

УДК 669.18:669.162.275:669.14.018.292:502/504
DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-15>

ТЕХНОЛОГІЇ «ЗЕЛЕНОЇ» МЕТАЛУРГІЇ ДЛЯ ВИПЛАВКИ ТА ОБРОБКИ СТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ: ВІД БЕЗКОКСОВОГО ВИРОБНИЦТВА ДО ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

Кухар Володимир Валентинович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри металургії та організації виробництва
проректор з науково-дослідної роботи,
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-4863-7233

Малій Христина Василівна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри металургії організації виробництва
керівник науково-дослідного департаменту
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-9046-4268

Штуць Андрій Анатолійович,

кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Вінницького національного аграрного університету
ORCID ID: 0000-0002-4242-2100

Колісник Микола Анатолійович,

доктор філософії (матеріалознавство),
старший викладач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Вінницького національного аграрного університету
ORCID ID: 0000-0001-5502-6556

Стаття присвячена комплексному аналізу інноваційних технологій «зеленої» металургії та їхній ролі у виробництві сталей для сільськогосподарського призначення. Актуальність дослідження зумовлена потребою аграрного сектору у високоякісних сталях із поєднанням таких властивостей, як зносостійкість, ударна в'язкість, корозійна стійкість та технологічність (зварюваність, формоздатність), а також сучасними викликами декарбонізації та механізмом CBAM, який визначає вимоги до вуглецевого сліду продукції. Показано, що перехід від традиційної схеми BF–BOF до безкоксових технологій на основі прямого відновлення заліза (DRI/HBI) з подальшою виплавою в електродугових печах (EAF) дозволяє скоротити викиди CO₂ на 80–95 % і створює нову ресурсну базу для сталей аграрного призначення. Розглянуто сучасні рішення компактного виробництва сталі на базі ливарно-прокатних модулів CSP, ISP та ESP, а також станів Стеккеля. Ці технології інтегрують безперервне розливання і прокатку в єдиний цикл, скорочують енерговитрати, знижують собівартість та забезпечують контроль мікроструктури. Доведено, що поєднання таких модулів із термомеханічно контрольованими процесами (TMCP) дає можливість отримувати ультрадрібнозернисту структуру з оптимальним балансом міцності й пластичності. Особлива увага приділена ролі мікролегування (B, V, Nb, Ti), яке сприяє утворенню зміцнюючих фаз і підвищенню ресурсу деталей у складних умовах експлуатації. Систематизовано основні групи сталей для аграрного сектору: зносостійкі (Hardox, Armax, 30MnB5, 65Г), конструкційні низьколеговані (09Г2С, S355MC), мартенситні й бейнітні (40Cr, 30MnB5), інструментальні (Х12МФ, У8А) та корозійностійкі (AISI 304, 316). Показано, що вибір технологічного маршруту визначає не лише собівартість і екологічний вплив, а й здатність сталі витримувати специфічні умови аграрної експлуатації – абразивне зношування в ґрунті, ударні навантаження та агресивні середовища. Підкреслено перспективність формування металургійно-аграрних кластерів на основі «зелених» технологій, здатних забезпечити потреби післявоєнної модернізації та експортні можливості України на європейських ринках.

Ключові слова: DRI/HBI, EAF, TMCP, CSP, ISP, ESP, стани Стеккеля, мікролегування, високоміцні низьколеговані сталі (HSLA), зносостійкі сталі, корозійна стійкість, аграрна техніка, зелена металургія, CBAM, післявоєнна модернізація.

Kukhar Volodymyr, Malii Khrystyna, Stuts Andrii, Kolisnyk Mykola. "Green" Metallurgy technologies for the manufacture and processing of agricultural steels: from coke-free production to thermo-mechanical processing

The article presents a comprehensive analysis of innovative "green" metallurgy technologies and their role in the production of steels for agricultural applications. The relevance of the research is determined by the need of the agricultural sector for high-quality steels combining wear resistance, impact toughness, corrosion resistance, and technological properties (weldability, formability), as well as by current decarbonization challenges and the CBAM mechanism, which imposes strict requirements on the carbon footprint of products. It is shown that the transition from the traditional BF–BOF route to coke-free technologies based on direct reduced iron (DRI/HBI) with subsequent melting in electric arc furnaces (EAF) allows for an 80–95 % reduction of CO₂ emissions and creates a new resource base for steels used in agriculture. Modern solutions for compact steel production based on casting–rolling modules such as CSP, ISP, and ESP, as well as Steckel mills, are discussed. These technologies integrate continuous casting and rolling into a single cycle, reduce energy consumption, lower production costs, and enable precise control of microstructure. It is demonstrated that the combination of such modules with thermo-mechanically controlled processing (TMCP) makes it possible to obtain ultrafine-grained structures with an optimal balance of strength and ductility. Special attention is paid to the role of microalloying (B, V, Nb, Ti), which promotes the formation of strengthening phases and increases the service life of components operating under severe conditions. The main groups of steels for the agricultural sector are systematized, including wear-resistant grades (Hardox, Armox, 30MnB5, 65G), low-alloy structural steels (09G2S, S355MC), martensitic and bainitic steels (40Cr, 30MnB5), tool steels (Kh12MF, U8A), and corrosion-resistant steels (AISI 304, 316). It is shown that the choice of production route determines not only the cost and ecological impact but also the ability of steel to withstand specific agricultural service conditions such as abrasive wear in soil, impact loads, and aggressive environments. Finally, the prospects of establishing metallurgy–agriculture clusters based on "green" technologies are emphasized, highlighting their capacity to meet the needs of post-war modernization and to expand Ukraine's export opportunities in European markets.

Key words: DRI/HBI, EAF, TMCP, CSP, ISP, ESP, Steckel mills, microalloying, HSLA steels, wear-resistant steels, corrosion resistance, agricultural machinery, green metallurgy, CBAM, post-war reconstruction.

Вступ. У сучасних умовах світова металургія перебуває у фазі глибокої трансформації, зумовленої вимогами до декарбонізації, підвищення енергоефективності та інтеграції у глобальні ланцюги доданої вартості [1, 2]. Виробництво сталі, яке традиційно базувалося на доменному та конвертерному переділах, залишається одним із найбільших джерел промислових викидів CO₂ [3]. У Європейському Союзі цей виклик став основою для формування політики Green Deal та впровадження механізму прикордонного вуглецевого коригування (CBAM), що стимулює виробників переходити на «зелені» технології [4]. Для України, де металургійний комплекс тісно пов'язаний з аграрним сектором [5], зниження вуглецевого сліду у виробництві сталі є не лише екологічною, а й економічною умовою збереження конкурентоспроможності на європейському ринку.

У цьому контексті особливої актуальності набуває аналіз технологій, які забезпечують синергію між сталеплавильними процесами нового покоління та потребами агропромислового комплексу [5]. Сільськогосподарська техніка й інфраструктура пред'являють підвищені вимоги до сталей – від зносостійкості та ударної в'язкості до корозійної стійкості й зварюваності [6; 7]. Формування такого комплексу властивостей прямо залежить від вибору виробничого маршруту, застосування мікролегування та режимів термомеханічної обробки. Тому дослідження можливостей безкокскових процесів

(DRI/HBI → EAF), компактних ливарно-прокатних модулів (CSP/ISP/ESP), мікролегування (B, V, Nb, Ti) і термомеханічно контрольованих процесів (TMCP) стає центральним напрямом для розвитку сталей аграрного призначення.

Окрему увагу слід приділити систематизації сталей, що використовуються в аграрному секторі. Вони охоплюють широкий спектр – від борованих і зносостійких марок для ґрунтообробних органів до корозійностійких сталей для інфраструктурних споруд [8; 9]. Відповідність таких матеріалів сучасним екологічним та експлуатаційним вимогам потребує ґрунтовного аналізу на рівні як металургійних технологій, так і мікроструктурних особливостей.

Таким чином, актуальність теми визначається поєднанням трьох факторів:

- глобальна декарбонізація та вимоги CBAM, які задають рамкові умови для української металургії;
- потреби аграрного сектору, який є ключовим споживачем сталі і потребує матеріалів з унікальним комплексом властивостей;
- інноваційні технології зеленої металургії, що дозволяють одночасно скоротити викиди CO₂ та підвищити якість продукції.

Науковий аналіз у цій сфері дозволяє визначити оптимальні виробничі маршрути для отримання сталей аграрного призначення, зіставити їх із сучасними європейськими стандартами та сформувати основу для післявоєнної модернізації української металургії у кластерному форматі.

Мета дослідження полягає у науковому обґрунтуванні та систематизації технологій «зеленої» металургії для виробництва сталей сільськогосподарського призначення із визначенням оптимальних безкокскових маршрутів (DRI/HBI → EAF), компактних ливарно-прокатних модулів (CSP/ISP/ESP) та режимів термо-механічно контрольованої обробки (TMCP), що забезпечують формування необхідного комплексу властивостей (зносостійкість, ударна в'язкість, корозійна стійкість, зварюваність) при одночасному скороченні викидів CO₂ і відповідності вимогам CBAM та післявоєнної модернізації України.

Методи та методики дослідження. У статті застосовано комплекс методів, що поєднує аналітичний, порівняльний та систематизаційний підходи. Базою дослідження став огляд сучасних публікацій, технічних стандартів (EN 10346:2015, регламенти CBAM) та стратегій декарбонізації, які визначають розвиток «зеленої» металургії в європейському та світовому контексті.

Основним інструментом став порівняльний аналіз виробничих маршрутів, де класична схема BF–BOF зіставлялася з безкоксковими технологіями на основі DRI/HBI–EAF. Для цього було проведено оцінку енергоємності, питомих викидів CO₂ та можливостей інтеграції у кластерні моделі виробництва.

