	—	0,08 ± 0,14	—	0,04 ± 0,13	0,05± 0,13
Cu	0,04± 0,02	0,78 ± 0,04	0,50 ± 0,04	0,22 ± 0,14	0,04 ± 0,01	0,11 ± 0,03	0,50 ± 0,04	0,04 ± 0,02	0,04 ± 0,03	0,04± 0,02
Te	0,03± 0,17	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cr	0,01± 0,03	0,22 ± 0,04	0,02 ± 0,03	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	—	0,02± 0,03	—	0,02± 0,03	0,01± 0,03
Ni	—	1,54± 0,09	—	—	—	—	—	—	—	—
Mo	—	0,08 ± 0,01	0,01 ± 0,00%	—	—	—	0,01 ±0,00	—	—	—
As	—	0,06 ± 0,01	—	—	—	—	—	—	—	—
W	—	0,05 ± 0,01	—	—	—	—	—	—	—	—
Ti	—	—	0,05 ± 0,17	0,03 ± 0,10	0,02 ± 0,10	0,04 ± 0,17	0,05 ± 0,17	—	0,04± 0,17	0,03± 0,17

Результат аналізу виявив переважний вміст заліза у складі окалини, а також присутність елементів легувальників (Mn, Ni, Cr, Mo), що свідчить про складний склад сталі, з якого утворена окалина.

Для дослідів представлена характеристика зразків заготовок які нагріваються для подальшої прокатки труб, табл. 3.

Таблиця 3

Характеристика заготовок при прокатці

Марка сталі	Діаметр, мм	Довжина, мм	Маса, кг	Площа поверхні, м²	Час нагріву, хв	Температура нагріву °С
26Г2ТР	385	1500	1370	2,05	260	1305
20У	385	1800	1647	2,41	260	1290

1. Кільцева піч в якій нагрівається злиток металу, має 52 горілки, 47 з них продуктивністю 75 м³/год, 705 кВт; 5 горілок – продуктивністю 25 м³/год, 235 кВт.

2. Дві заготовки що нагрівались для подальшого формування з них труби для нафти.

Марка сталі – 20У; діаметр – 385 мм; розмір – 1800 мм.

Марка сталі – 26Г2ТР; діаметр – 385 мм; розмір – 1500 мм.

3. Час нагріву металу – 260 хв.

4. Температура нагріву металу – 1290-1305°C.

Склад атмосфери прийняти нормальним для навколишнього середовища.

Тиск навколишнього середовища прийняти наступним згідно технічних характеристик кільцевої печі

Тиск газу що поступає до печі: 7.35 кПА

Тиск повітря що поступає до печі 7,84 кПА

Тиск в робочому просторі печі 22,55 ПА

5. Газ – CH_4

Кількість металу, що перетворилась в окалину, визначалася за формулою відповідно до характеристик заготовок з металу 26Г2ТР та 20У (див. табл. 3):

$$y = \frac{0,75G_{ox}F_{sx}}{G_{sx}F_{nz}} \cdot 100\%,$$

де y – коефіцієнт окиснення металу у %; G_{ox} – маса окалини, кг; G_{sx} – маса заготовки, кг; F_{sx} – площа поверхні заготовки, м^2 ; F_{nz} – площа пластини окалини, м^2 .

Провели спостереження в якому: було взято 2 типи заготовки з двох типів сталі які пройшли нагрів в кільцевій печі за допомогою природного газу CH_4 , до певної температури, на зовнішній поверхні при взаємодії з атмосферним повітрям заготовки утворився шар окалини, який в свою чергу при охолодженні потріскався та мав різну структуру, та різні розміри шматків. Загальна товщина шару окалини на зразках мала товщину приблизно 8 мм (див. рис. 4).

Коефіцієнт окиснення металу склав 1,96% для заготовки марки сталі 20У; коефіцієнт окиснення металу для заготовки марки сталі 26Г2ТР склав 2,35%.

Середнє значення окиснення металу на металургійному підприємстві з виробництва труб близько 2,15%. Якщо на підприємстві середньомісячний план виробництва 7000 т це значить що утворення окалини за місяць 150,5 т. За рік утворення відходів окалини 1806 т.

Зважаючи на значну кількість утворення відходів окалини на трубопрокатному виробництві запропонована модель ефективного використання відходів та побічних продуктів виробництва (рис. 6).

