

УДК 669.1:005(474)

Л. Г. Тубольцев<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-9540-3037О. Л. Чайка<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-1678-2580О. І. Бабаченко<sup>1</sup>, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7501-4173<sup>1</sup> *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

## ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА В УКРАЇНІ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**Анотація.** Розробка напрямів декарбонізації виробництва сталі з метою підвищення енергоефективності та поліпшення екологічних показників шляхом скорочення викидів діоксиду вуглецю є актуальним та перспективним завданням сьогодення в світовій металургії. В останні роки для промислового виробництва з'явилося нове обмеження – Паризька угода ООН від 2015 року зобов'язує країни забезпечити перехід до виробництва сталі з обмеженими або нульовими викидами оксиду вуглецю (CO<sub>2</sub>), щоб зменшити вплив промисловості на екологію. Метою статті є аналіз стратегічних аспектів технологічного розвитку металургійної промисловості та декарбонізації виробництва сталі на основі трансферу технологій і розробка теоретико-методологічних основ аналізу напрямів енергозбереження. У роботі наведено результати аналізу напрямів скорочення викидів діоксиду вуглецю та зменшення витрати вуглецю в металургійному виробництві за рахунок вдосконалення існуючих та впровадження інноваційних технологій. Наведено результати теоретичного та експериментального дослідження зменшення викидів CO<sub>2</sub>, що проводилися у світ та в Україні. Світовими лідерами в розробці технічних та технологічних рішень щодо скорочення викидів CO<sub>2</sub> в металургійному виробництві є компанії більшості промислово розвинених країн. Наведено приклади нових технологій, що зменшують викиди CO<sub>2</sub>. Показано, що розробки з декарбонізації виробництва сталі нині ще не досягли рівня, який вимагає значного скорочення викидів CO<sub>2</sub>. Перспектива створення інноваційних технологій пов'язана з використанням водню у металургійному виробництві. Але рішення, які пропонують закордонні компанії, не завжди можливо застосувати для металургійного виробництва України, вони вимагають наукового опрацювання та адаптації до умов України, в тому числі, з урахуванням енергобалансу підприємств, сировинних умов, рівня технології та конкурентоспроможності металопродукції, наявності енергоносіїв. Визначено умови, яким повинна відповідати загальна Стратегія декарбонізації виробництва сталі. В Україні необхідно розробити власну концепцію зменшення викидів CO<sub>2</sub> з урахуванням збереження конкурентоспроможності продукції. Тому дуже важливо оцінити та проаналізувати напрями скорочення викидів CO<sub>2</sub> в металургії для подальшої зменшення викидів діоксиду вуглецю стосовно до існуючих і перспективних умов функціонування металургійних підприємств України.

**Ключові слова:** виробництво сталі, екологія, декарбонізація, технології, викиди CO<sub>2</sub>.

**Посилання для цитування:** 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>

**Вступ.** Попередній аналіз показує, що сучасний прогрес у розвитку металургії України зумовлений декількома втратами позиційної переваги. У стані війни з російською агресією металургія України втратила свої позиційні переваги. Більше половини металургійних підприємств зруйновано, інші значно зменшили виробництво, втратили доступ до експортного та внутрішнього ринку. Ще нещодавно найважливішими показниками розвитку галузі були збереження та розширення експортних можливостей, забезпечення високого рівня конкурентоспроможності, економічні переваги за рахунок низької частки так званих «стратегічних витрат».

У той же час глобальні тенденції, такі як «міграція» виробництва в країни з нижчими витратами, підвищення операційної ефективності та стандартизація процесів позначаються на ефективності підприємств. В останні роки для промислового виробництва з'явилося нове обмеження – Паризька угода ООН від 2015 року зобов'язує країни не допустити підняття температури на Землі більше ніж на 2 градуси від рівня доіндустріального періоду. Метою кліматичної Паризької угоди є намагання до 2055–2080 років утримати зростання глобальної середньої температури значно нижче 2 °С порівняно з доіндустріальним рівнем. Ця концепція за сценарієм 2 °С (2DS) була прийнята у Паризькій угоді відповідно до Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (РКЗК ООН), яка вимагає обмеження глобального потепління в межах 2 градусів Цельсія над доіндустріальними температурами до кінця цього століття. Наразі поверхня Землі тепліша на приблизно 1,2 градуса. Тому тенденція декарбонізації виробництва сталі охоплює все більше галузей промисловості, зокрема і металургійне виробництво. В таких жорстких умовах перед металургійними підприємствами України постають проблеми не тільки фізичного відновлення після військової агресії РФ, але й оптимізації витрат і підвищення ефективності виробництва.

Мета, закладена в Паризькій угоді, тобто нульові викиди приблизно в середині століття, змінила дебати про декарбонізацію важкої промисловості. До Парижа очікувалося, що до 2050 року сектори металургії, цементу та бетону, хімікатів та інших матеріалів скоротять

абсолютні викиди приблизно вдвічі за допомогою таких заходів, як енергоефективність, біопаливо та уловлювання та зберігання вуглецю. Однак також стає зрозуміло, що дуже низькі викиди у важкій промисловості технічно можливі тільки за допомогою цілого ряду нових опцій, таких, як: управління попитом, ефективність використання матеріалів, екологічна електрифікація, використання водню у технологічних процесах, зменшення вартості відновлюваної електроенергії тощо. Існуючі моделі, що використовуються для аналізу декарбонізації, зазвичай не відображають деталей, необхідних для повного розуміння варіантів зміни технологій. Тому необхідним є створення відповідної Стратегії, застосування системного моделювання та комплексного підходу для досягнення нульових викидів економічно обґрунтованими засобами [1].

Чорна металургія є однією з найбільш енергоємною галуззю у світі. Вона відповідальна за викиди 7-9 % загального антропогенного CO<sub>2</sub>. Тому дуже важливо, щоб металургійний сектор досяг значного скорочення викидів вуглецю. За останні десятиліття металургійна промисловість знизила інтенсивність енергоспоживання на 60%, в результаті чого поточне виробництво чавуну та сталі працює близько до своїх термодинамічних меж. Можливості для подальшого підвищення енергоефективності чорної металургії обмежені на рівні 15–20 %. Таким чином, лише підвищення енергоефективності не призведе до значних скорочень викидів CO<sub>2</sub>, яких вимагає Паризька угода. Позитивні сценарії декарбонізації виробництва сталі передбачають, що металургійна промисловість зробить найбільший внесок у промислову декарбонізацію.

**Метою** статті є аналіз стратегічних аспектів технологічного розвитку металургійної промисловості та декарбонізації виробництва сталі на основі трансферу технологій і розробка теоретико-методологічних основ аналізу напрямів енергозбереження. Для вирішення поставленого завдання в статті використано системний підхід до аналізу взаємозв'язку технологій і факторів розвитку галузевих технологій.

