

Вілкул Юрій Григорович, доктор технічних наук, професор, президент Академії гірничих наук України, ORCID: 0000-0003-3979-3231

Ступнік Микола Іванович, доктор технічних наук, професор, ректор, Криворізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3318-3889

Савельєв Сергій Геннадійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва, Криворізький національний університет, ORCID: 0000-0001-6263-9422

Єременко Геннадій Іванович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відкритих гірничих робіт, Криворізький національний університет, ORCID: 0009-0006-9997-6784

Ярош Тетяна Петрівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва, Криворізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3455-9630

ПЕРСПЕКТИВИ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ УКРАЇНИ В «ЗЕЛЕНУ»

В представлений роботі визначені фізико-хімічні особливості типової схеми безкоксового виробництва сталі у порівнянні з традиційною схемою. Доведено ефективність шведської металургійної промисловості, головним досягненням якої стало перше в світі отримання у черні 2021 року «зеленого» заліза за технологією ГІБРІТ. Наведені основні положення виступів учасників Міжнародного форуму «Зелена» металургія – на шляху до відновлення та трансформації промислового сектору економіки України», який відбувся 20 листопада 2024 року у місті Кривому Розі. Наголошено, що детерміноване технічне поняття «зелена» металургія – це процес виробництва металу, в якому всі складові елементи технології здійснюються з використанням лише відновлюваних джерел енергії і без викидів діоксиду вуглецю в довкілля. Ця умова поширюється також на всі матеріали, які використовуються в процесі виробництві металу. Така металургія можлива лише в умовах «зеленої» економіки, яка є справою майбутнього, адже перехід до неї потребує багато часу і значних витрат. Сьогодні питання полягає в здійсненні максимально можливих кроків на шляху до чистої «зеленої» металургії. Існують сучасні ефективні розробки окремих процесів виробництва сталі, що майже повністю відповідають принципам «зеленої» технології. При виборі способу промислової реалізації процесу виробництва «зеленої» сталі, поряд з екологічними і техніко-економічними показниками, необхідно враховувати вимоги до характеристик вихідної сировини.

Ключові слова: процес, метод, виробництво, технологія, сталь, дослідження

Вступ. Поява незвичного і навіть трохи дивного терміну «зелена металургія» на певному етапі розвитку металургійної галузі цілком закономірна, тому, що він є одним із проявів глобального поступового переходу людства до «зеленої» економіки. Цей напрямок розвитку, що сформувався наприкінці ХХ століття, підкреслює необхідність скорочення негативного впливу виробничої діяльності людини на сферу її проживання і ставить в основу сталій розвиток економіки з мінімальними ризиками для навколишнього середовища. Але ще століття тому видатні вчені-металурги Д.І. Менделєєв, Д.К. Чернов, А.А. Байков вважали можливим і доцільним пряме одержання заліза з руд, минаючи чавун, що сьогодні є технічною суттю «зеленої» металургії [1]. Таким чином, екологічне прагнення широкого загалу до зеленої економіки, в тому числі до зеленої металургії, з одного боку, доповнювалось і опиралось на впевненість вчених-металургів щодо теоретичної можливості і технологічної доцільності безкоксової мета-

лургії, з іншого боку подібний збіг поглядів і задач забезпечив успішне просування до бажаної мети.

Основна фізико-хімічна відмінність безкоксової металургійної схеми полягає в тому, що вміст кисню в залізорудному матеріалі, що оброблюється, знижується поступово. У традиційній схемі одержання металу вміст кисню знижується від ~ 20 % у руді до 0,001 % у чавуні, а потім знову підвищується до 0,1 % у сталі. У безкоксовій схемі кількість кисню плавно знижується від 20 % до 1 % у металізованій сировині, а потім, після плавки в електропечі, знижується до 0,1% у готовій сталі.

Принципова схема виробничого процесу найбільш поширеної технології безкоксової металургії може бути представлена таким чином: збагачення рудної сировини, подача отриманого залізорудного концентрату у вигляді пульпи на огрудкування для отримання сирих окатишів, які піддаються випалу для отримання належної міцності, а потім – відновному випалу у шахтній печі. Одержані металізовані окатиші, що містять до 95 % заліза, подають на переділ у сталь в електродугові печі.

Загальна кількість викидів пилу, SO_2 , NO_x , CO у технології прямого одержання заліза в 6 разів менше, ніж у традиційній технології. Якщо враховувати, що виключене виробництво коксу з виділеннями канцерогенних поліциклічних ароматичних вуглеводнів, то сумарна токсичність викидів за такої технології в 300 разів менше, ніж за традиційної [2].

