

Д. О. Тимошенко<sup>1</sup>, студент, ORCID 0009-0001-2477-3310

В. В. Кухар<sup>1</sup>, д.т.н., проф., ORCID 0000-0002-4863-7233

Л.В. Шаульська<sup>1</sup>, д.ек.н., проф., ORCID 0000-0002-7919-6733

Д.В. Кононюк, студент<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ТОВ "Технічний університет "МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА"

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТАЛУРГІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ В КОНТЕКСТІ "ЗЕЛЕНОГО" ПЕРЕХОДУ

**Анотація.** Металургійна промисловість, будучи одним з ключових секторів світової економіки, відіграє важливу роль у забезпеченні різних галузей необхідними матеріалами. Однак традиційні методи виробництва металів характеризуються високим рівнем викидів парникових газів, значною енергоємністю та залежністю від викопного палива, що створює серйозні екологічні проблеми та суперечить цілям сталого розвитку. В умовах глобальної боротьби зі зміною клімату та зростаючого тиску з боку суспільства та регуляторів, металургійні підприємства змушені шукати шляхи зниження свого екологічного сліду та переходу до більш стійких моделей виробництва. Реінжиніринг виробництва, заснований на принципах зеленої металургії, стає ключовим інструментом для досягнення цих цілей. Він передбачає комплексний підхід, що включає технологічну модернізацію, цифровізацію, розвиток циркулярної економіки та співробітництво між різними учасниками ринку. Україна володіє значним металургійним потенціалом, також стоїть перед необхідністю модернізації та переходу до екологічно чистих технологій. Впровадження зеленої металургії дозволить Україні не лише знизити негативний вплив на довкілля, а й підвищити конкурентоспроможність своєї металургійної галузі на світовому ринку, створити нові робочі місця та забезпечити довгостроковий розвиток сектору. У цій статті розглядаються основні проблеми традиційної металургії, переваги зеленої металургії, ключові напрями реінжинірингу виробництва, а також роль гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) та виробництва прямо відновленого заліза (DRI) у переході до сталі металургії, яка допоможе металургійним компаніям знизити вуглецевий слід та відповідати новим законодавчим регуляторним вимогам від ЄВМ. Особливу увагу приділено елементам менеджменту та етапам впровадження реінжинірингу, що дозволяє представити цілісну картину процесу трансформації металургійної галузі.

**Ключові слова:** зелена металургія, реінжиніринг виробництва, зниження

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

викидів, сталий розвиток, DRI (залізо прямо відновлене), ГЗК (гірничозбагачувальні комбінати), екологічно чисті технології, модернізація, енергоефективність, менеджмент.

**Посилання для цитування:** Тимошенко Д. О., Кухар В. В., Шаульська Л. В., Кононок Д. В. Порівняльний аналіз екологічної ефективності металургійних технологій виробництва сталі в контексті зеленого переходу. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 282-291. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-282-291>.

**Вступ.** Металургійна промисловість, будучи одним з ключових секторів світової економіки, сьогодні опиняється на перехресті екологічних викликів. Традиційні геотехнологічні методи видобутку ґрунтовані на переведенні корисної копалини у рухомий стан за допомогою здійснення на місці його залягання теплових, масообмінних, хімічних і гідродинамічних процесів [1], методи виробництва, що спираються на видобувне паливо та енергоємні процеси, призводять до значних викидів CO<sub>2</sub> та негативного впливу на довкілля. У контексті глобальної боротьби зі зниженням викидів CO<sub>2</sub>, стає очевидним, що без радикальних змін металургійна галузь не зможе забезпечити сталий розвиток. Україна, маючи потужний металургійний комплекс, також стоїть перед вибором: продовжувати експлуатацію застарілих технологій чи обрати шлях екологічної модернізації. Перехід до зеленої металургії - це не лише про впровадження новітніх технологій, а й про комплексну трансформацію всієї галузі, включаючи зміну підходів до управління та організації виробництва.