### **Основні результати дослідження.**

Враховуючи, що металургійні підприємства України в середньому працюють більше 50 років, розвиток технологічних систем металургійної промисловості необхідно розглядати в контексті еволюційної стратегії. Така стратегія повинна мати декілька рівнів реалізації, що передбачають [2]:

1. Мікрорівень – внутрішній корпоративний трансфер технологій. На цьому рівні інноваційний розвиток підприємств металургійної промисловості повинен спиратися, в основному, на власні інвестиційні

ресурси (амортизаційні відрахування, частина чистого прибутку, кредити), які підприємства можуть спрямувати на інвестиційне забезпечення інновацій у відповідності поточної економічної ситуації.

2. Галузевий рівень – передбачає налагодження зв'язків між підприємствами. Відсутність такої взаємодії шкідлива для промисловості, оскільки одна група технологій може принести користь іншим.

3. Макрорівень – передбачає формування єдиної промислово-технологічної політики щодо виробництва та використання матеріалів і технологій металургії, включаючи наукові дослідження, створення пілотних зразків обладнання, проектування продукції для різних галузей промисловості. У цьому контексті актуальним є широке залучення результатів фундаментальних і прикладних досліджень інститутів національних академій наук, державних наукових центрів і вищих навчальних закладів для вирішення стратегічних науково-технологічних і виробничих завдань. На цьому рівні важлива роль належить створенню державної промислової політики.

Сучасне металургійне виробництво характеризується складними схемами переробки вхідної сировини. Відповідно до цього ключовим фактором слід вважати технологічний аспект як інструмент перспективного виживання і розвитку металургійної галузі України. У зв'язку з цим Стратегія декарбонізації промислового виробництва має передбачати:

- початкові політичні зобов'язання, щоб визначити можливості нульових викидів вуглецю на основі місцевих ресурсів;
- визначення переліку технологічних напрямів модернізації виробництва за умовами країни та їхня оцінка;
- дослідження технологічних процесів та підтримка створення пілотних установок для декарбонізації виробництва;
- використання державних ресурсів у реалізації процесів декарбонізації виробництва сталі та у закупівлі декарбонізованої продукції;
- законодавче забезпечення процесів декарбонізації виробничих процесів.

Математичну модель для оцінки ефективності трансферу технологій в рамках побудованої Стратегії можна представити у вигляді структурної схеми (рис. 1), в якій можна оцінити вплив вхідних векторів трансферу технологій.

Формалізацію завдання впровадження технології можна розглядати на основі таких основних рівнів:

- 1 – наука – дослідження та розроблення технологій;
- 2 – проектування – розроблення технологічних рішень;

- 3 – пілотні проєкти – зразки інноваційного обладнання;
- 4 – виробництво – виготовлення обладнання;
- 5 – обладнання – що передається по каналах трансферу технологій;
- 6 – сировина – виробники сировини;
- 7 – сумісники – товари та послуги;
- 8 – споживачі – кінцеві споживачі товарів і послуг;
- 9 – державна Стратегія розвитку промисловості;
- $\Sigma$  – Промислове підприємство.

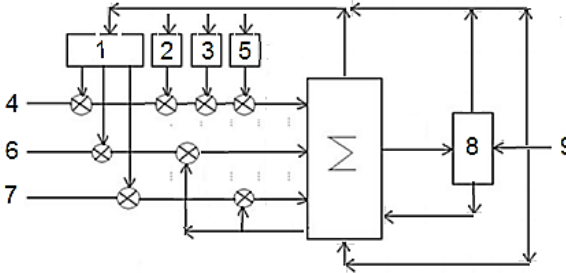


Рисунок 1 – Структурна схема математичної моделі для оцінки ефективності трансферу технологій в рамках Стратегії (створено авторами).

Перелік векторів трансферу технологій можна значно розширити за ступенем складності технології. Інтеграція цих векторів у інноваційну мережу реалізує принцип технологічної платформи при розробці стратегічних планів досліджень і розробок у галузі виробництва сплавів і сталей різного призначення, технологій їх виробництва, обробки та реалізації за допомогою всіх зацікавлених сторін; залучення додаткових державних, корпоративних і приватних фінансових та інших матеріальних ресурсів для проведення необхідних досліджень і розробок. Однак, слід враховувати зворотні зв'язки між векторами. Зміна одного вектору неминуче призведе до зміни інших, які передбачені структурною схемою виробництва. Наприклад, реалізуючи схему декарбонізації виробництва сталі за рахунок впровадження водневих технологій, слід враховувати, що це призведе не тільки до зменшення споживання вуглецю, а і різкого зростання потреби у електроенергії, на що сучасне виробництво може бути не готовим.

Основними завданнями технологічного розвитку впровадження інноваційних розробок у промисловість можна вважати вдосконалення та модернізацію вже діючих підприємств та створення нових підприємств нового технологічного рівня. Тому ми повинні враховувати результати досліджень, які визначають перелік майбутніх

пріоритетів чорної металургії (екологія, технологічна зміна фізичної структури чорних металів, видалення та переробка відходів, технологія комп'ютерного прогнозування властивостей, моделювання та впровадження сучасних високопродуктивних виробничих процесів).

Системні інновації передбачають радикальний реінжиніринг існуючого пакету технологій, що призводить до створення нового виробництва (будівництва нового заводу). Наприклад, активно розвивається технологія виплавки металів без використання доменних печей. У свою чергу, спеціалізовані інновації передбачають конкретні технологічні зміни або зміни процесу управління (або групи процесів) в рамках пакету технологій.

Стратегію технологічного розвитку металургії пропонуємо взаємопов'язано розглядати на наступних рівнях:

– внутрішньокорпоративний трансфер технологій. В умовах ринкових відносин інноваційний розвиток підприємств металургійної промисловості, в основному, повинен спиратися на власні інвестиційні ресурси (амортизаційні відрахування та частину чистого прибутку, яку підприємства можуть спрямовувати на інвестиційне забезпечення інноваційної діяльності);

– галузевий рівень: налагодження зв'язків між металургами, коли, наприклад, технології космічної металургії можуть, навіть у разі неповного використання свого потенціалу, дати значний ефект для відносно традиційних галузей металургії. Відсутність такої взаємодії шкідлива для промисловості, оскільки одна група технологій може принести користь іншим;

– формування єдиної промислово-технологічної платформи розробки, виробництва та використання матеріалів і технологій металургії. У цьому контексті актуальним є широке залучення результатів фундаментальних і прикладних досліджень інститутів національних академій наук, державних наукових центрів і вищих навчальних закладів для вирішення стратегічних науково-технологічних і виробничих завдань.

У світі 90 % первинного металу виплавляється у доменних печах, а структура виплавляння сталі докорінно змінилася протягом століття. В світі у 1980 році зникло виробництво сталі у агрегатах Бесемера, практично не виплавляється сталь у мартенах. Частка виплавляння сталі в конвертерах сягає 70 %, в електropечач – 25 %, сталі прямого відновлення –5% (рис. 2).