В останні роки найбільш поширеними в світі методами виробництва заліза прямого відновлення залишаються Мідрекс і декілька способів металізації з використанням твердого палива, відносна доля яких у 2021 році складала 59,5 і 25,4 % від загального обсягу виробництва у 119,2 млн. т (рис. 1) [3]. Динаміка розвитку світового виробництва заліза прямого відновлення (див. рис. 1) свідчить про нарощення темпів виробництва заліза прямого відновлення: якщо за перші 30 років з початку промислового виробництва річний обсяг досяг 40 млн. т., то для збільшення на наступні 40 млн. т. знадобилось майже вдвічі менше часу – лише 17 років. В подальшому темпи зростання стали ще більш стрімкими: з 2017 по 2022 роки річне виробництво заліза прямого відновлення (ПВЗ – DRI) і гарячебрикетованого заліза (ГБЗ – HBI) зросло з 80 до більше як 125 млн. т./рік.

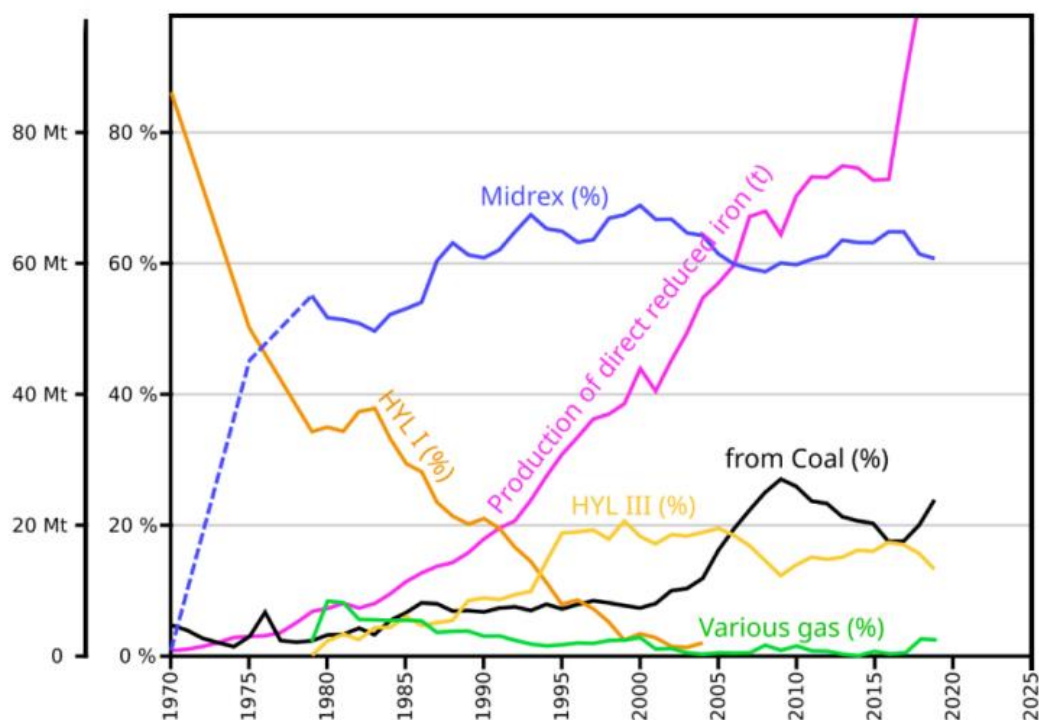


Рисунок 1 – Динаміка розвитку світового виробництва заліза прямого відновлення (червона лінія, млн. т/рік) з 1970 по 2021 роки за окремими технологіями (різнокольорові лінії, %)

Основним напрямком розвитку «зеленої металургії» вважається технологія ПВЗ-ЕДП (DRI-EAF), за якою із продуктів заліза прямого відновлення, отриманих за допомогою водню, в дугових електропечах (EAF) виробляють сталь. При цьому водень потрібно генерувати шляхом електролізу з використанням води та електроенергії, які надходять з відновлюваних джерел. Саме таку технологію виробництва «зеленої» сталі просувають найбільш потужні учасники ринку сталі, так як Арселор Мітал (ArcelorMittal), Тіссен Крупп (ThyssenKrupp), Зальцгіттер (Salzgitter AG) [4]. Таким чином, повноцінна «зелена» металургія неможлива без «зеленого» водню і «зеленої» енергетики, які в свою чергу повинні бути невід’ємними складовими «зеленої» економіки.

Узагальненим показником виходу парникових газів в еквіваленті CO_2 є так званий «вуглецевий слід», який вимірюється на одиницю виробленого продукту і може служити екологічним критерієм екологічної досконалості металургійного процесу. Чорна металургія є одним з найбільших індустриальних джерел викидів CO_2 , на яке приходить близько 7-9 % глобального виходу діоксиду вуглецю. Три основних процеси виробництва сталі – 1) інтегрована доменна піч/основний кисневий конвертор (BF/BOF), за яким сьогодні отримують близько 70 % світового виробництва сталі; 2) електродугова піч (EAF), що зараз забезпечує 25 % світового випуску сталі; 3) електродугова піч прямого відновлення заліза (DR/EOF), цей процес використовується для виробництва близько 5 % світового виробництва сталі, мають наступні значення вуглецевого сліду (т. CO_2 /т. сталі): 2, 0,6, 1,4 відповідно [5].