Ця модель призведе до розширення матеріальної бази компанії за рахунок утилізації відходів, та дозволить металургійному підприємству використовувати повторно вторинну сировину, створить додаткову вартість шляхом переробки відходів, що зберігаються впродовж тривалого терміну, що значно знизить техногенне навантаження на навколишнє середовище. Впровадження моделі ефективного використання відходів та побічних продуктів виробництва сприятиме сталому розвитку виробництва.

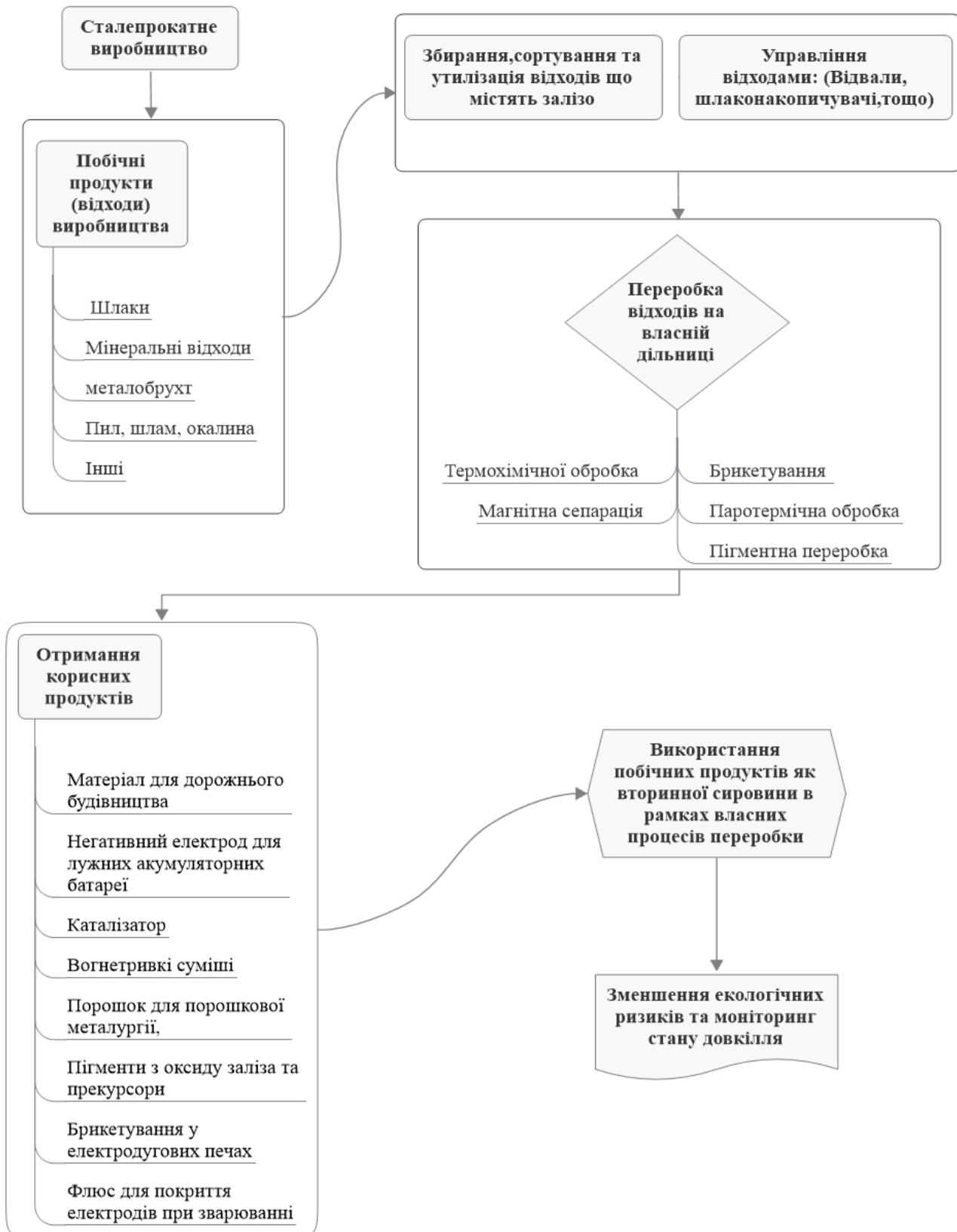


Рис. 6. Модель ефективного використання відходів та побічних продуктів виробництва

Висновки та рекомендації. В результаті проведення комплексного аналізу процесів окалиноутворення встановлено, що зі збільшенням об'ємів виробництва зростають і розміри об'ємів окалини що негативно буде впливати на навколишнє середовище. Враховуючи кількість та цінність відходів сталепрокатного виробництва, а також наявні проблеми, що стоять перед науковцями, розробка шляхів утилізації відходів є основним пріоритетом екологічної відповідальності та створення зеленого майбутнього, і збереження довкілля.