Прогнозується, що структура виплавляння сталі до 2050 року зміниться докорінно (рис. 3). Частка виплавляння сталі в конвертерах зменшиться до 40 %, виплавляння сталі в електropечач збільшить до 60 %.



Рисунок 2 – Зміна частки видів сталі за термін 1860-2020 роки (створено авторами з використанням прогностичних даних світових експертів).

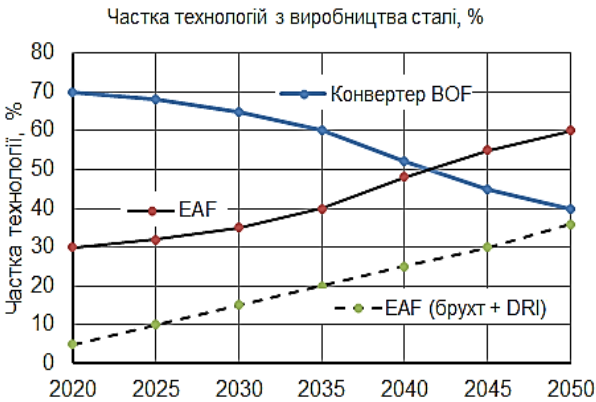


Рисунок 3 – Прогнозована зміна частки технологій виробництва сталі за термін 2020-2050 роки. (створено авторами з використанням прогностичних даних світових експертів).

Існує кілька стратегій, за допомогою яких можна зменшити викиди парникових газів у металургійній промисловості.

Сучасні засоби зменшення витрат вуглецю та декарбонізації в чорній металургії:

- застосування відомих та доступних енергозберіжних технологій виробництва металопродукції;
- уловлювання, збереження та використання оксидів вуглецю CO та CO<sub>2</sub> за технологіями CCS та CCS/U;
- перехід металургійних заводів на схему відновлене залізо DRI і виплавка сталі в електродуговій печі (схема DRI+EAF);
- застосування технології прямого відновлення оксидів заліза (з використанням водню та біогазу);
- виробництво екологічно чистої сталі за рахунок використання екологічно чистої електроенергії;
- відновлювальна плавка;
- плазмова плавка на основі водню;

- електроліз;
- заміна палива на безвуглецеве (біогаз чи біомасу);
- перехід на «зелений» водень замість «сірого» водню;
- вторинна переробка металобрухту;

Розглянемо декілька з зазначених вище технологій.

#### Технологія BF-BOF.

Традиційний інтегрований завод за технологією BF-BOF використовує процеси агломерації, коксові печі, доменні печі, блоки розділення повітря, кисневі конвертери, агрегати лиття та прокатки. Викиди  $\text{CO}_2$  за цією технологією складають 1,8-2,2 т  $\text{CO}_2$ /т сталі. Традиційне інтегроване виробництво сталі на основі доменної печі (BF-BOF) є нині переважаючим виробничим маршрутом, на який припадає 74 % світового виробництва сирової сталі. Хоча виробництво сталі за схемою BF-BOF призводить до високого споживання енергії та викидів парникових газів у металургійній промисловості, вона належить до однієї з ефективних щодо виробництва металу. Аналіз удосконалених BF-BOF технологій показує, що доменні піч ще не використала свої можливостей щодо зменшення викидів  $\text{CO}_2$  і, вочевидь, будуть широко використовуватися надалі в усьому світі в середньо- та довгостроковій перспективі. Але прогнозується, що до 2050 року традиційна технологія доменної плавки з використанням коксу буде замінена на технологію з використанням водню (рис. 4.) [3].

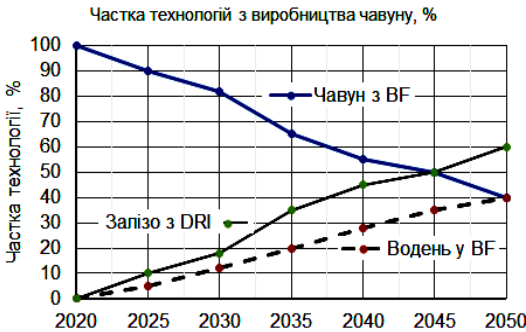


Рисунок 4 –  
Прогнозована частка технологій з виробництва чавуну до 2050 року (створено авторами з використанням прогнозних даних світових експертів, зокрема [3].

Однак, собівартість виплавлення чавуну в BF залежить від багатьох факторів, таких як: підготовка металізованої сировини (спікання, брикетування), якість коксу, температура гарячого дуття, технічний стан вогнетривкої футеровки і системи охолодження, технологічний рівень вимірювального обладнання, зовнішні умови, які опосередковано впливають на безперебійність роботи печі, наприклад ситуація на ринку, тощо. Тому важливо розглянути можливі



технології, що можуть сприяти прогресу декарбонізації у металургійній галузі.

Потенціал енергозбереження та скорочення викидів парникових газів може бути реалізований за рахунок використання наступних найкращих доступних технологій [4] доменного виробництва.

Використання руди та шихтових матеріалів високої якості (Технологія зменшить викиди CO<sub>2</sub> на 15-80 кг/т чавуну).

Вдування пиловидного вугілля ПВП (Якщо на світовому рівні застосовувати пиловугільне паливо на рівні 180 кг/т чавуну, можливо зменшити викиди CO<sub>2</sub> на 10 млн. тонн).

Турбіни для використання тиску колошникового газу (Потенціал зниження викидів CO<sub>2</sub> в усьому світі складає 10 Мт/рік).

Підвищення тиску в доменній печі на > 0,5 бар (Зниження викидів внаслідок зменшення споживання енергії).

Контроль процесу доменної плавки за рахунок використання математичних моделей (Викиди може бути зменшено на 22,6 кг CO<sub>2</sub>/т чавуну).

Рекуперация тепла від доменних печей (За глобального застосування цієї технології, викиди CO<sub>2</sub> можливо потенційно скоротити на 20 млн. тонн щорічно).

Підвищена температура гарячого дуття понад 1000<sup>0</sup>C (Економія енергії призведе до зменшення викидів парникових газів).

Ін'єкція коксового газу КГ у ДП (Зменшення викидів парникових газів та зменшення спалювання КГ).

Ін'єкція природного газу ПГ у ДП (Зниження викидів 54,9 кг CO<sub>2</sub>/т чавуну за введенням 140 кг ПГ / т чавуну).

Поліпшення відновлювальних властивостей доменного газу (Викиди можливо зменшити на 4,0 кг CO<sub>2</sub>/т чавуну).

Сухе очищення доменного газу (Збільшує потужність систем пиловидалення на 30% у порівнянні з пиловловлюванням у вологому стані).