Додатково використано метод систематизації сталей за експлуатаційними властивостями, що дало змогу виділити групи матеріалів (зносостійкі, конструкційні, інструментальні, HSLA, корозійностійкі) та співвіднести їх із вимогами аграрного сектору. Такий підхід дозволив зіставити конкретні марки сталей з умовами

експлуатації та технологічними маршрутами їх виробництва.

Окремим напрямом дослідження став аналіз інноваційних технологій компактного виробництва (CSP, ISP, ESP, стани Стеккеля) та термо-механічно контрольованих процесів (TMCP). Для цього було використано методологію оглядово-аналітичних досліджень із визначенням ключових переваг та обмежень кожної технології у контексті виробництва сталей для агропромислового комплексу.

Таким чином, дослідження базується на аналітичному синтезі наукових і технічних джерел, порівняльному аналізі виробничих маршрутів та систематизації сталей за групами і властивостями. Це дозволило сформувати цілісне уявлення про технології «зеленої» металургії та їхній потенціал для забезпечення потреб аграрного сектору України в умовах післявоєнної модернізації та євроінтеграції.

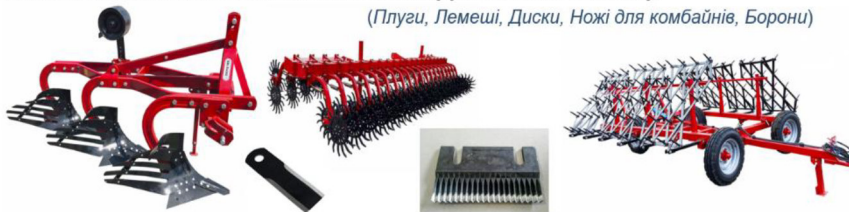
Результати

1. Особливості застосування сталей сільськогосподарського призначення. Сільськогосподарська техніка та інфраструктурні об'єкти аграрного сектору формують специфічні вимоги до сталей, що безпосередньо визначаються умовами експлуатації (рис. 1). Робочі органи ґрунтообробних машин, таких як плуги, лемеші, диски, ножі для комбайнів, борони, функціонують у середовищі підвищеної абразивності. Контакт із твердим ґрунтом, піском та камінням спричиняє інтенсивне спрацювання металу, тому основним критерієм виступає зносостійкість.

Для забезпечення тривалого ресурсу застосовуються сталі з підвищеним вмістом вуглецю

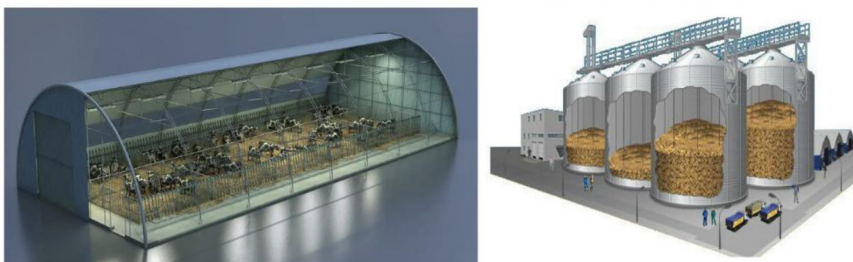
ВИКОРИСТАННЯ В СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІЙ ТЕХНІЦІ

(Плуги, Лемеші, Диски, Ножі для комбайнів, Борони)



ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ У СІГ

(Силоси, Елеватори, Овочесховища, ін. інфраструктурні об'єкти)



ВИМОГИ

ЗНОСОСТІЙКІСТЬ

- тривалий термін експлуатації

УДАРНА МІЦНІСТЬ

- контакти з твердим ґрунтом або камінням

СТІЙКІСТЬ ДО КОРОЗІЇ

- контакт із вологою, мін. добривами, пестицидами

Рис. 1. Використання сталей сільськогосподарського призначення та основні вимоги до них

(наприклад, 65Г, 60С2А) або боровані сталі типу 30MnB5, які після термічної обробки формують поверхню з високою твердістю. Це дозволяє зменшити швидкість абразивного зношування і забезпечити працездатність деталей протягом кількох сезонів. Важливо також контролювати стабільність структури поверхневого шару, оскільки від неї залежить збереження зносостійких властивостей упродовж усього терміну служби.

Ударна міцність набуває вирішального значення для деталей, що працюють під дією динамічних навантажень. У разі зіткнення з камінням чи ущільненим ґрунтом метал піддається локальним ударам, і недостатня в'язкість може призвести до крихкого руйнування. Для уникнення таких випадків застосовуються низьколеговані та мікролеговані сталі (наприклад, 09Г2С, S355MC), леговані Nb, V чи Ti. Ці елементи забезпечують формування дрібнозернистої ферито-перлітної структури, яка поєднує достатню міцність із пластичністю, що гарантує стійкість деталей до динамічних навантажень.

Іншою критичною властивістю є корозійна стійкість, особливо для металоконструкцій сільськогосподарства – силосів, елеваторів, теплиць, овочесховищ та інших споруд. Постійний контакт із вологою, агрохімікатами, парами аміаку чи мінеральними добривами створює агресивне середовище, у якому традиційні сталі швидко втрачають несучу здатність. Для подовження ресурсу застосовують гарячеоцинковані рулонні сталі за EN 10346:2015, атмосферостійкі низьколеговані сталі та корозійностійкі сталі типу AISI 304 або AISI 316. Вибір конкретної системи залежить від умов експлуатації: від

зберігання зерна у відносно сухих силосах до функціонування теплиць із підвищеною вологістю та впливом агресивних домішок.

Таким чином, вимоги аграрного сектора не може задовольнити універсальна сталь. Кожна категорія виробів потребує власної комбінації властивостей – зносостійкості, ударної міцності чи корозійної стійкості. Досягти такого балансу можливо шляхом раціонального вибору хімічного складу, мікролегкування та оптимізації технологічного маршруту: від виплавки і розливання до прокатки, термічної чи термомеханічної обробки. Саме поєднання цих факторів дозволяє сформувати необхідну мікроструктуру та забезпечити відповідність сталі реальним експлуатаційним умовам – від абразивного зношування в ґрунті до агресивної дії добрив і пестицидів.

2. Систематизація сталей аграрного призначення. Сучасна класифікація сталей для аграрного сектора ґрунтується на їхньому функціональному призначенні та вимогах до експлуатаційних властивостей (рис. 2). Основними групами є зносостійкі, конструкційні, мартенситні й бейнітні, інструментальні, корозійностійкі та високоміцні низьколеговані сталі (HSLA).

Зносостійкі сталі. Зносостійкі сталі призначені для виготовлення робочих органів ґрунтообробної техніки, що працюють в абразивному середовищі, – плугів, лемешів, дисків, борін. Вони характеризуються високою твердістю та стійкістю до абразивного зношування. Вміст вуглецю у таких сталях становить 0,5–1,3 %, а додаткове легування марганцем, хромом, нікелем, молібденом або бором забезпечує формування зміцненої структури. Типовими

Тип сталі	Призначення	Основні властивості	Вміст вуглецю (%)	Легуючі елементи	Приклади марок
Зносостійкі сталі	Робочі органи ґрунтообробної техніки	Висока зносостійкість, твердість	0,5–1,3	Mn, Cr, Ni, Mo, B	Hardox, Armoх, Creusabro, 30MnB5, 40X, 65Г, У8А
Конструкційні леговані сталі	Конструкційні елементи та рами	Міцність, ударостійкість	0,15–0,25	Mn, Si	Ст3, Ст5, 09Г2С
Мартенситні та бейнітні сталі	Ріжучі елементи	Міцність, твердість	0,3–0,5	Mn, Cr, B	30MnB5, 40Cr
Інструментальні сталі	Ріжучі елементи, пружні компоненти	Зносостійкість, пружність	0,5–1,2	Cr, Mn, V	65Г, 60С2, Х12МФ, У8А
Корозійностійкі сталі	Конструкції, що взаємодіють з агресивним середовищем	Стійкість до корозії, зварюваність	0,3–0,5	Cr, Ni	30Х13, AISI 304, AISI 316
Високоміцні низьколеговані сталі (HSLA)	Конструкційні елементи, рами, частини трансмісій	Міцність, опір до деформацій	0,3–0,5	V, Nb, Ti	HSLA (40ХФА, 50ХФА)

Рис. 2. Систематизація сталей сільськогосподарського призначення

прикладами є сталі Hardox, Armox, Creusabro, 30MnB5, 40X, 65Г, У8А.

Конструкційні леговані сталі. Для виготовлення несучих конструкційних елементів і рам сільськогосподарських машин застосовуються конструкційні леговані сталі. Вони повинні поєднувати міцність і ударну в'язкість, що забезпечує надійність під час експлуатації у динамічних умовах. Такі сталі мають невисокий вміст вуглецю (0,15–0,25 %) і легуються марганцем і кремнієм. Найбільш поширені марки – Ст3, Ст5, 09Г2С.

Мартенситні та бейнітні сталі. Ріжучі елементи машин (ножі, різальні диски, сегменти) виготовляють із мартенситних і бейнітних сталей, де забезпечується поєднання високої міцності та твердості. Вміст вуглецю у них становить 0,3–0,5 %, а легування хромом і бором підвищує прокалюваність і зносостійкість. Прикладами є сталі 30MnB5, 40Сг.

Інструментальні сталі. Для деталей, які працюють в умовах значних контактних навантажень і потребують поєднання зносостійкості та пружності, використовуються інструментальні сталі. Вони містять 0,5–1,2 % вуглецю і легуються хромом, марганцем, ванадієм. Найбільш поширені марки – 65Г, 60С2, Х12МФ, У8А.