Ключові напрямки реінжинірингу металургійного виробництва:

1. Технологічна модернізація:

1.1. Заміна доменних печей на більш екологічні електродугові печі, що дозволяє скоротити викиди CO<sub>2</sub> [1, 2] та використовувати вторинну сировину (металобрухт);

1.2. Впровадження технологій прямого відновлення заліза (DRI) [2] з використанням водню як відновника, що має потенціал повністю декарбонізувати процес виробництва сталі [3];

1.3. Використання відновлюваних джерел енергії для живлення виробничих процесів;

1.4. Впровадження систем уловлювання та зберігання вуглецю (CCS) для зниження викидів парникових газів.

2. Цифровізація:

2.1. Застосування штучного інтелекту та машинного навчання для оптимізації виробничих процесів, прогнозування та запобігання аварійним ситуаціям;

2.2. Використання Інтернету речей (IoT) для моніторингу та

контролю обладнання в режимі реального часу, що дозволяє підвищити ефективність та знизити витрати на обслуговування;

2.3. Впровадження цифрових двійників для моделювання та оптимізації виробничих процесів ще на етапі проєктування.

3. Розвиток циркулярної економіки:

3.1. Створення ефективної системи збору, сортування та переробки металобрухту [4];

3.2. Розвиток технологій переробки відходів металургійного виробництва для отримання цінних матеріалів;

3.3. Співпраця з іншими галузями для створення замкнутих циклів виробництва та споживання.

4. Співпраця та інновації:

4.1. Створення партнерства між металургійними підприємствами, науковими установами та державними органами для спільного вирішення проблем та розробки нових рішень;

4.2. Підтримка досліджень та розробок у сфері зеленої металургії. Створення сприятливого інвестиційного клімату для залучення коштів на модернізацію та впровадження інновацій.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю трансформації металургійної промисловості України у відповідь на глобальні екологічні виклики та зростаючий тиск з боку міжнародних регуляторів (введення вуглецевого податку СВАМ) [5]. Традиційні методи виробництва сталі характеризуються високим рівнем викидів парникових газів та негативним впливом на довкілля. Впровадження принципів "зеленої" металургії є критично важливим для: зниження екологічного сліду галузі та досягнення цілей сталого розвитку, підвищення конкурентоспроможності української металургії на світовому ринку.

**Метою** дослідження є аналіз шляхів реінжинірингу металургійного виробництва в Україні для переходу до "зеленої" сталі та забезпечення сталого розвитку галузі шляхом впровадження інноваційних технологій, таких як Midrex та ЕДСП, з метою зниження викидів CO<sub>2</sub> та відповідності вимогам СВАМ.

**Методика дослідження.** Дане дослідження базується на комплексному підході, що поєднує в собі глибокий аналіз фактичних даних, отриманих в процесі експлуатації автоматизованої системи моніторингу викидів на ПАТ "Запоріжсталь", та детальний порівняльний аналіз з передовими галузевими практиками, зокрема, з технологією Midrex для прямого відновлення заліза та електродуговою сталеплавильною піччю (ЕДСП).

Безперервне обчислення та збір даних про концентрації пилу та

діоксиду сірки у відхідних газах агломераційного цеху та доменних печей здійснюється за допомогою сучасної автоматизованої системи моніторингу викидів рис. 1, встановленої на ПАТ "Запоріжсталь". Система має безперервний моніторинг, вона працює 24/7, що дозволяє отримувати актуальні дані про викиди в будь-який момент часу. Завдяки високій точності та надійності, система моніторингу на ПАТ "Запоріжсталь" відповідає найсуворішим екологічним стандартам. Її впровадження дозволило значно підвищити рівень екологічної безпеки, покращити управління виробничими процесами, враховуючи вплив на довкілля.