Ін'єкція пластикових відходів (Кожна тонна пластмас буде мати викиди CO<sub>2</sub>, аналогічні викидам при використанні 750 кг коксу).

Ін'єкція окислених відпрацьованих олій (Економія коксу становить близько 15 кг/т чавуну).

Використання біомаси в ДП (Біомаса є нейтральною для CO<sub>2</sub>, якщо супроводжується суворими умовами її виробництва).

Агломерат з вмістом вуглецевих композитних сумішей (При додаванні 30% вуглецю кількість доменного коксу може бути зменшено на 30%).

Використання брикетованого вугілля (Викиди парникових газів становлять 0,30-0,55 т CO<sub>2</sub>/т сталі порівняно з 0,92 т CO<sub>2</sub>/т сталі при

виробництві з вугіллям).

Рециклінг колошникового газу ДП (Економія 26% коксу, скорочення викидів CO<sub>2</sub> на 15%).

Використання тепла шлаку ДП (Зменшення викидів CO<sub>2</sub> є можливим за адекватним використанням тепла).

Серед передових технологій найкращі результати з економії енергоресурсів і зниженні викидів CO<sub>2</sub> у доменному виробництві досягаються при реалізації енергозберігаючої технології ГВГ (гарячі відновлювальні гази). Забезпечується зниження витрати коксу на 30% на 1 тону чавуну. Витрати природного газу повністю виключаються.

Технологія доменної плавки з рециркуляцією верхнього газу (TGR).

В дослідженні [5] було обрано два варіанти реалізації технології «енергія-газ», а також киснево-доменну піч і найкращі технології рециркуляції газу. Ця інтеграція ґрунтується на трьох стратегіях: перетворення доменної печі (ДП) на киснево-паливний процес, рециркуляція доменного газу (ДП) назад у саму доменну піч та використання процесу метанізації для генерації CH<sub>4</sub> і також введення його в BF. Ці значення підкреслюють важливість проведення майбутніх досліджень щодо впровадження уловлювання вуглецю та перетворення електроенергії на газ у промисловому секторі.

Технологія з киснево-паливним спалюванням і рециркуляцією верхнього газу (TGR) полягає в рециркуляції вихідних газів (головним чином CO<sub>2</sub>, CO та H<sub>2</sub>) назад у доменну піч (BF) для зменшення споживання коксу, що призвело до того, що кінцевий доменний газ містить менше N<sub>2</sub>. Введення коксу в доменну піч було частково замінено синтетичним метаном. Частина доменного газу рециркулювали у BF, а іншу частину направляли на установку виробництва електроенергії. Тут викиди BF були використані для отримання синтетичного метану шляхом поєднання їх з H<sub>2</sub> з низькотемпературного електролізера. Таким чином, була встановлена безперервна переробка CO<sub>2</sub>.

За даними [5], загальні викиди CO<sub>2</sub> на інтегрованому заводі склали 1718 кг/т сталі, причому основним джерелом викидів є BF (1368 кг/т сталі). Викиди CO<sub>2</sub> доменної печі можуть коливатися від 1270 до 1550 кг/т сталі, а загальні викиди досягають 2200 кг/т сталі. Зниження викидів CO<sub>2</sub> за будь-якої з двох згаданих технологій склало 8%, при цьому скорочення використання вугільного палива склало 12,8%.

Технологія H<sub>2</sub>-BF (рис. 5).

Маршрут BF-BOF забезпечує 60% виробництва сталі в Європі. Більшість викидів припадає на доменну піч і коксохімічний завод. H<sub>2</sub>-BF має потенціал для зменшення викидів як на коксохімічному заводі,

так і на доменній печі, оскільки він зменшує кількість необхідного вугілля та утворює воду лише після реакції із залізною рудою замість вуглекислого газу. Сьогодні найпоширенішими допоміжними відновниками є пиловугільний порошок (PC), нафта, природний газ або їх комбінація, усі вони утворюють  $\text{CO}_2$ . Проведені експериментальні дослідження доменної плавки показують, що пряме використання водню у діючих BF має ефективність зниження викидів  $\text{CO}_2$  на рівні 20 % [6].

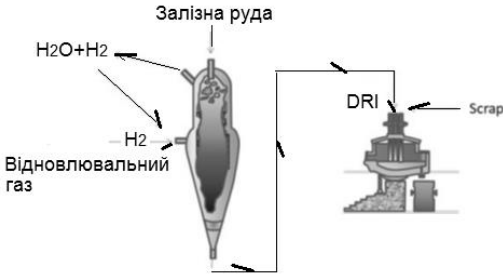


Рисунок 5 – Принципова технологічна схема процесу DRI-EAF для виробництва сталі (за матеріалами [7]).

Щоб зменшити інтенсивність викидів вуглецю все більше країн і регіонів запускають власні програми виробництва сталі з низьким вмістом вуглецю. Одна з цих стратегій з декарбонізації металургійної промисловості полягає в тому, щоб додати до виробничих потужностей окремий блок уловлювання  $\text{CO}_2$ , заснований на різних методах уловлювання  $\text{CO}_2$ . На рис. 6 наведено прогнозовані викиди  $\text{CO}_2$  за різними технологіями доменної плавки. Модернізація BF-BOF системою уловлювання та зберігання вуглецю після згоряння (BF-BOF-CCS) може зменшити викиди до 60 %, але цього недостатньо для досягнення довгострокових цілей (рис. 6).

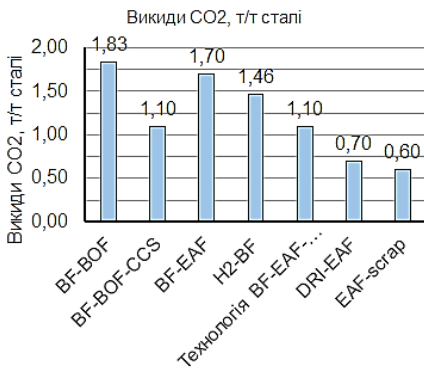


Рисунок 6 – Прогнозовані викиди  $\text{CO}_2$  за різними технологіями доменної плавки (створено авторами з використанням прогнозних даних світових експертів, зокрема [4, 6].

### Технології DRI-EAF для виробництва сталі.

Технологія DRI-EAF включає процес відновлення DRI на основі вугілля та процес відновлення DRI на основі газу з подальшою виплавою продукту DRI у EAF. Під час процесу для отримання суміші відновних газів, включаючи високу концентрацію  $H_2$  і деяку кількість  $CO$ , зазвичай використовуються природний газ (NG) і гази, що відходять від металургійних агрегатів.

Нині в процесі DRI в основному використовує NG, на який в даний час припадає понад 90% загального річного виробництва DRI. Щоб зменшити викиди  $CO_2$  і реалізувати сталий розвиток металургійних заводів, у наступному передбачається подальше підвищення частки водню в суміші газів, а у перспективі використовувати чистий водень, що є тенденцією розвитку технології DRI у майбутньому [5].