Корозійностійкі сталі. Для конструкцій, що працюють в агресивному середовищі (силоси, теплиці, елеватори, овочесховища), застосовуються корозійностійкі сталі. Вони мають підвищену зварюваність та стійкість до дії вологи, добрив і пестицидів. Вміст вуглецю становить 0,3–0,5 %, основними легуючими елементами є хром і нікель. До цієї групи належать 30Х13, AISI 304, AISI 316.

Високоміцні низьколеговані сталі (HSLA). Окрему групу становлять високоміцні низьколеговані сталі (HSLA – HighStrengthLowAlloy), що застосовуються для виготовлення конструкційних елементів рам, трансмісій та інших навантажених деталей. Вміст вуглецю у них – 0,3–0,5 %, а легування ванадієм, ніобієм та титаном забезпечує формування дрібнозернистої структури з високою міцністю та стійкістю до деформацій. Прикладами є сталі HSLA (40ХФА, 50ХФА).

Таким чином, систематизація сталей аграрного призначення дозволяє сформувати чітке уявлення про оптимальні матеріали для різних категорій сільськогосподарських машин та інфраструктури. Вибір конкретної групи сталі залежить від умов експлуатації – від абразивного зношування в ґрунті до дії агресивних середовищ і високих навантажень.

3. Інновації в металургії для аграрного сектору.

Сучасні виклики та європейська інтеграція. Сталеливарна галузь України перебуває під тиском сучасних викликів, зумовлених інтеграцією до європейського ринку та запровадженням механізму прикордонного вуглецевого коригування (СВАМ). Для аграрного сектора це означає, що використання сталі повинно відповідати жорстким екологічним стандартам та мати прогнозований вуглецевий слід. Додатковими факторами є післявоєнні виклики, серед яких – відбудова виробничої інфраструктури, потреба у нових інвестиційних проєктах, модернізація обладнання, розвиток системи переробки та рециклінгу відходів. Таким чином, трансформація металургії в «зеленому» напрямі стає умовою конкурентоспроможності української продукції на ринках ЄС.

Впровадження інноваційних рішень. Важливим складником стратегії є перехід до безкоксового виробництва сталі. Використання технологій прямого відновлення заліза (DRI, HBI) у поєднанні з електродуговими печами (EAF) дозволяє відмовитися від коксу та доменних печей, що забезпечує суттєве скорочення викидів CO₂, зменшення проміжних переділів і зниження собівартості. Водночас такі технології відкривають шлях до використання відновлюваних джерел енергії й «зеленого» водню, що узгоджується зі стратегіями декарбонізації. Паралельно відбувається розгортання концепції міні-заводів і кластерних моделей, де поєднуються металургійні підприємства, машинобудівні компанії та аграрні споживачі сталі. Це дозволяє формувати замкнені інноваційні ланцюги «виробник – переробка – кінцевий споживач», що підвищує ефективність використання ресурсів і скорочує логістичні витрати.

Суміщені технології та термомеханічна обробка. Інноваційні рішення впроваджуються не лише на рівні виплавки, а й у наступних технологічних переділах. Використання компактних мінізаводів на базі ARVEDI ESP, Castrip, TRC, CSP та ISP-модулів, а також станів Стеккеля дає можливість знизити енерговитрати й оптимізувати ланцюг переробки металу. У виробництві широко застосовується мікролегування (В, V, Nb, Ti), яке сприяє утворенню зміцнюючих фаз і суттєво підвищує механічні властивості сталей. Подальший розвиток пов'язаний із технологіями термомеханічно контрольованої обробки (ТМСП), що дозволяє цілеспрямовано формувати структуру з необхідним співвідношенням міцності й пластичності. Це особливо важливо для сталей аграрного призначення,

де потрібна висока зносостійкість у поєднанні з достатньою в'язкістю для роботи у складних експлуатаційних умовах.

Контроль і підвищення якості. Не менш важливим складником є впровадження систем комплексного контролю якості. Вхідний та вихідний контроль (у тому числі визначення вмісту сірки та газових домішок) дозволяє стабілізувати властивості продукції. Використання вторинних процесів, зокрема рафінування в агрегатах AOD та VOD, сприяє видаленню домішок, поліпшенню чистоти металу та підвищенню експлуатаційних характеристик. У сукупності ці підходи забезпечують сталі потрібний комплекс властивостей і формують основу для подальшого розвитку аграрного машинобудування на базі сучасних «зелених» металургійних технологій.

Виконана систематизація наведена на рис. 3.

Значення для аграрного сектору. Використання безкокскових технологій (DRI/HBI-EAF), компактних ливарно-прокатних модулів і мінізаводів знижує собівартість сталі, що є ключовим чинником для сільськогосподарського машинобудування, де вартість металу визначає собівартість техніки. Водночас відповідність вимогам CBAM відкриває для аграрних виробів та інфраструктури доступ до ринків ЄС без додаткових «вуглецевих бар'єрів». Формування кластерів «металургія – машинобудування – агро-сектор» забезпечує локалізацію виробництва,

скорочення логістики та швидку адаптацію продукції до потреб фермерських господарств. Детальний аналіз цих технологічних рішень і їхнього впливу на властивості сталей буде наведено нижче.

4. Традиційна та воднева металургія. Традиційний маршрут на основі доменного виробництва. Класична схема виробництва сталі (рис. 4) базується на використанні коксу, агломерату чи окатишів та флюсів (вапняку) у доменних печах. У доменному процесі відбувається відновлення заліза з руди з утворенням чавуну, який далі переробляється в кисневих конвертерах (BOF) у сталь. Після цього застосовується безперервне розливання з формуванням слябів, блювів або заготовок, що надалі прокатуються у готову продукцію. У традиційному ланцюгу можливе використання електродугових печей як додаткового шляху переробки металобрухту, проте їхня роль залишається другорядною. Основними недоліками такого маршруту є значні обсяги викидів CO₂, пов'язані з використанням коксу, високі енерговитрати та необхідність будівництва потужної інфраструктури (агломераційні фабрики, коксохімічні заводи).

Воднева металургія. Альтернативним напрямом розвитку є виробництво сталі на основі відновлення заліза воднем (H-DRI) (див. рис. 4). У цьому разі залізородні окатиші

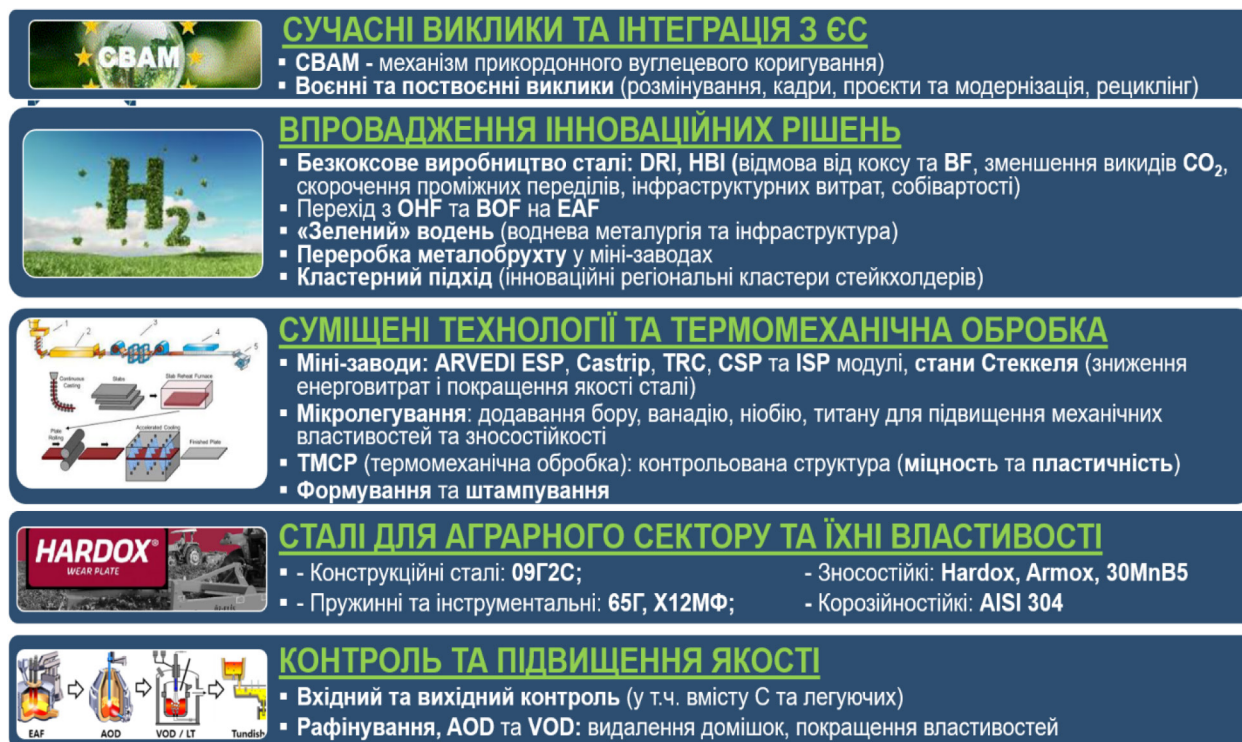


Рис. 3. Систематизація інновацій у металургії, придатних для використання в аграрному секторі

або грудковне залізо відновлюються у шахтних печах струменями водню, який отримують шляхом електролізу води з використанням електроенергії від відновлюваних джерел. Отриманий металізований продукт (DRI/HBI) подається в електродугову піч, де здійснюється виплавка сталі без застосування коксу. Після безперервного розливання метал може бути прокатаним на станах гарячої прокатки для отримання кінцевої продукції. Такий підхід є вуглецево-нейтральним, оскільки єдиним побічним продуктом у процесі відновлення стає водяна пара. Це

відкриває шлях до створення повністю «зеленої» сталі, сумісної з вимогами СВММ і перспективами декарбонізації промисловості.