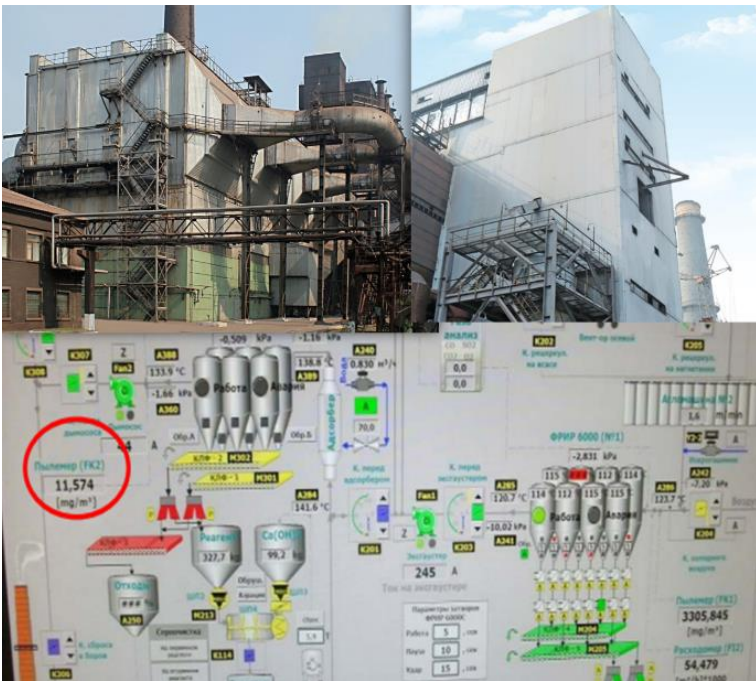


Рисунок 1 – Автоматизована система моніторингу викидів на аглофабриці

Зібрані дані можуть бути проаналізовані та представлені у вигляді графіків та звітів, що дозволяє оцінити динаміку викидів, виявити пікові значення та визначити ефективність природоохоронних заходів.

На підприємстві використовуються високоточні датчики моніторингу пилу D-R 808 фірми Durag (рис. 2) на аглодоменному переділі, що забезпечують високу точність вимірювань та інтеграцію в загальнозаводську систему контролю. Контроль ключових

технологічних параметрів (температури, розрідження та витрати газів) дозволяє відстежувати динаміку процесів та виявляти потенційні відхилення.



Рисунок 2 – Прилад Durag що застосовується у аглодоменному переділі

У доменному та мартенівському переділі, крім автоматизованої системи моніторингу, також застосовуються датчики фірми Sintrol S304 рис. 3. Ці датчики призначені для вимірювання концентрації пилу в промислових газах та відрізняються високою точністю, надійністю та стійкістю до агресивних середовищ. Застосування датчиків Sintrol S304 дозволяє отримувати додаткові дані про викиди пилу в доменному та мартенівському переділах, що доповнюють інформацію, отриману від основної системи моніторингу АСУ. Датчики допомагають підвищити точність контролю викидів та забезпечити більш ефективне управління природоохоронною діяльністю на цих ділянках виробництва. Своєчасність виявлення відхилень від нормативних показників та вживання заходів для їх усунення, допомагає завжди знизити негативний вплив на навколишнє середовище і не заступати за рамки дозволених викидів, які прописані та затверджені у нормативних документах та актах для виробництва.



Рисунок 3 – Датчик Sintrol S304 що застосовується у доменному та мартенівському переділі

В роботі використано дані, отримані в процесі експлуатації автоматизованої системи моніторингу викидів на ПАТ "Запоріжсталь".

Ці дані включають вимірювання концентрацій пилу та діоксиду сірки в відхідних газах агломераційного цеху та доменних печей, а також додаткові дані про викиди пилу в доменному та мартенівському переділах, отримані за допомогою датчиків Sintrol S304 та Durag. Залучено референтні дані від провідних виробників сучасного металургійного обладнання, таких як Midrex та Danieli. Ці дані дозволяють порівняти фактичні показники викидів на ПАТ "Запоріжсталь" з показниками, досяжними при використанні передових технологій, та оцінити потенціал для скорочення викидів.