Перше в світі «зелене» залізо було отримано в червні 2021 року на експериментальному заводі ГІБРИТ – Воднева революційна технологія виробництва заліза (HYBRIT – Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology) в Елліварі, північна Швеція. Компанія SSAB виробила першу у світі сталь без використання копалин та поставила її замовнику. Шведська металургійна промисловість вже є кліматично ефективною за міжнародними стандартами, але цього недостатньо. З цієї причини ініціатива HYBRIT була започаткована SSAB, LKAB та Vattenfall і отримала фінансову підтримку від Шведського енергетичного агентства та Інноваційного фонду ЄС для різних ініціатив [6, 7].

Крім Швеції, активне просування по шляху до зеленої металургії відбувається в Австрії, Німеччині, Великій Британії, Китаї, Індії, Південній Кореї, Японії та інших країнах.

В Україні концептуально зафіксовано [8], що держава рухатиметься в напрямку реалізації Європейської зеленої угоди (The European Green Deal), яка є низкою політичних ініціатив, висунутих Європейською Комісією з кінцевою метою зробити європейський континент кліматично нейтральним до 2050 року.

Враховуючи актуальність переходу металургії на «зелені» рейки, а також усвідомлюючи значення та можливості міста Кривий Ріг як гірничо-металургійного центру України, Академія гірничих наук України, Криворізький національний університет і виконком Криворізької міської ради 20 листопада 2024 року провели Міжнародний форум «Зелена» металургія – на шляху до відновлення та трансформації промислового сектору економіки України», де відбулось зацікавлене обговорення питань переходу до «зеленої» металургії та зниження викидів забруднювальних речовин в атмосферу [9]. Робота Форуму пройшла у трьох секціях: 1) «Зелена» металургія – інноваційні технології та перспективи розвитку; 2) Переробка відходів металургійного виробництва як елемент «зеленої» металургії; 3) Роль малого та середнього бізнесу у розвитку «зеленої» металургії. Тематична спрямованість секцій свідчить, що на Форумі був розглянутий комплекс найбільш важливих проблемних організаційно-юридичних, технологічних і фінансових аспектів створення «зеленої» металургії в Україні.

Метою роботи є аналіз і узагальнення питань створення «зеленої» металургії в Україні, які розглядалися на Міжнародному форумі «Зелена металургія» – на шляху до відновлення та трансформації промислового сектору економіки України» (м. Кривий Ріг, 20.11.2024 р.), встановлення на підґрунті інформації, оприлюдненої на Форумі, нових наукових результатів, врахування яких сприятиме діяльності по створенню підприємств «зеленої» металургії в Україні. Таким результатом є положення про необхідність врахування при виборі для конкретних умов раціонального методу промислового виробництва «зеленої» сталі результатів порівняльної оцінки техніко-економічних

показників процесу отримання металу комплексної характеристики вихідної рудної сировини.

Завдання дослідження полягає в аналізі і узагальненні вмісту доповідей і презентаційних матеріалів, оцінок і висновків при обговоренні виступів, перевірці окремих оприлюднених даних, їх доповненні і уточненні.

Матеріали та методи. Основні матеріали дослідження – вміст виступів і презентацій доповідачів на Форумі, при необхідності доповнений інформацією з інших джерел.

Методи наукового дослідження. В роботі використані загальноприйняті теоретичні методи наукового дослідження – аналіз і синтез, аналогія, узагальнення.

Результати. Відкриваючи Форум, в. о. міського голови Кривого Рогу д.т.н., проф. Юрій Вілкул відмітив, що з жовтня 2024 року набув чинності Закон України «Про основні засади державної кліматичної політики», який спрямований на визначення правових та організаційних засад державної кліматичної політики, направленої на забезпечення низьковуглецевого та сталого розвитку України, досягнення кліматичної нейтральності, пом'якшення наслідків зміни клімату та адаптації до неї. Законом установлено, що перший національно визначений внесок України до Паризької кліматичної угоди, схвалений Кабінетом Міністрів України, який ставить за мету скорочення викидів парникових газів до 60 % від рівня 1990 року, вважається базовою середньостроковою ціллю.