Задля зниження витрат на утилізацію рекомендуємо: застосовувати комплексні методи та інноваційні технології, із застосуванням циркулярної економіки що дозволять знизити екологічні ризики та покращать економічну доцільність утилізації та використання відходів сталепрокатного виробництва; вести постійний моніторинг складу та обсягів утворення окалини.

Перелік посилань

1. Рудь, В.Д., Савюк, І.В., Самчук, Л.М., & Повстяна, Ю.С. (2015). Аналіз кількості утворених відходів машинобудування та металургії на території України. *Вісник ТНТУ*, 3(79), 130–136.
2. Кріпак, С.М. (2006). *Удосконалення технологічних процесів підготовки металургійної сировини з метою утилізації замасленої прокатної окалини: автореф. дис. кандидата технічних наук: спец 05.16.02 «Металургія чорних матеріалів»*
3. Копач, П.І., & Чілий, Д.В. (2012). Аналіз процесів відходоутворення на виробництвах гірничо-металургійного регіон. *Екологія і природокористування*, 15, 118–132.
4. World Steel Association (2024). *World Steel in Figures*. Brussels. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2024.pdf>
5. Zhang, Q., Liu, G., & Liu, Y. (2024). Sustainable practices in steel manufacturing: Substitution elasticities between waste, raw materials, and energy for greenhouse gas emission reduction. *Journal of Cleaner Production*, 477, 143845. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143845>
6. Ali, M. H., Zailani, S., Iranmanesh, M., & Foroughi, B. (2019). Impacts of Environmental Factors on Waste, Energy, and Resource Management and Sustainable Performance. *Sustainability*, 11(8), 2443. <https://doi.org/10.3390/su11082443>
7. Fărcean, I., Proștean, G., Ardelean, E., Socalici, A., & Ardelean, M. (2024). Development of a Waste Management Strategy in a Steel Company. *Sustainability*, 16(11), 4378. <https://doi.org/10.3390/su16114378>
8. Rainer, R., Aguado-Monsonet, M.A., Roudier, S., & Delgado Sancho, L. (2013). *JRC Reference Report—Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU EU (Integrated Pollution Prevention and Control)*; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 38–76.
9. Iluțiu-Varvara, D.-A., & Aciu, C. (2022). Metallurgical wastes as resources for sustainability of the steel industry. *Sustainability*, 14, 5488. <https://doi.org/10.3390/su14095488>
10. Павличенко, А., & Палехова, Л. (2024). Драйвери та бар'єри переходу металургії України до циркулярної економіки. *Стале споживання та виробництво у глобальних ланцюгах створення вартості: монографія*, 105–120. https://mk.nmu.org.ua/ua/source/Monograph_Complete_2024%20with%20ISBN.pdf

ABSTRACT

Purpose. Comprehensive assessment of metal-containing waste generation in steel rolling production and development of effective methods for recycling production by-products.

Research methodology. Methods were used to study the processes of scale formation depending on the mass, size, composition of the workpiece, and steel grade. The elemental composition of the studied scale samples was determined using an X-ray fluorescence spectrometer. Experimental studies were conducted on the quantitative and qualitative composition of the scale formed after the workpiece passed through the ring furnace.

Research results. The main aspects of scale formation and the amount of waste generated were determined, and the problems and ways of recycling metal-containing waste were analyzed. A comprehensive study of the quantitative and qualitative composition of scale was conducted, and the potential for using scale components as secondary resources was investigated. A model for the efficient use of waste and by-products of production was developed.

Scientific novelty. The methodology for assessing the volume and composition of scale formed in steel rolling production depending on the temperature and composition of the atmosphere, heating time and component composition of the metal, as well as the cooling rate of the billet, has been further developed.

Practical significance. The results obtained can be applied in research on the comprehensive processing of metal-containing waste from steel rolling production, reducing the negative impact on the environment, and reducing disposal costs. The proposed “Model for the efficient use of waste and by-products of production” provides support for the development of integrated processing technologies, prospects for greening and environmental protection in metallurgical enterprises.

Keywords: *industrial waste, metallurgical production, scale, by-products of production, waste disposal.*

дата першого надходження статті до видання	02.07.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	03.08.2025
дата публікації (оприлюднення)	04.09.2025