Порівняння та перспективи для аграрного сектору. Порівняння традиційної та водневої металургії демонструє фундаментальну різницю в екологічному впливі. Якщо доменний цикл супроводжується масштабними викидами CO₂ та потребує значних капіталовкладень у коксове та агломераційне виробництво, то H-DRI–EAF-маршрут дозволяє гнучко інтегруватися у регіональні кластери, використовуючи

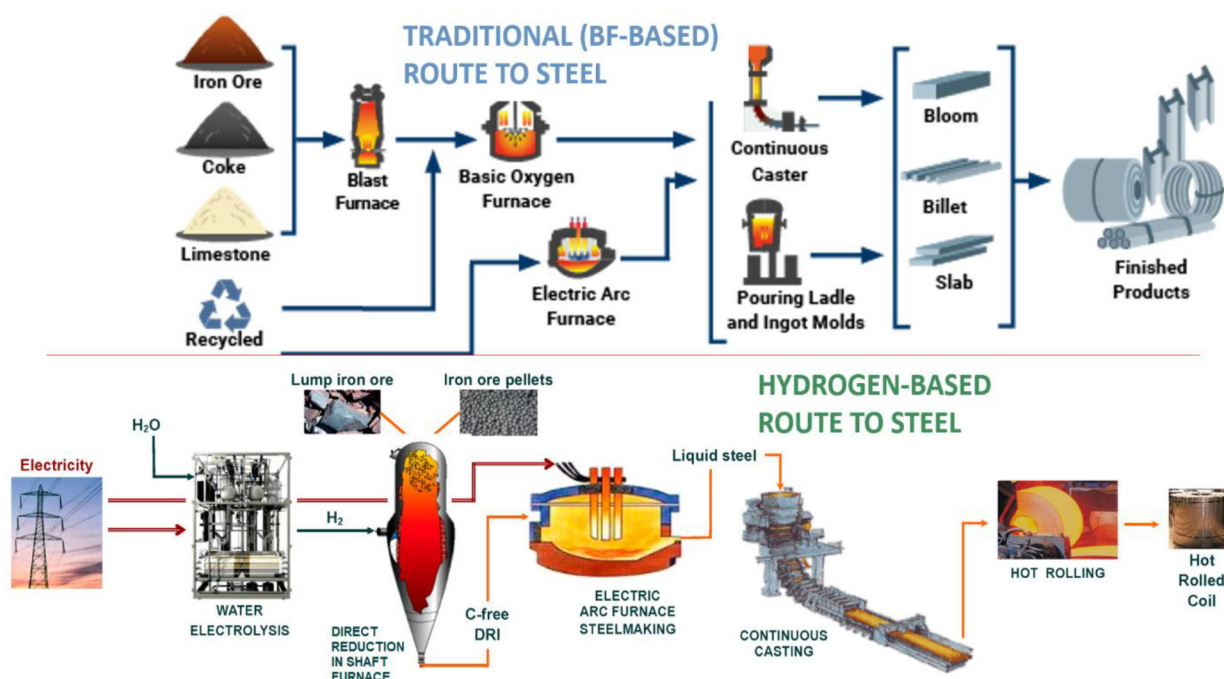


Рис. 4. Базові маршрути традиційної та водневої металургії (за [10–12])

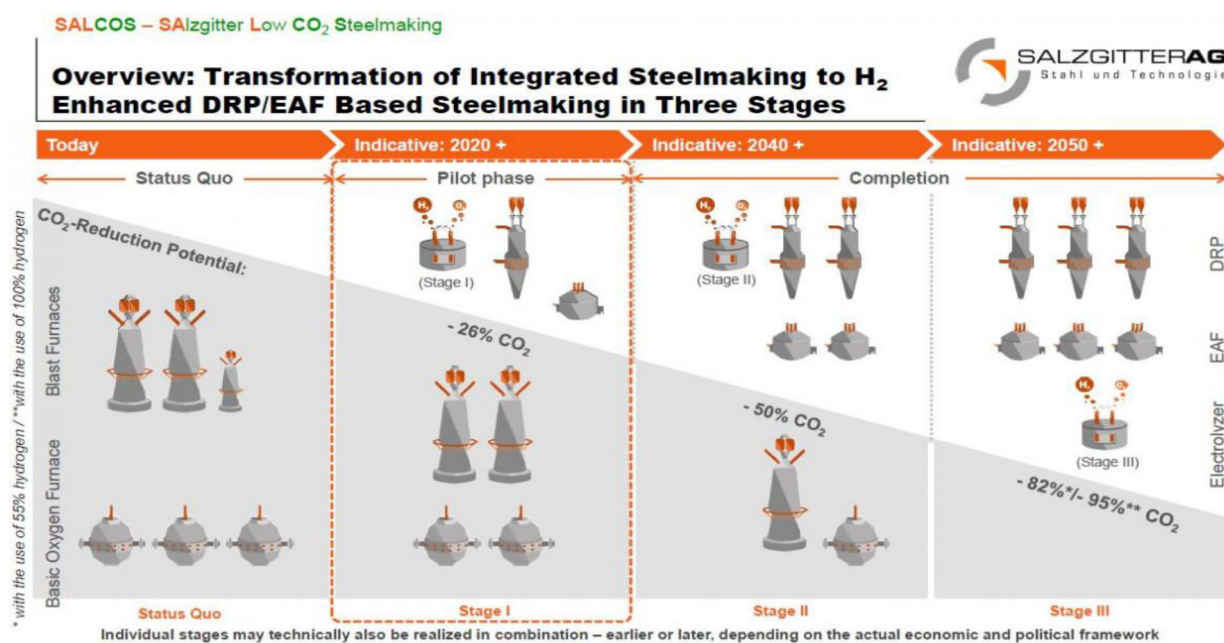


Рис. 5. Етапи переходу до «зеленої» сталі (за [13])

електроенергію з ВДЕ та локальні джерела сировини. Для аграрного сектору, який дедалі більше залежить від екологічних стандартів ЄС, саме сталі водневого походження мають стати базою для виробництва робочих органів машин, металоконструкцій інфраструктури та обладнання для переробки сільгосппродукції. Перехід до водневих технологій не лише знижує вуглецевий слід, а й дозволяє виробляти сталь із контрольованим складом і чистотою, що критично важливо для підвищення ресурсу деталей у важких експлуатаційних умовах.

5. Стратегія переходу до «зеленої» сталі. Перехід від традиційного виробництва на основі коксу до низьковуглецевих технологій відбувається поетапно (рис. 5). Досвід провідних європейських компаній, зокрема концерну Salzgitter AG, демонструє можливість побудови поетапної стратегії декарбонізації з використанням DRI/HBI та електродугових печей (EAF), що базується на поступовій інтеграції водню у металургійний цикл.

Етап I (2020–2030 рр.) – пілотні проекти. На першому етапі реалізуються пілотні установки, що передбачають часткову заміну коксу та природного газу воднем у доменних і конвертерних процесах. Це дозволяє знизити викиди CO₂ орієнтовно на 25–30 % без кардинальної перебудови виробничої інфраструктури. Такі рішення розглядаються як «мостові технології», які забезпечують перехід до більш масштабних інновацій у майбутньому.

Етап II (близько 2040 р.) – промислова інтеграція. Другий етап пов'язаний із широким використанням водню у виробничих маршрутах. Доменні печі частково замінюються установками прямого відновлення (DRI), що працюють на водневих сумішах, а також поступово інтегруються електродугові печі з живленням від відновлюваних джерел енергії. Очікуваний рівень скорочення викидів CO₂ на цьому етапі сягає 45–55 %, що вже відповідає проміжним європейським орієнтирам у межах Green Deal та вимогам CBAM.

Етап III (після 2050 р.) – повна трансформація. Завершальний етап передбачає повну відмову від доменного виробництва та перехід до схеми «електроліз – DRI/HBI – EAF». Водень стає основним відновником, а джерелом енергії виступають відновлювані електричні потужності. За рахунок цього можливе досягнення скорочення викидів CO₂ на рівні 82–95 %, що робить виробництво сталі фактично вуглецево-нейтральним. Така стратегія вимагає значних інвестицій у відновлювану енергетику, водневу інфраструктуру та нові металургійні кластери.

Значення для аграрного сектору. Поетапний перехід до безкокскових і водневих технологій дозволяє агросектору планувати оновлення техніки та інфраструктури з орієнтацією на матеріали з гарантовано низьким вуглецевим слідом. Це важливо не лише для експортної продукції, а й для внутрішнього ринку, де вартість металу визначатиметься доступністю «зеленої» енергії та нових металургійних кластерів.

6. Обсяги використання DRI-процесів. *Сучасний стан і масштаби.* Процеси прямого відновлення заліза (Direct Reduced Iron, DRI) набувають дедалі більшого значення як альтернатива класичним доменним технологіям. Згідно з даними [14] (див. рис. 6), найбільші обсяги виробництва заліза у світі досі забезпечують доменні печі (Blast Furnace, BF) із показником понад 5 млн т/рік у найбільших комплексах. Водночас поступово зростають потужності установок DRI на основі природного газу, зокрема технологій Midrex та HYL, які у провідних країнах досягають мільйонних масштабів виробництва.

Технологічна різноманітність. Сучасна металургія використовує кілька типів DRI-процесів:

- Midrex – найпоширеніша газова технологія з використанням реформованого природного газу;
- HYL/Energiron – модифікований процес із гнучкістю щодо сировини та газових сумішей;
- Corex/Finex – комбіновані технології із заміною коксу некоксовим вугіллем;
- Rotary Kiln та Rotary Hearth Furnace – менш масштабні варіанти для дрібної руди або відходів;
- HIsarna, DIOS, ITmk3 – перспективні процеси з прямим використанням тонкодисперсної руди та некоксового палива.