Ректор Криворізького національного університету д.т.н., проф. Микола Ступнік у вітальному слові констатував, що наразі у світі немає єдиної думки відносно шляхів подолання вуглецевої кризи, але Україна обов'язково буде частиною відновлювального процесу після воєнно-політичної кризи, яка зачепила весь світ. Відновлення буде відбуватиметься вже на нових, декарбонізованих засадах. Це надасть змогу уникнути підвищення концентрації в атмосфері парникових газів і зростання глобальної температури земної поверхні, що сприятиме сталому розвитку.

У зверненні до учасників Форуму президент Всесвітньої організації Академія гірничих наук Нурлан Ріспанов (Республіка Казахстан) відмітив актуальність проблеми переходу до «зеленої» металургії для Казахстану, з його розвинутою гірничо-металургійною промисловістю, наголосив важливість міжнародних нормативно-правових документів з питань охорони навколишнього середовища, виконання яких усіма державами із залученням достатнього обсягу інвестицій стане запорукою успіху на цьому шляху.

Порівняння трьох перспективних варіантів екологічного виробництва сталі за допомогою технологій прямого відновлення – Мідрекс, Хайрекс (HyREX), Хайфор (HYFOR – Hydrogen-based fine-ore reduction – Відновлення тонкої руди на основі водню) – свідчить про перевагу останньої [з виступу доповідача Крістіана Боем, керівника відділу продаж технологій прямого відновлення Прайметиз Текноледжиз Остриа Джіємбіейч (Primetals Technologies Austria GmbH), Австрія]. Процес Хайфор, розроблений міжнародною інжиніринговою кампанією Прайметиз Текноледжиз, використовує технологію, яка базується на відновленні воднем тонкоздрібленої залізної руди або концентрата крупністю <150 мкм до залізо прямого відновлення у реакторі з киплячим шаром без будь-яких попередніх етапів згрудкування, таких як гранулювання або спікання [10].

Про розбудову компанією Tata Стіл (TataSteelLtd) сталеливарної промисловості в напрямку «зеленої» металургії доповів Хенрік Адам, генеральний директор, голова правління Tata Стіл Незерлендз Холдін («TataSteel NetherlandsHolding») та віце-президент «TataSteelLtd», Нідерланди. В місті Еймейден Tata Steel Netherlands має один із найефективніших у світі сталеливарних заводів із викидів CO₂, які приблизно на 7 % нижчі за середній європейський показник. Але ми не зупиняємось на досягнутому. Ми перебудовуємо наш виробничий процес і будемо виробляти сталь на основі водню. Очікуємо, що це скоротить викиди CO₂ на 35–40 % до 2030 року. Наша мета – виробляти повністю CO₂-нейтральну сталь до 2045 року [11].

Головними характеристиками технології Хайсарна (Hisarna) є виробництво рідкого чавуну і шлаку без вимагання агломерації руди і коксування вугілля, використання недорогої сировини, значне зниження викидів NO_x, SO_x, дрібного пилу та вуглеводів (з виступу доповідача Карела Кліманса, технічного директора та директора з розвитку технології Хайрсана в «Tata Steel Netherlands», Нідерланди). Серед ключових особливостей процесу (рис. 2) використання чистого кисню, попереднє твердофазне віднов-

лення Fe_2O_3 оксидом вуглецю до FeO у верхній циклонній конвертерній частині печі (CCF) і остаточне рідкофазне відновлення FeO твердим вуглецем у нижній частині печі (SRV).