У дослідженні застосовано комплексний підхід до аналізу та оцінки ефективності переходу металургійної промисловості до зелених технологій, який включає наступні методи:

- використання сучасних датчиків, контрольно-вимірювальних приладів, систем збору та передачі даних, а також спеціалізованого програмного забезпечення для візуалізації, аналізу та архівування інформації, що забезпечує високу точність та надійність отриманих даних;

- застосування АСУ ТП для забезпечення оптимального режиму роботи газоочисних установок та ефективного контролю основних технологічних параметрів;

- проведення статистичного аналізу часових рядів даних про викиди для виявлення тенденцій, сезонних коливань та кореляцій з технологічними параметрами, що дозволяє глибше зрозуміти фактори, що впливають на рівень викидів;

- порівняння фактичних показників викидів аглодоменного виробництва з показниками технології Midrex + ЕДСП для об'єктивної оцінки потенціалу зниження викидів.

**Результати дослідження.** Результати технології Midrex + ДСП від компанії Danieli, наведені у табл. 1, демонструють значну перевагу у скороченні викидів CO<sub>2</sub> та інших забруднювачів у порівнянні з традиційним аглодоменним переділом та мартенівською піччю (табл. 2). Впровадження технології Midrex + ЕДСП дозволить відповідати суворим екологічним стандартам та уникнути фінансових втрат, пов'язаних з вуглецевим податком СВАМ, підвищить конкурентоспроможність на ринку виробників сталі, забезпечить зниження викидів CO, пилу, SO<sub>2</sub> та NO<sub>x</sub>, що сприятиме покращенню якості повітря та навколишнього середовища.

Аналіз показує, що існуюча система моніторингу викидів на ПАТ "Запоріжсталь" дозволяє ефективно контролювати та управляти викидами в межах чинних нормативів. Однак, з урахуванням введення вуглецевого податку СВАМ та посилення екологічних вимог в ЄС,

традиційні методи виробництва сталі, ймовірно, не зможуть забезпечити дотримання нових стандартів. Це ставить під загрозу конкурентоспроможність української металургії на європейському ринку. Бенчмаркінг з технологією Midrex + ЕДСП наведений на рис. 4 дозволить всебічно оцінити потенціал зниження викидів на ПАТ "Запоріжсталь" та розробити детальну стратегію поетапної модернізації виробництва з урахуванням економічних та екологічних аспектів. Результати дослідження допоможуть обґрунтувати інвестиції в природоохоронні заходи, демонструючи їх економічну ефективність та позитивний вплив на навколишнє середовище, що сприятиме підвищенню екологічної відповідальності підприємства. Впровадження сучасної системи моніторингу та реалізація стратегії модернізації на основі отриманих результатів дослідження сприятимуть підвищенню екологічної відповідальності підприємства [6]. Це позитивно вплине на її репутацію, дозволить залучити нові інвестиції та забезпечить сталий розвиток у довгостроковій перспективі.

Таблиця 1 – Викиди при роботі на установці Midrex та ДСП, кг/т

Процес	CO <sub>2</sub>	CO	Пил	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
Midrex (пряме відновлення заліза)	400	10	5	5	2
ДСП	100	1	1		1
Разом	500	11	6	6	3

Таблиця 2 – Викиди в аглодоменному виробництві з мартенівською піччю, кг/т

Процес	CO <sub>2</sub>	CO	Пил	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
<i>Аглодоменне виробництво</i>					
<i>Аглофабрика</i>					
Процес спікання агломерату	300	15	30	40	10
<i>Доменний процес</i>					
Спалювання коксу	1650	30	20	20	5
Випуск чавуну та шлаку	55	10			
Колошниковий газ	50	10			
<i>Мартенівський переділ</i>					
Спалювання палива	300	10	10	10	5
Окислення домішок	35	5	5		
Разом	2390	80	65	70	20



Рисунок 4 – Бенчмаркінг застарілого процесу з новітнім процесом

Технологія Midrex + ЕДСП демонструє суттєве зниження викидів  $\text{CO}_2$  (до 70%) порівняно з традиційним аглодоменним виробництвом [7]. Це пов'язано з відсутністю необхідності в коксохімічному виробництві та доменній печі, які є основними джерелами  $\text{CO}_2$ .