Діаграма на рис. 6 (праворуч) ілюструє співвідношення між сировинними ресурсами (окатиші, дрібна руда, агломерат), відновниками (природний газ, некоксове вугілля) та виробничими масштабами. Технології Midrex і HYL розташовані у зоні найбільш інтенсивного зростання завдяки їхній сумісності із «зеленим» воднем як відновником.

Екологічні аспекти. На відміну від доменного виробництва, DRI-процеси дають змогу скоротити викиди CO₂ на 40–60 % завдяки відмові від коксу та застосуванню природного газу. Подальший перехід на водневе відновлення (Hydrogen DRI, H₂-DRI) здатний майже повністю усунути вуглецеві викиди у металургії. Це робить DRI ключовим елементом стратегії «зеленої»

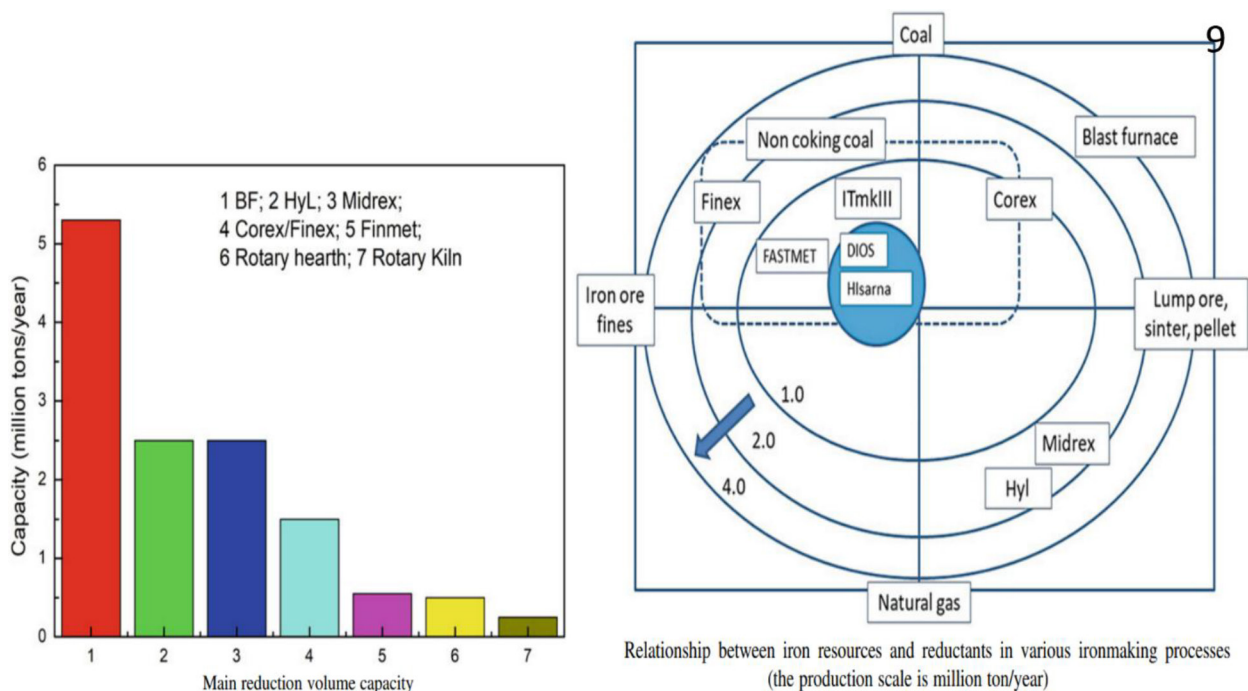


Рис. 6. Обсяги використання технологій DRI у світі (за [14])

трансформації галузі, особливо у зв'язку з європейським механізмом вуглецевого коригування імпорту (CBAM).

Значення для аграрного сектору. Розвиток DRI-процесів безпосередньо впливає на виробництво сталей для аграрного сектору. По-перше, він зменшує собівартість металу за рахунок використання доступної сировини та енергоресурсів. По-друге, екологічні переваги відкривають можливість експорту продукції у країни ЄС без додаткового «вуглецевого мита». Нарешті, поєднання DRI та EAF створює базу для виробництва високоякісних низьколегованих та HSLA-сталей, необхідних для аграрної техніки, силосів та інфраструктурних споруд.

7. Проєктування нових металургійних підприємств із використанням біогазу і біосинтетичного газу. Концепція «зеленої» металургії. Сучасні тенденції декарбонізації передбачають створення металургійних підприємств нового типу, орієнтованих на повну відмову від коксового вугілля та заміну його на відновники біологічного походження. У такій схемі використовується біогаз (biogas) або біосинтетичний газ (biosyngas), отриманий із біомаси, що дозволяє забезпечити замкнений вуглецевий цикл (рис. 7). Вуглець, який виділяється під час металургійного процесу, попередньо був поглинутий рослинністю з атмосфери, отже, баланс CO₂ стає нейтральним.

Інтеграція біогазових процесів із DRI та ЕДП. Основою запропонованої технологічної схеми є поєднання біогазового прямого

відновлення заліза (Biosyngas-DRI) з подальшим плавленням в електродуговій печі (Electric Arc Furnace, EAF). Як сировина використовуються залізорудні окатиші або дрібна руда, а відновником є газова суміш на основі CO, H₂ та CH₄, отримана з біомаси. У результаті формується губчасте залізо (DRI), яке далі завантажується в ЕДП для одержання сталі.

Використання водню та зеленої енергетики. Ключовим елементом схеми є поєднання біогазу із «зеленим» воднем, виробленим шляхом електролізу води за допомогою відновлюваних джерел енергії (сонячна, вітрова генерація). Це дозволяє ще більше знизити викиди та гнучко регулювати співвідношення газових компонентів. Водночас ЕДП працюють від «зеленої» електроенергії, що забезпечує майже безвуглецевий цикл виробництва сталі.

Екологічні та економічні переваги:

- зменшення викидів CO₂ на 90–95 % порівняно з доменним виробництвом;
- використання місцевих відновлюваних ресурсів (біомаси, аграрних відходів), що особливо актуально для аграрно-металургійних регіонів України;
- можливість створення енергетично-металургійних кластерів, де поєднуються виробництво сталі, аграрний сектор і відновлювана енергетика.

Значення для аграрного сектору. Інтеграція біогазових технологій у металургійне виробництво створює замкнений цикл «аграрні відходи – біогаз – металургія – сталь для агросектора».

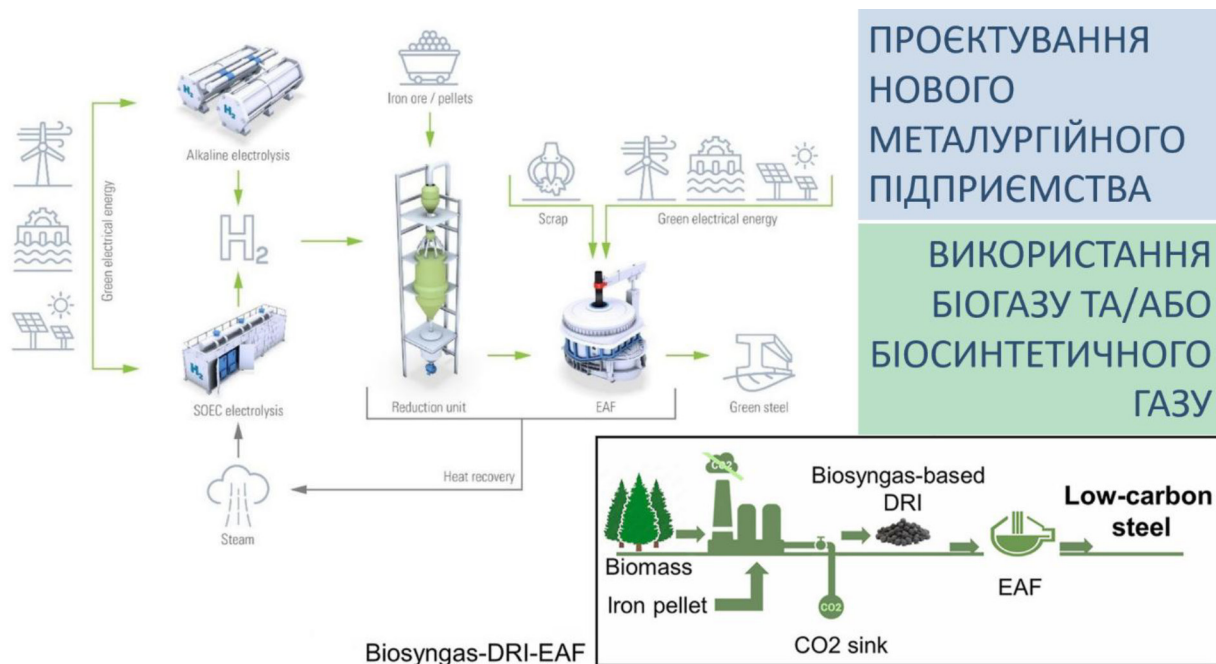


Рис. 7. Схема виробництва сталі з низьким вуглецевим слідом за технологією Biosyngas-DRI-EAF із використанням біогазу та відновлюваних джерел енергії (за [15, 16])

Це дозволяє перетворювати побічні продукти сільського господарства на ресурс для отримання екологічної сталі, яка згодом використовується у виробництві агротехніки й споруд. Таким чином, аграрний сектор не лише споживає, а й частково формує власну металургійну сировину.