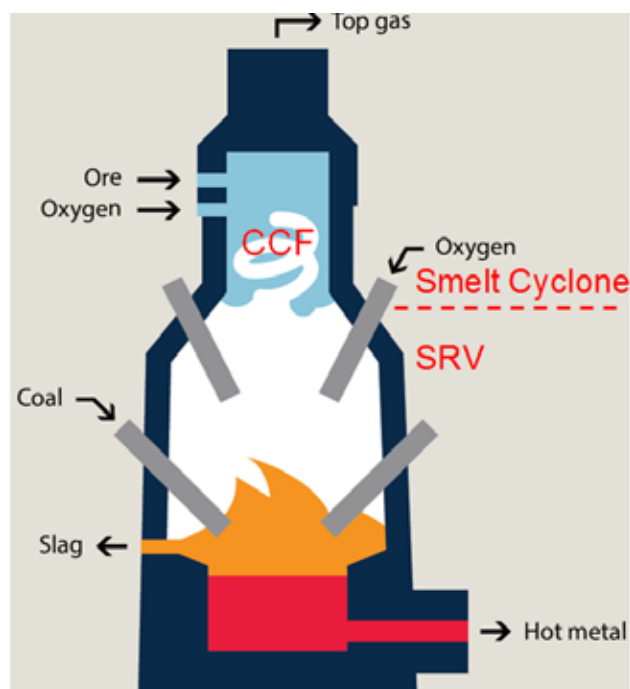


Рисунок 2 – Принципова схема процесу Хайсарна

Впровадження заходів з «зеленої» металургії в Україні передбачено у ряді екологічних програм, які увійшли у проект Плану національного відновлення України (2022 р.), у тому числі проекти з металургійної галузі (з виступу доповідача д.т.н., проф. Сергія Грищенка, представника ОП «Укрметалургпром», Україна). Так, у Національній програмі № 8 «Україна може нарощувати додану вартість у конкурентних секторах» у секторі «Металургія» серед ключових проектів значиться долучення до ланцюга доданої вартості «зеленої» сталі: збільшити виробництво окатишів DR-класу, забезпечити виробництво заліза прямого відновлення та гаряче-брикетованого заліза, в тому числі з використанням H_2 , виробництво «зеленої» сталі в електродугових печах або занурених дугових печах. Загальна орієнтовна вартість металургійних проектів становить \$5,8 млрд. Сюди включено приватні і державні інвестиції. Очікується, що більшість інвестицій надходитиме від приватних гравців після впровадження конкурентоспроможних процентних ставок, страхування зони бойових дій та заходів для покращення ділового середовища.

Європейський контекст низки нормативних документів, що регламентують порядок дій і відносин між країнами у сфері викидів, – Кліматичний закон, пакет «Вдатний до 55» («Fitfor 55»), Європейська схема торгівлі викидами (ЄСТВ), Механізм вуглецевого коригування на кордоні (СВАМ) – спрямований на досягнення проміжної цілі у 2030 році і кінцевої – кліматичної нейтральності до 2050 року, є юридичним базисом трансформації металургійного сектору економіки (з виступу доповідача Ольги Семків, директора зі сталого розвитку ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», Україна).

У березні поточного року відбулось підписання Меморандуму про взаєморозуміння команди Нео-Еко Україна і міста Кривого Рогу [12]. Консалтингова компанія Нео-Еко, як експерт у сфері циркулярної економіки, підтримуватиме та спільно з містом розроблятиме стратегії поводження з відходами та проекти сталого розвитку міста. Циркулярне майбутнє Кривого Рогу ґрунтується на нових рішеннях для ефективного використання промислових відходів та збереження ресурсів (з доповіді Барта Груйарта, директора проекту «Нео-Еко Україна», Франція).

Зелена металургія – це валоризація шлаків сталеплавильного виробництва і хвостів збагачення залізної руди. Такою була тема доповіді Міке Квагебеур, доктора філософії, експерта зі сталих матеріалів Фламандського інституту технологічних досліджень (VITO NV), Бельгія. Однією з інноваційних розробок інституту є технологія карбстоуну, яка дозволяє переводити негідровані шлаки, такі як шлаки EAF і шлаки BOF, які сьогодні важко повторно використовувати, у високоцінний будівельний матеріал. Унікальна концепція полягає в тому, що використовується CO_2 в якості клею, тому не потрібні інші в'язучі. Технологія впроваджена у промислових масштабах у Бельгії. Вона досить популярна, оскільки дозволяє одночасно вирішувати два завдання: корисне використання CO_2 (постійне зв'язування) та переробка сталевих шлаків у високоякісні будівельні матеріали.

Другий приклад використання побічних продуктів для карбонізації мінералів – переробка хвостів. Тут також розроблений портфель рішень, починаючи від наповнювача в бетоні, щільних заповнювачів для використання у будівництві та легких заповнювачів, до клінкеру мінеральної карбонізації.

Можлива роль ціноутворення на вуглець для зеленої реконструкції промислового сектору України розглянута у доповіді Рувена Штуббе, економіста з енергетики та консультанта проекту Низьковуглецева Україна (Low Carbon Ukraine) в рамках Міжнародної кліматичної ініціативи, Німеччина. Зокрема, було змодельовано два сценарії переходу на сталь з низьким вмістом вуглецю при збільшенні виробництва сталі: за допомогою нових ДСП на основі брухту, або після 2030 року з потужностями H_2 -DRI-EAF (рис. 3), що потребує капіталовкладень у розмірі 1-2 і 2-5 млрд. євро відповідно.

При вступі України до ЄС можливі два варіанти уникнути вуглецевого цінового шоку: 1) перехідний період з фіксованими цінами (без жорсткої стелі); 2) ціновий коридор з підвищенням нижньої межі ціни на вуглець.

Можливостям фінансування та підтримки малого та середнього бізнесу (МСБ) у сфері «зеленої» металургії присвятив свою доповідь Стівен Ташпер, заступник керівника проекту "Підтримка відновлення Криворізького району", головний технічний радник Люксембурзького державного агентства розвитку ЛюксДев (LuxDev). Основними фінансовими джерелами, орієнтовані на МСП, які наразі доступні в Україні, є: 1) комерційні кредити від державних банків, частина яких фінансується за рахунок коштів донорів; 2) фінансування від міжнародних фінансових установ та донорів, яке, зокрема для ЄС, включає: фінансування для покриття збитків за кредитами для місцевого бізнесу; субсидії процентних ставок; обмежені гарантії, де до 70–80 % кредиту забезпечується гарантією тощо.