Ігнорування вимог СВАМ дійсно несе значні фінансові ризики для українських металургів підприємств. Вуглецевий податок може обчислюватися десятками мільйонів євро щорічно для великих виробників, що суттєво вплине на рентабельність експорту металопродукції до ЄС.

### Висновки

У статті досліджено актуальну проблему реінжинірингу металургійної промисловості України в контексті переходу до зеленої сталі та сталого розвитку. Проаналізовано основні проблеми традиційної металургії, пов'язані з високим рівнем викидів  $\text{CO}_2$  та забруднюючих речовин. На основі аналізу фактичних даних ПАТ "Запоріжсталь" та їх порівняння з передовими технологіями (Midrex та ЕДСП) продемонстровано суттєвий потенціал зниження викидів  $\text{CO}_2$  (до 70%) та інших забруднювачів при переході на зелені технології. Показано, що реінжиніринг металургійної промисловості України на основі принципів зеленої металургії є не лише необхідним кроком для досягнення екологічних цілей, а й економічно вигідним рішенням.

### Перелік посилань

1. Маланчук З. Р., Маланчук Є. З., Корнієнко В. Я. Спеціальні технології видобутку корисних копалин : навч. посіб. Рівне : Нац. ун-т вод. госп-ва та природокористування, 2017. 266 с.

2. Аналіз скорочення викидів вуглекислого газу з доменної печі в умовах використання перспективних та існуючих технологій доменної плавки / О. Л. Чайка, Б. В. Корнілов, А. О. Москалина, В. В. Лебідь, М. М. Ізюмський, М. Г. Джигота // Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. 2023.



Вип. 37. С. 158-174. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-158-174>.

3. Тубольцев Л. Г., Чайка О. Л., Бабаченко О. І. Перспективи розвитку металургійного виробництва в Україні за рахунок використання нових технологій. Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. 2023. Вип. 37. С. 4-25. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-4-25>.

4. Modeling MIDREX Based Process Configurations for Energy and Emission Analysis / S. Sidhartha, B. Rahul, G. R. Gour, K. S. Prodip // *Steel research international*. 2018. Vol. 89. № 2. P. 1–60. <http://doi.org/10.1002/srin.201700248>.

5. Cecilia B., Lionel F. EU in search of a Carbon Border Adjustment Mechanism. *Energy Economics*. 2023. Vol. 1. № 1. P. 1–10. <http://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106673>.

6. Ecological Problems Related to Mining-Metallurgical Industries and Innovatory, Energy-Efficient Ways of Solving Them / G. Jishkariani, G. Jandieri, D. Sakhvadze, G. Tavadze, G. Zakharov, G. Onishvili, Z. Aslamazishvili // *Engineering*. 2012. Vol. 4. № 2. P. 83–89. <http://doi.org/10.4236/eng.2012.42011>.

7. Yuzhang J., Zhongyan C., Shufu Y., Yongxu C., Yujie L., Tianchi J., Xin L., Weijun Z. Development and Application of Hydrogen-Based Direct Reduction Iron Process. *Processes*. 2024. Vol. 12. № 9. P. 1-20. <http://doi.org/10.3390/pr12091829>.