8. Ливарно-прокатні модулі (Casting-Rolling Modules, CRM). Інтегровані ливарно-прокатні модулі (Casting-Rolling Modules, CRM,

рис. 8) становлять інноваційний напрям розвитку металургії, який дозволяє поєднати процеси безперервного розливання сталі та її гарячої прокатки в єдиний технологічний комплекс. Такий підхід забезпечує зменшення кількості проміжних операцій, скорочення витрат енергії та зниження собівартості продукції. На відміну від класичних схем, де виробляють масивні сляби товщиною 200–250 мм із подальшим повторним нагрівом, у компактних модулях

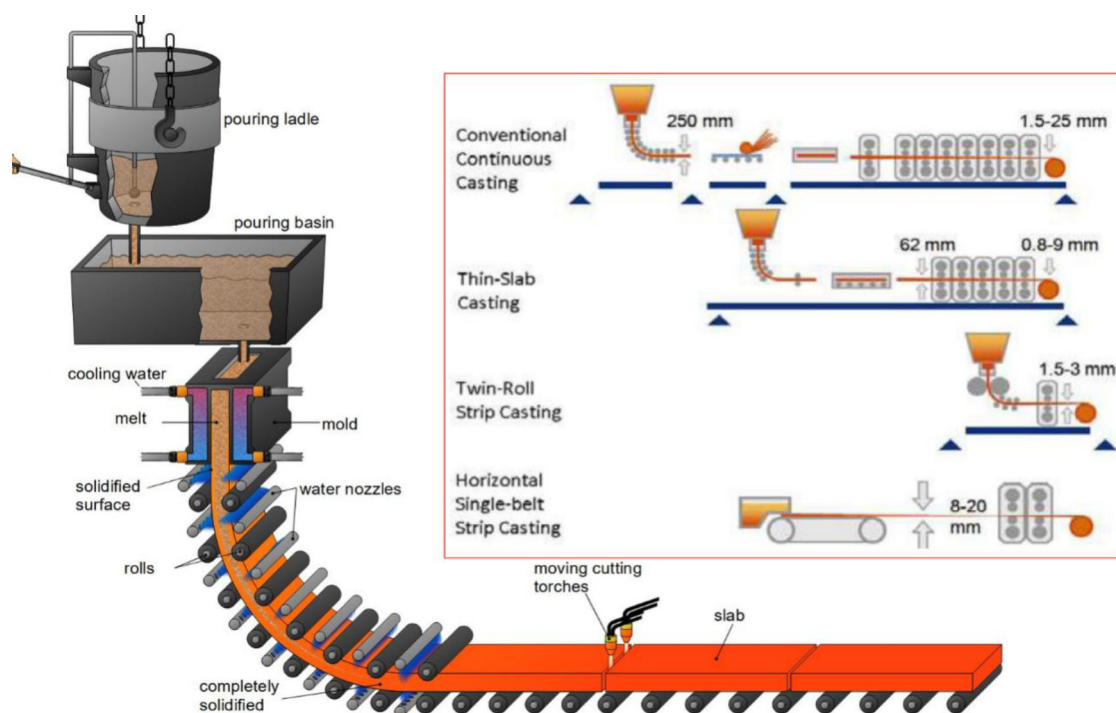


Рис. 8. Ливарно-прокатні модулі (за [17, 18])

одразу формуються тонкі заготовки, які без проміжних переділів подаються на прокатку. Це дозволяє знизити питомі викиди CO₂ та забезпечити стабільність якості металопродукції.

Класичне безперервне розливання сталі (Conventional Continuous Casting, CCC). Традиційна технологія безперервного розливання сталі (CCC) передбачає формування слябів товщиною близько 200–250 мм. Такі заготовки після охолодження потребують повторного нагріву у нагрівальних печах перед прокаткою, що зумовлює значні енерговитрати. Перевагою є висока стабільність і масовість виробництва, проте недоліком – громіздкість схеми та додаткові витрати енергії на повторний нагрів.

Тонкослябове розливання (Thin-Slab Casting, TSC). Технологія тонкослябового розливання (TSC) дозволяє відливати сляби товщиною 50–70 мм (на практиці ≈62 мм). Далі вони безпосередньо надходять на лінію гарячої прокатки без додаткового нагріву. Це забезпечує значну економію енергоресурсів та зменшення окисного спрацювання поверхні. Завдяки зменшенню товщини заготовки скорочується тривалість термічних впливів, що сприяє формуванню дрібнозернистої структури, а відтак підвищенню міцності та пластичності металу.

Штабове лиття у валках (Twin-Roll Strip Casting, TRSC). Штабове лиття у валках (TRSC) передбачає використання двох охолоджуваних валків, між якими формується металева смуга товщиною лише 1,5–3,0 мм. Валки виконують одночасно функцію кристалізатора й прокатного інструменту. Це найкоротший маршрут «від рідкого металу до готової стрічки / штаби». Технологія дозволяє суттєво знизити енергоспоживання та досягти високої точності геометричних розмірів. Водночас вона вимагає дуже жорсткого контролю параметрів охолодження та складу сталі.

Горизонтальне однобілетне стрічкове лиття (Horizontal Single-Belt Strip Casting, HSBC). Горизонтальне однобілетне стрічкове лиття (HSBC) є варіантом стрічкових технологій, де сталева смуга формується на горизонтальному охолоджуваному конвеєрі. Товщина заготовки становить 8–20 мм. Технологія забезпечує високий рівень якості поверхні та рівномірність охолодження, що важливо для подальшої прокатки та формування стабільних механічних властивостей.

Порівняння технологій:

- стабільність і масовість, проте великі енерговитрати;
- TSC – енергоефективність, дрібнозерниста структура, оптимальна для масового виробництва гарячекатаних рулонів;

– TRSC – мінімізація товщини заготовки, надзвичайно короткий технологічний цикл, але потреба у високоточному контролі;

– HSBC – висока якість поверхні, оптимальна товщина для подальшої обробки, придатна для спеціалізованих марок сталей.

Технологія Compact Strip Production (CSP). Технологія CSP або «компактне виробництво гарячекатаних смуг» поєднує тонкослябове розливання і безперервну прокатку в єдиний процес. При CSP використовується заготовка товщиною ≈60 мм, що дозволяє уникнути повторного нагріву, характерного для класичного маршруту. Перевагами є значна економія енергії, скорочення тривалості виробничого циклу та можливість отримувати рулонну продукцію з контрольованими механічними властивостями. CSP широко застосовується для виготовлення сталей конструкційного й аграрного призначення, оскільки забезпечує стабільну якість поверхні та оптимальне співвідношення міцності й пластичності.

Технологія Inline Strip Production (ISP). ISP – «лінійне виробництво смуг» – передбачає інтеграцію тонкослябового лиття з прокаткою через проміжні печі підігріву. У цій схемі відливають заготовку товщиною 80–100 мм, яка після короткого охолодження і проміжного підігріву надходить на стан гарячої прокатки. ISP є компромісом між класичними схемами та CSP: вона забезпечує достатню гнучкість для виробництва широкого сортаменту, але знижує загальну енергоефективність порівняно з CSP. Перевагою ISP є можливість прокатки спеціалізованих марок сталей з високими вимогами до структури й чистоти металу.

Технологія Endless Strip Production (ESP). ESP – «безкінечне виробництво смуг» – є найінноваційнішою схемою, що передбачає безперервний процес від рідкої сталі до готового рулону. У цій технології тонкослябова заготовка без проміжних накопичувачів і повторного нагріву безперервно прокатується у тонкі рулони. Це дозволяє досягати виняткової стабільності властивостей і якості поверхні, скоротити споживання енергії більш ніж на 30 % порівняно з класичними схемами. ESP вважається оптимальною для масового виробництва рулонів невеликої товщини, у тому числі для аграрної техніки, де потрібне поєднання зносостійкості й технологічності.

Стани Стеккеля (SteckelMills). Стани Стеккеля застосовуються для виробництва гарячекатаних рулонів у зворотно поступовому режимі прокатки з використанням котлів-нагрівачів (coilerfurnaces). Така конструкція дозволяє поєднати переваги товстолистого і рулонного

прокату. Стани Стекеля забезпечують широкий діапазон товщин – від 2–3 мм до 25–30 мм – та дозволяють отримувати продукцію зі стабільними геометричними параметрами й високою якістю поверхні. Для аграрного сектору це особливо важливо у виготовленні деталей ґрунтообробних машин та несучих конструкцій, де потрібна поєднана вимога – висока міцність і достатня пластичність.

Контрольоване прокатування і передумови для TMCP. Поєднання сучасних ливарно-прокатних модулів (CSP, ISP, ESP) та станів Стекеля створює технологічну основу для впровадження контрольованого прокатування й термомеханічно контрольованої обробки (TMCP) (див. рис. 9). Ці рішення дозволяють керувати температурними та деформаційними режимами, формувати дрібнозернисту структуру й забезпечувати покращений комплекс механічних властивостей сталі. Детальний розгляд сутності TMCP, його мікроструктурних ефектів та значення для аграрного сектору наведено в наступному розділі.

Значення для аграрного сектору. Інтегровані ливарно-прокатні модулі у поєднанні з контрольованим прокатуванням забезпечують виробництво сталей зі стабільною якістю поверхні, високою зносостійкістю, ударною в'язкістю та корозійною стійкістю. Це дозволяє знизити собівартість деталей для сільськогосподарської техніки, збільшити термін їх експлуатації та досягти відповідності сучасним екологічним і енергетичним стандартам.

9. Термомеханічно контрольований процес (Thermo-Mechanical Controlled Processing, TMCP). Сутність та відмінності від традиційних маршрутів. Термомеханічно контрольований процес (TMCP, англ. Thermo-Mechanical Controlled Processing – TMCP) являє собою поєднання гарячої прокатки з точним контролем температурних та деформаційних режимів, що дозволяє сформувати оптимальну мікроструктуру без необхідності традиційного термічного зміцнення (рис. 10). На відміну від класичного маршруту (Conventional route), де сляби товщиною 200–250 мм проходять стадії повторного нагріву, гарячої прокатки, холодної прокатки та відпалу, TMCP реалізується безпосередньо на тонкослябових або стрічкових модулях. Це забезпечує суттєве зменшення тривалості термічних впливів, обмеження росту зерна та формування ультрадрібнозернистого стану (UFG – Ultra Fine Grained) із розміром зерна <1 мкм.