Одним з варіантів розвитку процесів DRI є технологія Midrex. Розробники представили дві модифікації процесу Midrex NG, які використовують частково або повністю водень як відновний газ, що забезпечить 3-етапний перехід до водневої економіки [8]. Технологія Midrex є досить гнучкою, щоб дозволити змінювати джерело енергії з плинном часу та врахувати ймовірні коливання доступності водню. Пропонується декілька кроків до реалізації технології:

Крок 1. Будівництво заводу за технологією Midrex NG і негайно скористатися перевагами скорочення викидів  $CO_2$ .

Крок 2: Поступове збільшення вмісту водню у відновлювальному газі до 30% водню, коли він стане більш доступним.

Крок 3: Перевід установки Midrex на технологічну схему Midrex  $H_2$ , щоб скористатися всіма перевагами водневої технології, коли водень стане широко доступним і економічно ефективним. Цей підхід дає можливість «виграти час», мінімізуючи технологічні ризики [9].

Отже, дослідження кінетики відновлення оксиду заліза з використанням газових сумішей, що містять  $H_2$ , є необхідним для розробки стратегій підвищення ефективності відновлення та продуктивності зі зниженням виділенням  $CO_2$  [10].

Один з варіантів технологічної схеми технології DRI-EAF для виробництва сталі наведено на рис. 6 [7].

Пряме відновлення на основі водню ( $H_2$ -DRI) може бути майже без викидів  $CO_2$ , якщо працювати з воднем з відновлюваної електроенергії [11].

#### Технологія SALCOS.

Технологія SALCOS базується на виробництві сталі DRI-EAF на основі водню. Проект пов'язаний з проектом GrInHy, що передбачає виробництво зеленого промислового водню. Винахідники Salzgitter AG, Fraunhofer очікують скорочення  $CO_2$  на 82%  $CO_2$  при роботі з 55%  $H_2$ ; 95%  $CO_2$  при роботі зі 100%  $H_2$  порівняно з поточним

виробництвом BF-BOF.

Технологія SUSTEEL, заснована на виробництві сталі DRI-EAF на основі водню (водневе плазмове відновлення: процес HPSR). Проект пов'язаний з водневою технологією майбутнього H<sub>2</sub>. Авторами винаходу є Voestalpine Group, K1-MET Metallurgical Competence Center, Primetals, MUL.

Гібридний процес «Hybrit».

Шведські компанії SSAB, LKAB і Vattenfall, розпочало проект під назвою «Hybrit» («Воднева революційна технологія виробництва чавуну») [12, 13]. В технології нового покоління використовується водень, який видаляє кисень із залізної руди з виділенням водної пари замість вуглекислого газу, що є найбільш суттєвою перевагою. Поки що немає рішення щодо того, яку технологію виробництва водню використовуватимуть, але експерименти вже продемонстрували зниження витрат на його виробництво до 40%. Технологія передбачає значну участь шведської держави, яка володіє частинами компаній і надала фінансування через Шведське енергетичне агентство. Таким чином, ідея процесу Hybrit повністю стає екологічною сталлю. Процес Hybrit відноситься до кількох досягнень, які включають використання водню як відновника, причому водень генерується шляхом електролізу. Передбачається, що пілотна фаза буде завершена в 2025 році, після чого відбудуться випробування на демонстраційних установках між 2025 і 2035 роками. За словами Hybrit, для промислового заводу знадобиться система електролізу потужністю 1 ГВт [14].

Продукти гарячого прямого відновлення DRI (пряме відновлене залізо) або «губчасте залізо», яке подається в кисневий конвертер або EAF, змішується з відповідною кількістю брухту. Конкретна частка суміші поки що не була виконана в бізнес-масштабі, але варіанти компонування DRI-scrab було випробувано. Проте, ключові труднощі все ще залишаються.

Процес ISF.

ISF – шахтна доменна піч з горизонтальним поперечним перерізом за формою, близькою до овалу. Завантаження для ISF – це гарячий агломерат (~300 °C), який завантажується безпосередньо з агломератійної нитки, попередньо нагрітий кокс (~800 °C), гаряче повітря (~1000 °C) і іноді кисень (для підвищення продуктивності). Кокс спалюється перед фурмами, а газ, що утворюється, забезпечує тепло і окис вуглецю, необхідні для відновлення оксидів заліза. Моделювання процесу в шахтній печі, такій як ISF, потребує уваги до її складності, яка полягає в одночасному співіснуванні трьох агрегатних станів рідкої, твердої та газової фаз, між якими відбуваються фізико-

хімічні процеси. Спостереження за пічкою вказує на її неоднозначну роботу з точки зору масо- і теплообмінних процесів, тому математичне моделювання може допомогти в розумінні та висвітленні недоліків технології ISF.

#### Шахтні печі.

Однією з переваг використання шахтних печей є можливість застосовувати водень в якості відновника оксидів заліза. Збагачення воднем дуття в закритому об'ємі діючих шахтних печей дозволяє на 10-20 % скоротити викиди вуглецю. А лабораторні дослідження показують, що теоретично ефективність прямого відновлення водневою металургійною шахтною печі може досягати 50%-98%, що є ключовим напрямком досліджень і розробок. Проте промислова технологія ще не готова [15].

#### Технології CCS та CCS/U.

Уловлювання вуглецю є однією з найбільш перспективних альтернатив для досягнення мети декарбонізації. Більше того, якщо утилізація вуглецю шляхом перетворення електроенергії на газ буде інтегрована з уловлюванням вуглецю, інтерес до цієї альтернативи в металургійному секторі може значно підвищитися [16]. Уловлювання та зберігання вуглецю (CCS), ймовірно, зіграє певну роль у декарбонізації сталеливарного сектору. CCS можна використовувати безпосередньо на сталеливарному заводі. Викиди можна мінімізувати найшвидше шляхом впровадження CCS у доменні печі та конвертери якомога раніше. Більшість експертів бачать найбільший потенціал зниження викидів парникових газів у застосуванні технологій уловлювання, збереження та використання CO<sub>2</sub>, розвитку відновлюваної енергогенерації, заміщення викопних видів палива «зеленими», збільшення парку електротранспорту. Відповідно, ці ж напрями вимагатимуть і найбільших обсягів інвестицій. Найближчим часом найбільш реалістичним виглядає активний розвиток відновлюваної енергетики. Її технології вважаються найбільш розвиненими та готовими для використання.

#### Сталеплавильні процеси.

Основні процеси виробництва сталі в металургійній промисловості базуються на трьох етапах: підготовка сировини, виробництво чавуну, потім виробництво сталі. Виробництво сталі має дві основні технології: BOF (основний конвертер) і більш сучасний EAF (електрична дугова піч). Усі ці процеси можна завершити багатьма різними типами сталі для конкретних потреб. Проте металургійні технології поки що залежать від подібної фундаментальної основи, як перший процес Бессемера, який використовує кисень повітря для зниження вмісту вуглецю в залізі.