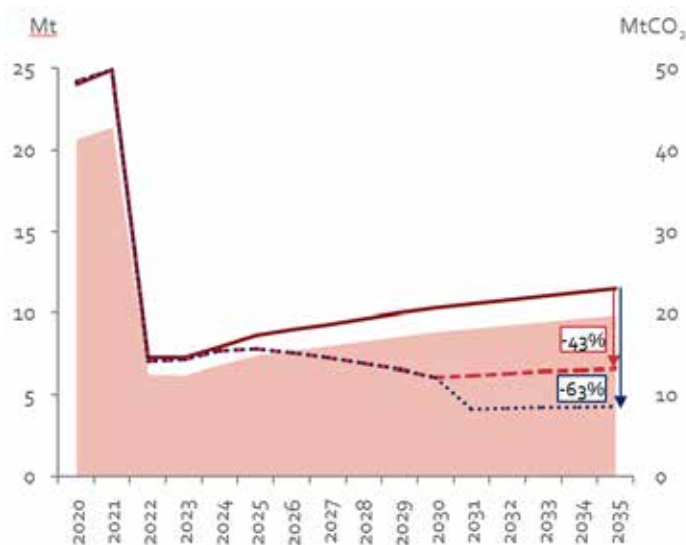


Рисунок 3 – Виробництво металургійного сектору та прогноз викидів CO_2 : поле кольору «пудра» – виробництво сталі, млн. т/рік; суцільна лінія – CO_2 викиди, традиційний сценарій; штрихова лінія – CO_2 викиди, EAF (100 % скрап) сценарій; лінія з точок – CO_2 викиди, H_2 -DR-EAF сценарій

Діяльність Європейського банку реконструкції та розвитку (ЄБРР) в Україні була предметом виступу Флоренса Башар-Бакала, регіонального керівника з виробництва та послуг в Україні ЄБРР. Величезна сфера впливу ЄБРР поширюється також на «зелене» поле. Серед ключових пріоритетних напрямків на майбутнє у розділі «Промисловість, торгівля та агробізнес» значиться «ліквідність і капітальні витрати, включаючи проекти з компонентів зелених інвестицій». Можливість підтримки ЄБРР інвесторів проектів «зеленого» поля спирається на глибокі знання галузі та місцеві знання для участі у фінансових проектах з нуля, з спонсорським досвідом. Участь може бути структурована як обмежений/повний регрес, формуванням ціноутворення, пов'язаного з ефективністю і гнучкими варіантами погашення.

Обговорення. Виступаючи в обговоренні доповідей учасників Форуму, завідувач кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва Криворізького національного університету, д.т.н., проф. Сергій Савельєв наголосив, що перехід від чорної металургії до «зеленої» є важливою складовою глобальної трансформації всієї економічної системи суспільства, яка потребує значного часу і великих матеріальних витрат. Але цей процес неминучий, якщо ми хочемо зберегти гідне життя на планеті для майбутніх поколінь. Виступи учасників Форуму свідчать про багатогранність проблеми створення «зеленої» металургії, існування різних підходів до виробництва «зеленої» сталі, що викликає необхідність вибору оптимального варіанту рішення цього питання для конкретних умов.

Перший заступник міського голови Євген Удод зазначив, що Кривий Ріг завжди був і є прогресивним та інноваційним містом, відповідальним за сьогодні і майбутнє. Зараз Кривий Ріг – це майже 20 % економіки України, десятки тисяч робочих місць. Місто допомагає малому та середньому бізнесу, долучає колег з інших країн, використовує будь-які моделі фінансування для залучення новітніх технологій в напрямку «зеленої» металургії. Застосовуються комплексні і системні підходи до цього питання.

Підсумовуючи основні результати Форуму, його головуєчий, Президент Академії гірничих наук України, д.т.н., проф. Юрій Вілкул наголосив на важливості інформації, яку представили доповідачі. Цей захід об'єднав науковців, виробничників та представників компаній, що займаються металургійною промисловістю по всьому світу. На Форумі представлено доповіді представників семи країн, які активно впроваджують «зелену» металургію та інші сучасні технології. «Зелена» металургія – це комплекс заходів, спрямованих на видобуток, переробку, управління відходами та зменшення викидів вуглекислого газу у виробництві сталі. Головна мета – скоротити рівень викидів на 80 % до 2050 року. Це надзвичайно важливо для мешканців Кривого Рогу та всієї України. Результати роботи Форуму дають підставу вважати, що він прискорить життєво необхідний рух по всеосяжному скороченню вуглецевого сліду, відновленню та трансформації промислового сектора економіки України.