Формування мікроструктури. У TMCP керування швидкістю охолодження та інтенсивністю деформації дозволяє отримувати різні фазові стани сталі:

- ферито-перлітна структура – для конструкційних сталей із помірною міцністю;
- бейнітна або ферито-бейнітна – для високоміцних низьколегованих (HSLA) сталей;
- мартенситна з подальшим відпуском – для борованих і зносостійких сталей (наприклад, 30MnB5, Hardox);
- аустенітно-феритна (TRIP-ефект, Transformation Induced Plasticity) – для сучасних

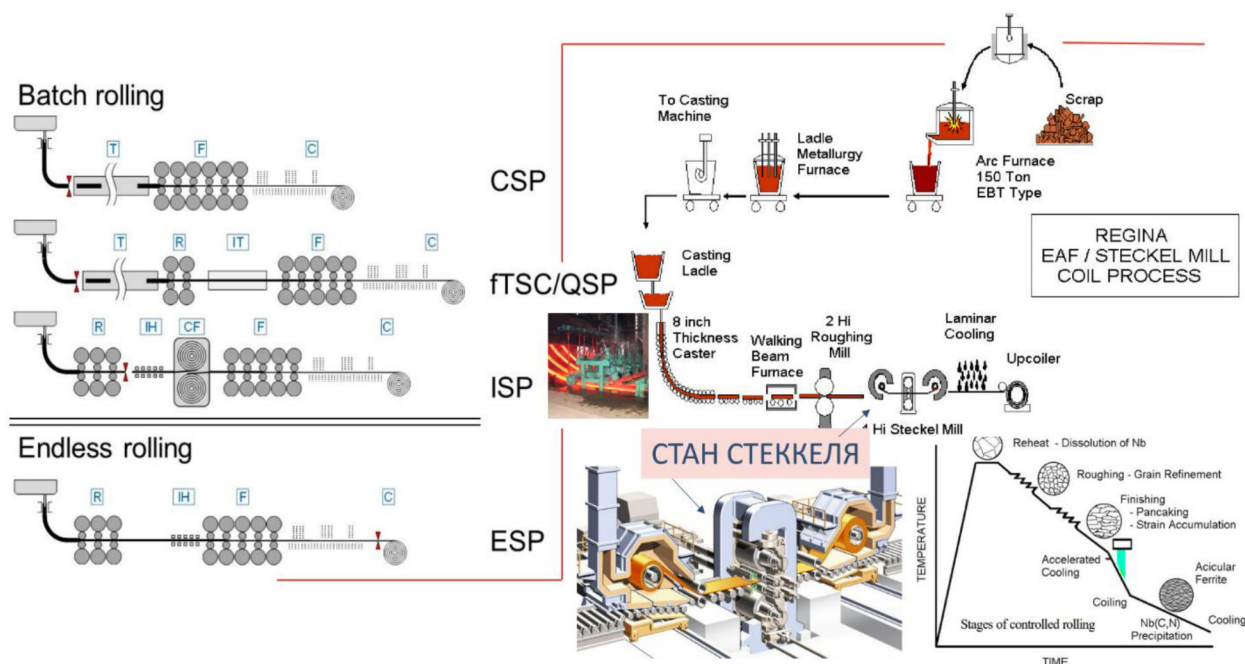


Рис. 9. Ливарно-прокатні модулі та формування показників якості металопродукції (за [19–21])

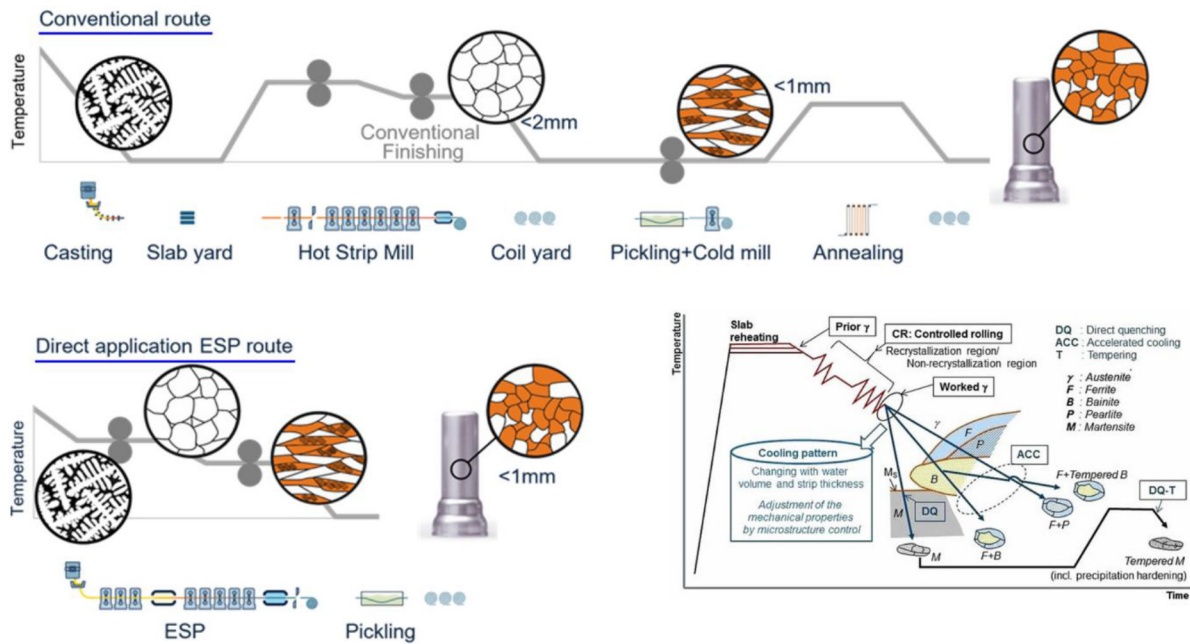


Рис. 10. Порівняння традиційного та ESP-маршрутів виробництва сталевих прокатів з контролем мікроструктури та механічних властивостей (за [22, 23])

багатофазних AHSS (Advanced High Strength Steels).

Охолодження після прокатки: *Laminar Cooling* та *Accelerated Cooling (ACC)*. Ключовим етапом ТМСП є контрольоване охолодження, яке визначає кінцеву мікроструктуру сталі:

- *Laminar Cooling* (ламінарне охолодження) застосовується для формування ферито-перлітних або бейнітно-феритних структур. Воно забезпечує рівномірний розподіл фаз, що оптимально для конструкційних і HSLA-сталей, де важливий баланс міцності та пластичності.

- *Accelerated Cooling (ACC)*, прискорене охолодження) дає змогу інтенсивно знижувати температуру після прокатки, формуючи дрібнобейнітні або навіть мартенситні структури. Цей підхід використовується для зносостійких сталей, що працюють в абразивних умовах, зокрема для борованих сталей (30MnB5) чи комерційних марок на кшталт Hardox.

Поєднання *Laminar Cooling* та *ACC* дозволяє гнучко варіювати властивості сталі залежно від вимог до кінцевого продукту: від пластичних конструкцій до високоміцних і твердих виробів для агротехніки. Додатково мікролегування Nb, V, Ti сприяє утворенню дрібнодисперсних карбонітрідів (NbC, TiC, VCN), які посилюють дисперсійне зміцнення.

Механічні властивості та переваги. У результаті застосування ТМСП формується унікальний баланс властивостей:

- межа міцності перевищує 600–800 МПа;

- відносне подовження становить 20–30 %, що свідчить про збереження достатньої пластичності;

- порівняно з традиційними сталями ТМСП дозволяє підвищити міцність на 30–50 % без втрати в'язкості.

Ці характеристики дають змогу ТМСП-сталем займати проміжну позицію між класичними низьковуглецевими та сучасними багатофазними AHSS-сталями, поєднуючи високу міцність і технологічність.

Значення для аграрного сектору. Для сталей сільськогосподарського призначення ТМСП є базовою технологією, яка дозволяє забезпечити стійкість у найскладніших умовах експлуатації:

- абразивне зношування у ґрунті – робочі органи плугів, дисків, борін;

- ударні навантаження – лемеші, ножі та інші деталі, що стикаються з камінням чи ущільненим ґрунтом;

- корозійна дія вологи та агрохімікатів – металоконструкції силосів, теплиць, елеваторів.

Таким чином, ТМСП відкриває можливість цілеспрямованого керування мікроструктурою, забезпечує сталі з високим ресурсом роботи та одночасно відповідає сучасним екологічним і економічним вимогам. Для України ця технологія є одним із ключових елементів післявоєнної модернізації металургії та інтеграції у «зелену» економіку ЄС.

10. Зменшення викидів CO₂ у металургійному виробництві. Традиційний цикл

BF–BOF. Класичне виробництво сталі у схемі «доменна піч – кисневий конвертер» (BF–BOF route) включає послідовні етапи (рис. 11): коксування вугілля, виробництво агломерату та окатишів, відновлення заліза у доменній печі, подальше перероблення чавуну в конвертері, розливання слябів, їх повторний нагрів і прокатку. Для виготовлення однієї тонни сталі у такій схемі витрачається значна кількість енергії та палива, що призводить до викидів на рівні приблизно 2555 кг CO₂/т сталі. Основними джерелами є коксохімічне виробництво, доменний процес та повторний нагрів заготовок.

Альтернативні схеми на основі EAF та ESP. Сучасні підходи до декарбонізації передбачають використання електродугових печей (Electric Arc Furnace, EAF) із завантаженням металобрухту (scrap-based route), а також впровадження технологій безперервного тонкослябового розливання та прокатки (Endless Strip Production, ESP). При такому маршруті виробництво сталі спирається на 100 % металобрухту, що практично усуває потребу у коксохімічному та агломераційному виробництві. Внаслідок цього питомі викиди скорочуються до ≈123 кг CO₂/т сталі, що на 95 % менше, ніж у традиційному циклі.