Є декілька перспективних технологічних розробок в сталеплавильній промисловості.

Органічний цикл Ренкіна (ORC) має той самий принцип роботи, що й цикл Ренкіна, але ORC залежить від роботи турбогенератора. Він перетворює теплову енергію в механічну і, нарешті, електричну. Різниця полягає в тому, що технологія ORC не створює пару з води, а випаровує природну рідину. Таким чином, він забезпечує більш повільний оберт турбіни, знижує тиск і відсутність стирання металевих частин. Ця система може виробляти достатньо енергії з теплових відходів сталеплавильного виробництва, крім того, вуглецевий слід технології зменшується, при цьому зменшується потреба у воді для систем охолодження [17-20].

#### Струминний процес.

Одним із останніх досягнень у технології конвертерного виробництва є струминний процес – інноваційний спосіб збільшення кількості брухту та гарячебрикетованого заліза прямого відновлення (НВІ) у конвертерному виробництві сталі. Внутрішня енергія утворюються під час етапу продування киснем, що дозволяє подавати приблизно 20% брухту в конвертери. Зовнішня подача енергоносіїв дозволяє довести показник до 30%. Цю додаткову потужність зазвичай можна отримати за допомогою електроенергії або вугілля [21].

Струминний процес призначений для більш ефективного та рентабельного використання хімічної енергії вугілля в конвертері. Висока адаптивність системи полегшує впровадження технології. Гіпотетично, за допомогою цієї адаптивної процедури можливо переробляти до 100 % металобрухту. До 30% витрат на брухт додавати вугілля не потрібно. Доцільно згадати, що таку технологію ще у 60-ті роки досліджували в Інституті чорної металургії НАН України, але тоді ще не склалися умови для промислового її впровадження [22].

#### Електроліз розплавлених оксидів.

Електроліз розпавленого оксиду (Molten Oxide Electrolysis) [21] – це нетрадиційна електрометалургійна система, яка дозволяє швидко отримувати метал у рідкому стані з оксидної сировини (рис. 7). Це обіцяє значне спрощення всього процесу та мінімізацію істотної потреби в енергії. Доведено, що в електролізі розплавлених оксидів використовуються анодні матеріали, якими є графіт для використання з феросплавами та титан та іридій для використання із залізом. Для виробництва металу без технологічного вуглецю необхідно подолати кілька проблем, таких як температура процесу, корозія металів з урахуванням умов електролізу та стирання вогнетривких матеріалів [22-26].

Тим не менш, процес пропонує виняткові властивості з точки зору

застосовності до багатьох металів, а також високотемпературних операцій для отримання рідкого металу. Огляд транспортних властивостей розплавлених оксидів показує, що безпрецедентний вихід можна передбачити як багатообіцяючу функцію для тоннажного виробництва в сталеливарній промисловості.



Рисунок 7 – Принципова схема електролізу розплавленого оксиду [17].

Досягнення електролізу розплавлених оксидів створені в Массачусетському технологічному інституті. Лабораторія професора Donald R. Sadoway's довела, що можна виробляти сталь без викидів, виробляючи недорогий інертний анод у лабораторних масштабах за допомогою NASA, Американського інституту чавуну та сталі та Центру Deshpande Center at MIT. Дивлячись на стан технології електродних матеріалів, здається, що кількісні критерії проектування як для катода, так і для анода продовжують розроблятися [17].

Нині в Україні склалася стратегічна ситуація, що передбачає відновлення порушених війною РФ металургійних підприємств. Попередньо передбачено використання технологій DRI-EAF [27].

Перелік напрямків наукових досліджень, що можуть зацікавити вітчизняних та іноземних замовників.

Розробка параметрів різних процесів виробництва металопродукції на основі програмного моделювання для реалізації компонентів воєнного та космічного застосування зі спеціальними сплавами

Проектування та аналіз композитних конструкцій на основі системного та багатомасштабного моделювання.

Розроблення через моделювання металургійних сплавів та їх обробка.

Розробка та оптимізація параметрів процесу декарбонізації виробництва сталі.

Розвиток інноваційних процесів та розробка їх техніко-економічних параметрів.

Проектування та розробка промислових датчиків і систем, що домагають розробленню критеріїв для управління технологічними



процесами виробництва металопродукції .

Управління технологіями, координація промисловості, управління інтелектуальною власністю, технічна документація та інформаційно-пропагандистська діяльність.

Розробка та науково-технічний супровід виробництва виробів для широкого застосування, військової та космічної техніки.

Неруйнівний контроль, оцінка та аналіз металічних матеріалів з використанням традиційних і передових методів.

Проведений аналіз свідчить, що розробки з декарбонізації виробництва сталі нині ще не досягли рівня, який вимагає значного скорочення викидів CO<sub>2</sub>. Перспектива створення інноваційних технологій пов'язана з використанням водню у металургійному виробництві. Але рішення, які пропонують закордонні компанії, не завжди можливо застосувати для металургійного виробництва України, вони вимагають наукового опрацювання та адаптації до умов України, в тому числі, з урахуванням енергобалансу підприємств, сировинних умов, рівня технології та конкурентоспроможності металопродукції, наявності енергоносіїв. Тому для умов України важливим є орієнтація наукових розробок на створення процесів декарбонізації виробництва сталі та розроблення відповідної комплексної Стратегії на середньо-строкову та довгострокову перспективу.

### **Висновки**

Визначено умови, яким повинна відповідати загальна Стратегія декарбонізації виробництва сталі. В Україні необхідно розробити власну концепцію зменшення викидів CO<sub>2</sub> з урахуванням збереження конкурентоспроможності продукції.

У зв'язку з цим Стратегія декарбонізації промислового виробництва має передбачати:

- початкове політичне зобов'язання, щоб визначити можливості нульових викидів вуглецю на основі місцевих ресурсів;
- підвищення оцінки матеріаломісткості парникових газів (ПГ) за допомогою ціноутворення на ПГ або регулювання;
- дослідження технологічних процесів та підтримка створення пілотних установок для декарбонізації виробництва;
- використання державних ресурсів у закупівлі декарбонізованої продукції;
- законодавче забезпечення процесів декарбонізації виробничих процесів.