Висновки. В ідеальному вигляді «зелена» металургія це комплексний високотехнологічний процес виробництва металу, в якому всі складові елементи технології від етапів до операцій здійснюються з використанням лише відновлюваних джерел енергії і без викидів діоксиду вуглецю в оточуюче середовище. Ця вимога стосується також всіх матеріалів, які задіяні у виробництві металу. Зрозуміло, що така металургія можлива лише в умовах всього «зеленої» економіки, яка є справою майбутнього, адже для переходу до неї знадобиться багато часу, великих зусиль і значних витрат. Сьогодні питання полягає в здійсненні максимально можливих кроків на шляху до чистої «зеленої» металургії. Проведений аналіз стану вирішення цієї проблеми свідчить про наявність певної кількості сучасних розробок, спрямованих на виробництво сталі за майже на 100 % «зеленою» технологією. При виборі способу промислової реалізації процесу виробництва «зеленої» сталі, поряд з екологічними і техніко-економічними показниками, необхідно враховувати вимоги до характеристик вихідної сировини, на яку розрахована кожна з конкуруючих технологій.

Подальші дослідження в цьому напрямку слід проводити шляхом детального аналізу технології «зеленої» металургії, найбільш придатних до впровадження за техніко-економічними показниками.

Автори висловлюють подяку всім учасникам Форуму, які представили презентації своїх виступів для використання при роботі над цими нотатками.

Бібліографічний перелік

1. Губін Г.В., Півень В.О. Сучасні промислові способи безкоксової металургії заліза: монографія під наук. ред. Губіна Г.В. Кривий Ріг, 2010. 336 с.
2. Мальований М.С., Боголюбов В.М., Шаніна Т.П., Шмандій В.М., Сафранов Т.А. Техноекіологія: підручник за ред. М.С. Мальованого. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2013. 424 с.
3. Production préréduits (DRI et HBI) par procédés Midrex HYL Charbon.svg. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Production_pr%C3%A9r%C3%A9duits_\(DRI_et_HBI\)_par_proc%C3%A9d%C3%A9s_Midrex_HYL_Charbon.svg](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Production_pr%C3%A9r%C3%A9duits_(DRI_et_HBI)_par_proc%C3%A9d%C3%A9s_Midrex_HYL_Charbon.svg). (дата звернення 15.05.2025)
4. Єрмоленко Г. H₂ Green Steel: стартап, що формує майбутнє «зеленої» металургії. GMK centr. URL: <https://gmk.center.ua/posts/h2-green-steel-startap-shho-formuie-majbutnie-zelenoi-metalurgii/> (дата звернення 14.05.2025).
5. Технологічний огляд. Carbon neutral energy intensive industries. Information Service United Nations Economic Commission for Europe, 2023. URL: https://drupal-main-staging.unece.org/sites/default/files/2023-09/Industry%20brief_EN_2_0.pdf (дата звернення 14.05.2025).
6. Fossil-free steel – a joint opportunity! URL: <https://www.hybritdevelopment.se/en/> (дата звернення 14.05.2025).
7. A fossil-free future. URL: https://www-hybritdevelopment-se.translate.goog/en/a-fossil-free-future/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc (дата звернення 14.05.2025).
8. Екологічна трансформація: як розвивається зелена металургія в Україні URL: <https://biz.nv.ua/ukr/markets/vidnovlennya-promislovosti-a-ukrajini-v-yakomu-stani-zelena-metalurgiya-perspektivi-50346472.html> (дата звернення 21.08.2023)
9. У Кривому Розі занепокоєні викидами в атмосферу і мають намір сприяти переходу на "зелену" металургію / Інтерфакс-Україна, URL: <https://interfax.com.ua/news/greendeal/1030640.html> (дата звернення 28.11.2024)
10. Daniel Spreitzer, Johann Wurm, Bernhard Hiebl. HYFOR – HYdrogen-based Fine-Ore Reduction etc. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 2022. Vol. 59. № 2. 5 p. URL: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e592/e592070.pdf>
11. Тага Стіл. Майбутня сталь. URL: https://www-tatasteelnederland-com.translate.goog/en/Green-steel-and-sustainability/co2-neutral-steel/Making-steel-using-hydrogen?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc&_gl=1*vqppj6*_up*MQ*_ga*ODkwNjU2NjMzLjE3MzQ3OTY3OTU*_ga_ZJG2C9ENNR*MTczNDc5Njc5NC4xLjEuMTczNDc5ODE5Mi4wLjAuMA. (дата звернення 19.05.2025).
12. «Нео-Еко Україна» підписала нове партнерство з VITO та Кривим Роґом. URL: <https://neo-eco.com.ua/news/neo-eko-ukraina-pidpysala-nove-partnerstvo-z-vito-ta-kryvym-rohom/> (дата звернення 19.05.2025).