## References

1. Malanchuk, Z. R., Malanchuk, Ye. Z., & Kornienko, V. Ya. (2017). *Special technologies for the extraction of minerals*. Rivne: National University of Water Management and Nature Use

2. Chaika, O. L., Kornilov, B. V., Moskalyna, A. O., Lebid, V. V., Iziumskyi, M. M., & Dzhyhota, M. H. (2023). Analysis of reduction of carbon dioxide emissions from blast furnace under conditions of using advanced and existing blast furnace melting technologies. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 158-174. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-158-174>

3. Tuboltsev, L. G., Chaika, O. L., & Babachenko, O. I. (2023). Prospects of technological development of metallurgical production in Ukraine due to the use of new technologies. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 4-25. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-4-25>

4. Sidhartha, S., Rahul, B., Gour, G. R., Prodip, K. S. (2018). Modeling Midrex Based Process Configurations for Energy and Emission Analysis. *Steel research international*, 89(2), 1–60. <http://doi.org/10.1002/srin.201700248>

5. Cecilia, B., & Lionel, F. (2023). EU in search of a Carbon Border Adjustment Mechanism. *Energy Economics*, 1(1), 1–10. <http://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106673>

6. Jishkariani, G., Jandieri, G., Sakhvadze, D., Tavadze, G., Zakharov, G., Onishvili, G., & Aslamazishvili, Z. (2012). Ecological Problems Related to Mining-Metallurgical Industries and Innovatory, Energy-Efficient Ways of Solving Them. *Engineering*, 4(2), 83–89. <http://doi.org/10.4236/eng.2012.42011>

7. Yuzhang, J., Zhongyan, C., Shufu, Y., Yongxu, C., Yujie, L., Tianchi, J., Xin, L., & Weijun, Z. (2024). Development and Application of Hydrogen-Based Direct Reduction Iron Process. *Processes*, 12(9), 1-20. <http://doi.org/10.3390/pr12091829>.

**D. O. Tymoshenko**<sup>1</sup>, Student, ORCID 0009-0001-2477-3310  
**V. V. Kukhar**<sup>1</sup>, D. Sc. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0002-4863-7233  
**L.V. Shaulska**<sup>1</sup>, D. Sc. (Economics), Professor, ORCID 0000-0002-7919-6733  
**D.V. Kononyuk**<sup>1</sup>, Student

<sup>1</sup> LLC "TECHNICAL UNIVERSITY "METINVEST POLYTECHNIC"

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF STEELMAKING TECHNOLOGIES IN THE CONTEXT OF THE "GREEN" TRANSITION

**Abstract.** The metallurgical industry, as one of the key sectors of the global economy, plays a crucial role in providing various industries with essential materials. However, traditional metal production methods are characterized by high levels of greenhouse gas emissions, significant energy consumption, and reliance on fossil fuels, leading to serious environmental problems and contradicting sustainable development goals. In the face of the global fight against climate change and growing pressure from society and regulators, metallurgical enterprises are forced to seek ways to reduce their environmental footprint and transition to more sustainable production models. Production reengineering based on the principles of green metallurgy is becoming a key tool for achieving these goals. It involves a comprehensive approach that includes technological modernization, digitalization, development of a circular economy, and cooperation between different market participants. Ukraine possesses significant metallurgical potential and also faces the need for modernization and transition to environmentally friendly technologies. The implementation of green metallurgy will allow Ukraine not only to reduce the negative impact on the environment, but also to increase the competitiveness of its metallurgical industry in the global market, create new jobs, and ensure the long-term development of the sector. This article examines the main problems of traditional metallurgy, the advantages of green metallurgy, key areas of production reengineering, as well as the role of mining and processing plants and direct reduced iron (DRI) production in the transition to sustainable metallurgy, which will help metallurgical companies to reduce their carbon footprint and comply with new legislative regulatory requirements of the CBAM. Particular attention is paid to management elements and stages of reengineering implementation, which allows for a holistic view of the metallurgical industry transformation process.

**Key words:** green metallurgy, production re-engineering, emission reduction, sustainable development, DRI, GOKs, environmentally friendly technologies, modernization, energy efficiency, management.

**For citation:** Tymoshenko, D. O., Kukhar, V. V., Shaulska, L. V., & Kononyuk, D. V. (2024). Comparative analysis of the environmental efficiency of steelmaking technologies in the context of the "green" transition. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 282-291. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-282-291>

Стаття надійшла до редакції збірника 22.10.2024 р.  
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)