### **Перелік посилань**

1. Bataille C., Nilsson L. J., Jotzo F. Industry in a net-zero emissions world:

New mitigation pathways, new supply chains, modelling needs and policy implications. *Energy and Climate Change*. 2021. Vol. 2, 100059. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100059>

2. Omelyanenko V. Analysis of strategical aspects of technology transfer in metallurgy. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. № 12. P. 394-397. [https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI\\_2015\\_12/061Omelyanenko.pdf](https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_12/061Omelyanenko.pdf)

3. Environmental impact evaluation of an iron and steel plant in China: Normalized data and direct/indirect contribution / T. Liang et al // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 264, 121697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121697>

4. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU. Integrated Pollution Prevention and Control. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC69967>

5. CO<sub>2</sub> Recycling in the Iron and Steel Industry via Power-to-Gas and Oxy-Fuel Combustion / J. Perpiñán et al // *Energies*. 2021. Vol. 14. Issue 21, 7090. <https://doi.org/10.3390/en14217090>

6. Cavaliere P. *Hydrogen Assisted Direct Reduction of Iron Oxides*. Springer Cham, 2022. 399 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-98056-6>

7. The retardation kinetics of magnetite reduction using H<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O mixtures / W.-H. Kim et al // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013. Vol. 38, Issue 10, P. 4194-4200, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.147>

8. World direct reduction statistics. Midrex Technologies, Inc. 2007. URL: [www.midrex.com](http://www.midrex.com)

9. Decarbonization scenarios for the iron and steel industry in context of a sectoral carbon budget: Germany as a case study / C. Harprecht et al // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 380, Part 2, 134846. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134846>

10. Influence of H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O Content on the Reduction of Acid Iron Ore Pellets in a CO-CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> Reducing Atmosphere / A. Abdelrahim et al // *ISIJ International*. 2020, Vol. 60, Issue 10, P. 2206-2217. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-734>

11. Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies / M. Fishedick et al // *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 84. P. 563-580. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.063>

12. Hydrogen steelmaking for a low-carbon economy. A joint LU-SEI working paper for the HYBRIT project. Stockholm Environment Institute: Stockholm, 2018. <https://www.sei.org/wp-content/uploads/2018/09/hydrogen-steelmaking-for-a-low-carbon-economy.pdf/>

13. En:former (23 November 2023). We've climbed the foothills, now let's tackle the mountain. URL: <https://www.en-former.com/en/weve-climbed-the-foothills-now-lets-tackle-the-mountain/>

14. Белоусова К. У Швеції проєкт HYBRIT може забезпечити “зелену революцію” у металургії (Дата звернення: 12 Серпня 2022). <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/u-shvecii-proiekt-hybrid-mozhe-zabezpechiti-zelenu-revoluciju>

revoljuciju-u-metalurgii/

15. Development and progress on hydrogen metallurgy / J. Tang et al. / *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2022. Vol. 27. Issue 6. P. 713-723. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2021-4>

16. Plaza M. G., Martinez S., Rubiera F. CO<sub>2</sub> Capture, Use, and Storage in the Cement Industry: State of the Art and Expectations. *Energies*. 2020, Vol. 13. Issue 21, 5692. <https://doi.org/10.3390/en13215692>

17. YENA Engineering. 4 Latest Technologies in Steel Industry. URL: <https://yenaengineering.nl/4-latest-technologies-in-steel-industry/>

18. The ORC Technologyh. 2023. URL: <https://www.turboden.com/turboden-orc-technology/1062/the-orc-technology>

19. Organic Rankine cycle. 2023. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_Rankine\\_cycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_cycle)

20. Organic Rankine cycle. CoolScienceVideos. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=jU2AIRRIQDc>

21. Converter carbon steelmaking – boost your competitive edge with full-line solutions from the process inventor. (2023). Primetals Technologies Jet Process. 2023. URL: <https://www.primetals.com/portfolio/steelmaking/converter-carbon-steelmaking/>

22. Определение показателей кислородно-конвертерной плавки при переходе на малошлаковые технологии / В. П. Корченко и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2004. Вып. 9. С. 97–106

23. Molten Oxide Electrolysis (MOE) for Steelmaking. 2023. URL: <https://www.bostonmetal.com/moe-technology/>

24. Temple J. A new way to make steel could cut 5% of CO<sub>2</sub> emissions at a stroke. *MIT Technology review*. 24 September 2018. URL: <https://www.technologyreview.com/2018/09/24/2024/this-mit-spinout-could-finally-clean-up-steel-one-of-the-globes-biggest-climate-polluters/>

25. Journal of The Electrochemical Society. URL: <http://jes.ecsdl.org/content/162/1/E13.full>

26. Allanore A., Yin L., Sadoway D. A new anode material for oxygen evolution in molten oxide electrolysis. *Nature*. 2013. Vol. 497. P. 353-356. <https://doi.org/10.1038/nature12134>

27. Григорій Бондар. Декарбонізація металургії стане можливою в Україні завдяки меморандуму "Метінвесту" з SMS group. URL: <https://www.unian.ua/ecology/dekarbonizaciya-virobnictva-stali-ta-chavunu-stane-mozhlivoyu-v-ukrajini-zavdyaki-memorandumu-mizh-metinvestu-z-sms-group-11643385.html>

## References

1. Bataille, C., Nilsson, L. J., & Jotzo, F. (2021). Industry in a net-zero emissions world: New mitigation pathways, new supply chains, modelling needs and policy implications. *Energy and Climate Change*, 2, 100059. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100059>

2. Omelyanenko V. (2015). Analysis of strategical aspects of technology

- transfer in metallurgy. *Metallurgical and Mining Industry*, (12), 394-397. [https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI\\_2015\\_12/061Omelyanenko.pdf](https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_12/061Omelyanenko.pdf)
3. Liang, T., Wang, S., Lu, C., Jiang, N., Long, W., Zhang, M., & Zhang, R. (2020). Environmental impact evaluation of an iron and steel plant in China: Normalized data and direct/indirect contribution. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121697>
  4. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU. Integrated Pollution Prevention and Control. (2012). <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC69967>
  5. Perpiñán, J., Bailera, M., Romeo, L. M., Peña, B., & Eveloy, V. (2021). CO<sub>2</sub> Recycling in the Iron and Steel Industry via Power-to-Gas and Oxy-Fuel Combustion. *Energies*, 14(21), 7090. <https://doi.org/10.3390/en14217090>
  6. Cavaliere, P. (2022). *Hydrogen Assisted Direct Reduction of Iron Oxides*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-98056-6>
  7. Kim, W.-H., Lee, S., Kim, S.-M., & Min, D.-J. (2013). The retardation kinetics of magnetite reduction using H<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(10), 4194-4200, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.147>
  8. World direct reduction statistics. (2007). Midrex Technologies, Inc. <https://www.midrex.com>
  9. Harpprecht, C., Naegler, T., Steubing, B., Tukker, A., & Simon, S. (2022). Decarbonization scenarios for the iron and steel industry in context of a sectoral carbon budget: Germany as a case study. *Journal of Cleaner Production*, 380, Part 2, 134846. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134846>
  10. Abdelrahim, A., Iljana, M., Omran, M., Vuolio T., Bartusch, H., & Fabritius, T. (2020). Influence of H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O Content on the Reduction of Acid Iron Ore Pellets in a CO-CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> Reducing Atmosphere. *ISIJ International*, 60(10), 2206-2217. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-734>
  11. Fishedick, M., Marzinkowski, J., Winzer, P., & Weigel, M. (2014). Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies. *Journal of Cleaner Production*, 84, 563-580. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.063>
  12. Hydrogen steelmaking for a low-carbon economy. A joint LU-SEI working paper for the HYBRIT project. (2018). Stockholm Environment Institute. <https://www.sei.org/wp-content/uploads/2018/09/hydrogen-steelmaking-for-a-low-carbon-economy.pdf/>
  13. En:former (23 November 2023). We've climbed the foothills, now let's tackle the mountain. <https://www.en-former.com/en/weve-climbed-the-foothills-now-lets-tackle-the-mountain/>
  14. Bielousova, K. (12 August 2022). U Shvetsii proiekt HYBRIT mozhe zabezpechyty "zelenu revoliutsiiu" u metalurhii [In Sweden, the HYBRIT project can bring about a "green revolution" in metallurgy]. [in Ukrainian] <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/u-shvecii-proiekt-hybrit-mozhe-zabezpechiti-zelenu-revoljuciju-u-metalurgii/>
  15. Tang, J., Chu, M.-S., Li, F., Feng, C., Liu, Z.-G., & Zhou, Y.-S. (2022). Development and progress on hydrogen metallurgy. *International Journal of*