References

1. Hubin H.V., Piven V.O. Modern Industrial Methods of Coke-Free Iron Metallurgy: Monograph / Edited by H.V. Hubin. Kryvyi Rih, 2010. 336 p.
2. Malovanyi M.S., Boholiubov V.M., Shanina T.P., Shmandii V.M., Safranov T.A. Technoecology: Textbook / Edited by M.S. Malovanyi. Lviv: National University "Lviv Polytechnic," 2013. 424 p.
3. Production of Pre-Reduced Iron (DRI and HBI) by Midrex and HYL Processes Using Coal. URL: Wikipedia file on Midrex and HYL processes (accessed 15.05.2025).
4. Yermolenko H. H₂ Green Steel: A Startup Shaping the Future of "Green" Metallurgy GMK Center. URL: GMK Center article on H₂ Green Steel (accessed 14.05.2025).
5. Technology Brief: Carbon Neutral Energy Intensive Industries Information Service, United Nations Economic Commission for Europe, 2023. URL: UNECE industry brief PDF (accessed 14.05.2025).
6. Fossil-free steel – a joint opportunity! URL: <https://www.hybritdevelopment.se/en/> (дата звернення 14.05.2025).
7. A fossil-free future. URL: https://www-hybritdevelopment-se.translate.goog/en/a-fossil-free-future/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc (дата звернення 14.05.2025).
8. Ecological Transformation: How Green Metallurgy Is Developing in Ukraine URL: biz.nv.ua article on green metallurgy in Ukraine (accessed 21.08.2023).
9. Kryvyi Rih Concerned About Air Emissions and Intends to Support the Transition to "Green" Metallurgy / Interfax-Ukraine URL: [Interfax-Ukraine news on green metallurgy in Kryvyi Rih](https://interfax.com.ua/news/greendeal/1030640.html) (accessed 28.11.2024).
10. Daniel Spreitzer, Johann Wurm, Bernhard Hiebl. HYFOR – HYdrogen-based Fine-Ore Reduction etc. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 2022. Vol. 59. № 2. 5 p. URL: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e592/e592070.pdf>.

11. Tata Steel. Future Steel URL: Tata Steel Netherlands – Making Steel Using Hydrogen (accessed 19.05.2025).

12. “Neo-Eco Ukraine” Signed a New Partnership with VITO and Kryvyi Rih. URL: Neo-Eco Ukraine partnership announcement (accessed 19.05.2025).

Vilkul Yurii, doctor of technical sciences, professor, President of the Academy of Mining Sciences of Ukraine, ORCID: 0000-0003-3979-3231

Stupnik Mykola, doctor of technical sciences, professor, rector, Kryvyi Rih National University, ORCID: 0000-0003-3318-3889

Saveliev Serhii, doctor of technical sciences, professor, Head of the department of ferrous metallurgy and foundry production, Kryvyi Rih National University, ORCID: 0000-0001-6263-9422

Yeremenko Hennadii, candidate of technical sciences, associate professor, Department of open-pit mining, Kryvyi Rih National University, ORCID: 0009-0006-9997-6784

Yarosh Tetiana, candidate of technical sciences, associate professor, Department of ferrous metallurgy and foundry production, Kryvyi Rih National University, ORCID: 0000-0003-3455-9630

PROSPECTS FOR THE TRANSFORMATION OF UKRAINE'S FERROUS METALLURGY INTO “GREEN” METALLURGY

The presented work defines the physicochemical characteristics of a typical coke-free steel production scheme compared to the traditional process. The efficiency of the Swedish metallurgical industry has been proven, with its greatest achievement being the world's first production of “green” iron using the HYBRIT technology in June 2021.

The paper outlines the key points from the speeches of participants at the International Forum “Green Metallurgy – Towards the Recovery and Transformation of Ukraine's Industrial Sector,” which took place on November 20, 2024, in Kryvyi Rih.

It is emphasized that the determined technical concept of “green” metallurgy refers to a metal production process in which all technological components are carried out exclusively using renewable energy sources and without carbon dioxide emissions into the environment. This condition also applies to all materials used in metal production.

Such metallurgy is only possible within the framework of a “green” economy, which remains a future endeavor, as the transition requires significant time and financial investment. Today, the focus is on taking the maximum possible steps toward clean “green” metallurgy.

There are modern, efficient developments in specific steel production processes that almost fully comply with the principles of “green” technology. When selecting an industrial implementation method for “green” steel production, alongside environmental and techno-economic indicators, it is essential to consider the requirements for the characteristics of the raw materials.

Keywords: process, method, production, technology, steel, research