*Minerals, Metallurgy and Materials*, 27(6), 713-723.  
<https://doi.org/10.1007/s12613-020-2021-4>

16. Plaza, M. G., Martínez, S., Rubiera, F. (2020). CO<sub>2</sub> Capture, Use, and Storage in the Cement Industry: State of the Art and Expectations. *Energies*, 13(21), 5692. <https://doi.org/10.3390/en13215692>

17. YENA Engineering. 4 Latest Technologies in Steel Industry. <https://yenaengineering.nl/4-latest-technologies-in-steel-industry/>

18. The ORC Technologyh. (2023). <https://www.turboden.com/turboden-orc-technology/1062/the-orc-technology>

19. Organic Rankine cycle. (2023). [https://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_Rankine\\_cycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_cycle)

20. Organic Rankine cycle. CoolScienceVideos. <https://www.youtube.com/watch?v=jU2AlRRlQDc>

21. Converter carbon steelmaking – boost your competitive edge with full-line solutions from the process inventor. (2023). Primetals Technologies. <https://www.primetals.com/portfolio/steelmaking/converter-carbon-steelmaking/>

22. Korchenko, V. P., Tuboltcev, L. G., Poliakov, V. F., Padun, N. I., & Semykina, T. S. (2004). Opređenje pokazatelei kislorodno-konverternoi plavki pri perekhode na maloshlakovye tekhnologii. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 9, 97–106

23. Molten Oxide Electrolysis (MOE) for Steelmaking. (2023). <https://www.bostonmetal.com/moe-technology/>

24. Temple, J. (24 September 2018). A new way to make steel could cut 5% of CO<sub>2</sub> emissions at a stroke. *MIT Technology review*. URL: <https://www.technologyreview.com/2018/09/24/2024/this-mit-spinout-could-finally-clean-up-steel-one-of-the-globes-biggest-climate-polluters/>

25. Journal of The Electrochemical Society. URL: <http://jes.ecsdl.org/content/162/1/E13.full>

26. Allanore, A., Yin, L., & Sadoway, D. (2013). A new anode material for oxygen evolution in molten oxide electrolysis. *Nature*, 497, 353-356. <https://doi.org/10.1038/nature12134>

27. Bondar, H. (15 Desember 2021). Dekarbonizatsiia metalurhii stane mozhlyvoiu v Ukraini zavdiaky memorandumu "Metinvestu" z SMS group [in Ukrainian]. UNIAN: informatsiine ahentstvo. <https://www.unian.ua/ecology/dekarbonizaciya-virobnictva-stali-ta-chavunu-stane-mozhlyvovu-v-ukrajini-zavdyaki-memorandumu-mizh-metinvestu-z-sms-group-11643385>

**L. G. Tuboltsev**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-9540-3037

**O. L. Chaika**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-1678-2580

**O. I. Babachenko**<sup>1</sup>, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7501-4173

<sup>1</sup> *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

## **PROSPECTS OF TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF METALLURGICAL PRODUCTION IN UKRAINE DUE TO THE USE OF NEW TECHNOLOGIES**

**Abstract.** The development of directions for decarbonization of steel production

*"Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії". 2023. Випуск 37  
 "Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy". 2023. Collection 37*

with the aim of increasing energy efficiency and improving environmental indicators by reducing carbon dioxide emissions is an urgent and promising task of today's world metallurgy. In recent years, a new constraint has appeared on industrial production – the 2015 UN Paris Agreement requires countries to ensure the transition to steel production with limited or zero carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions in order to reduce the impact of industry on the environment. The purpose of the article is to analyze the strategic aspects of the technological development of the metallurgical industry and the decarbonization of steel production on the basis of technology transfer and the development of theoretical and methodological bases for the analysis of energy saving directions. The work presents the results of the analysis of directions for reducing carbon dioxide emissions and reducing carbon consumption in metallurgical production due to the improvement of existing and the introduction of innovative technologies. The results of theoretical and experimental research on reducing CO<sub>2</sub> emissions conducted in the world and in Ukraine are presented. The world leaders in the development of technical and technological solutions for reducing CO<sub>2</sub> emissions in metallurgical production are the companies of most industrialized countries. Examples of new technologies that reduce CO<sub>2</sub> emissions are given. It is shown that developments in the decarbonization of steel production have not yet reached the level that requires a significant reduction in CO<sub>2</sub> emissions. The prospect of creating innovative technologies is related to the use of hydrogen in metallurgical production. But the solutions proposed by foreign companies are not always possible to apply to the metallurgical production of Ukraine, they require scientific study and adaptation to the conditions of Ukraine, including taking into account the energy balance of enterprises, raw material conditions, the level of technology and competitiveness of metal products, the availability of energy carriers. The conditions to which the general strategy of decarbonization of steel production must comply have been determined. In Ukraine, it is necessary to develop its own concept of reducing CO<sub>2</sub> emissions, taking into account the preservation of the competitiveness of products. Therefore, it is very important to evaluate and analyze the directions for reducing CO<sub>2</sub> emissions in the metallurgy of the country and abroad for the further reduction of carbon dioxide emissions in relation to the existing and prospective conditions of operation of metallurgical enterprises of Ukraine.

**Key words:** steel production, ecology, decarbonization, technologies, CO<sub>2</sub> emissions.

**For citation:** 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>

*Стаття надійшла до редакції збірника 01.11.2023 р.  
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*