Кількісний ефект і перспективи. Порівняння показників засвідчує:

- традиційний BF–BOF маршрут → 2555 кг CO₂/т сталі;
- EAF + ESP маршрут на брухті → 123 кг CO₂/т сталі.

Зниження становить близько 2432 кг CO₂/т сталі, що підтверджує високий потенціал

технологій на основі електродугових печей і компактних модулів для досягнення кліматичних цілей.

Значення для аграрного сектора. Для виробництва сталей аграрного призначення цей ефект є принциповим. По-перше, скорочення вуглецевого сліду відповідає вимогам механізму СВМ та європейських ринків, що важливо для експорту української сільськогосподарської техніки та інфраструктурних рішень. По-друге, використання металобрухту як сировини створює умови для розвитку замкнених виробничих циклів у регіональних кластерах «металургія–машинобудування–агросектор». Це дозволяє одночасно знизити екологічне навантаження і забезпечити конкурентоспроможність продукції.

Висновки

1. Актуальність переходу до «зеленої» металургії підтверджена як глобальними викликами декарбонізації та вимогами СВМ, так і внутрішніми потребами аграрного сектора України у високоякісних конструкційних і спеціальних сталях. Це створює передумови для інтеграції металургії та агропромислового комплексу у форматі кластерного розвитку.

2. Безкоксіві маршрути виробництва сталі (DRI/HBI → EAF) продемонстрували найбільший потенціал у зниженні викидів CO₂ (до 80–95 %), формуванні нової ресурсної бази та забезпеченні контролю за якістю металу. Їх поєднання із «зеленим» воднем і відновлюваною енергетикою дозволяє створювати вуглецево-нейтральні цикли виробництва.

3. Компактні ливарно-прокатні модулі (CSP, ISP, ESP) і стани Стеккеля є ефективними

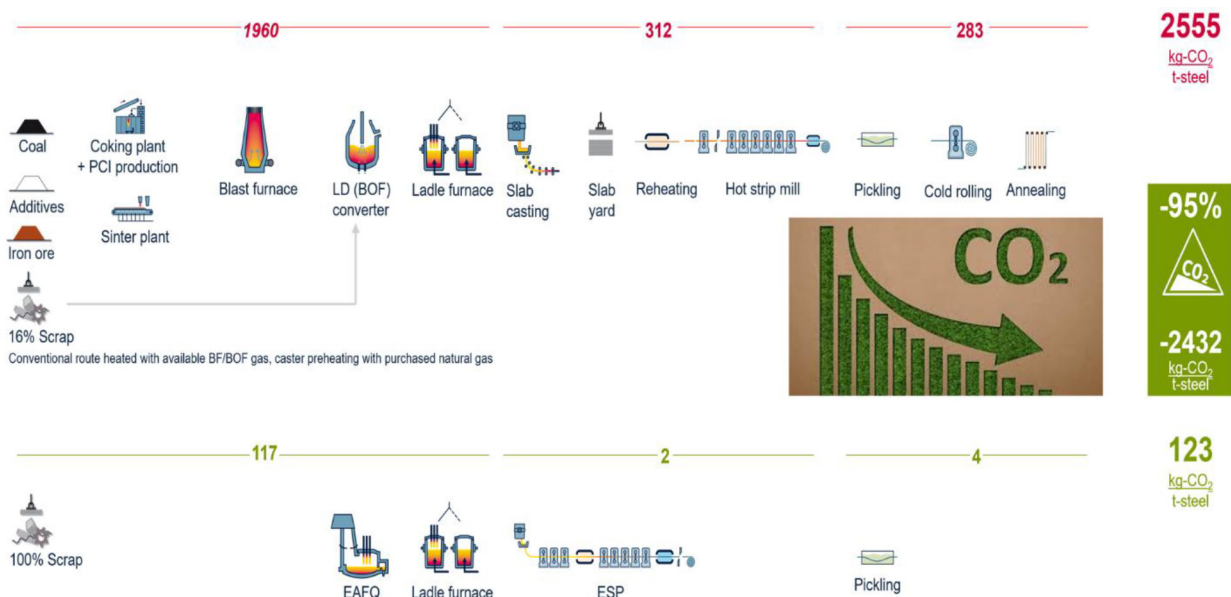


Рис. 11. Порівняння традиційного та сучасного електросталеплавильного маршруту виробництва сталі за показниками викидів CO₂ (за [22])

інструментами енергозбереження та оптимізації виробничих маршрутів. Вони дозволяють інтегрувати безперервне розливання та прокатку, скорочуючи енерговитрати, знижуючи собівартість і створюючи умови для керування мікроструктурою сталей.

4. Термомеханічно контрольовані процеси (ТМСП) та мікролегування (В, V, Nb, Ti) забезпечують формування дрібнозернистої та ультрадрібнозернистої структури, що поєднує високу міцність (понад 600–800 МПа) з ударною в'язкістю і корозійною стійкістю. Це особливо важливо для сталей аграрного призначення, які працюють у середовищі абразивного зношування та динамічних навантажень.

5. Систематизація сталей аграрного призначення показала, що різні групи (зносостійкі, конструкційні, інструментальні, HSLA, корозійностійкі) відповідають специфічним експлуатаційним умовам – від роботи ґрунтообробних органів у абразивному середовищі до експлуатації металоконструкцій у вологих та агресивних умовах.

6. Формування металургійно-аграрних клас-терів на основі «зелених» технологій може стати одним із ключових напрямів післявоєнної модернізації України. Це забезпечить екологічно безпечне виробництво, підвищить конкурентоспроможність української продукції на європейському ринку та сприятиме сталому розвитку агропромислового комплексу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Сталь України: відновлення та інновації / Смірнов О. М., Тімошенко С. М., Нарівський А. В., Семірягін С. В., Осипенко В. В., Скоробагатько Ю. П. Київ : НВП «Видавництво "Наукова думка" НАН України», 2023. 268 с. ISBN 978-966-00-1909-6.
2. Організація Об'єднаних Націй з промислового розвитку (ЮНІДО). Програма зеленого відновлення промисловості. Україна 2024–2028 / Неофіційний переклад. Відень : UNIDO, 2024. 92 с. URL: https://www.unido.org/sites/default/files/unido-publications/2024-08/UKR_Green%20industrial%20recovery%20programme%20for%20Ukraine%202024-2028_external_online%20%281%29.pdf
3. Даценко А. М. Особливості адаптації металургії України до механізму транскордонного вуглецевого регулювання. *Здобутки економіки: перспективи та інновації*. 2025. Вип. 17. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15220994>
4. Глущенко А. М. Вплив «Європейської зеленої угоди» на трансформацію та декарбонізацію промисловості в ЄС. *Економічний вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут»*. 2025. № 32. *Галузева економіка*. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.32.2025.328536>
5. Мироненко М., Король Р., Колісник О. Проміжні підсумки роботи аграрних та металургійних підприємств України у січні та лютому 2025 року. Інформаційні технології в агробізнесі та аграрній освіті : тези доповідей XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції (23–25 квітня 2025 року, м. Дніпро). Дніпро : ДДАЕУ, 2025. С. 15–17. URL: https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/11850/1/25_Інформаційні%20технології%20в%20агробізнесі%20та%20аграрній%20освіті.pdf#page=15
6. Денисенко М. І., Рубльов В. І. Технологічні методи для забезпечення довговічності робочих органів і надійності сільськогосподарських машин. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Кіровоград : КНТУ, 2012. Вип. 42. Ч. 2. С. 92–102. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/2035>
7. Денисенко М. І. Підвищення технічного ресурсу і довговічності робочих органів ґрунтообробних сільськогосподарських машин. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : збірник наукових праць*. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. Вип. 5(36). Ч. 1. С. 40–47. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.40-47](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.40-47)
8. Bhakat A. K., Mishra A. K., Mishra N. S. Characterization of wear and metallurgical properties for development of agricultural grade steel suitable in specific soil conditions. *Wear*. 2007. Vol. 263. Issues 1–6. P. 228–233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.006>
9. Souza V. P. de, Labiapari W. da S., Lins V. de F. C. Stainless steels as a solution for corrosion and erosion problems involving grains in agribusiness sector applications. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 30. P. 5605–5621. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.203>
10. Ritchie H. How much electricity would we need for green steel? Some numbers from Chris Goodall's new book. *Sustainability by Numbers*. 2024. 28 березня. URL: <https://www.sustainabilitybynumbers.com/p/green-steel-goodall>
11. Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry – An overview of challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production* / Wang R. R., Zhao Y. Q., Babich A., Senk D., Fan X. Y. 2021. Vol. 329. Art. 129797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129797>

12. Patisson F., Mirgaux O., Birat J.-P. Hydrogen steelmaking. Part 1: Physical chemistry and process metallurgy. *Matériaux & Techniques*. 2021. Vol. 109. No. 3–4. P. 303. DOI: <https://doi.org/10.1051/mattech/2021025>
13. Amelang S. Can Salzgitter cut Germany's CO₂ emissions with low-carbon steel project? *Clean Energy Wire*. 2019. 22 травня. URL: <https://www.cleanenergywire.org/news/can-salzgitter-cut-germanys-co2-emissions-low-carbon-steel-project>
14. Cavaliere P. Direct Reduced Iron: Most Efficient Technologies for Greenhouse Emissions Abatement. *Clean Ironmaking and Steelmaking Processes*. 2019. P. 419–484. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-21209-4_8
15. SMS group. Hydrogen: Turning metals green. *SMS Group*. 2022. URL: <https://www.sms-group.com/innovation/turning-metals-green/hydrogen>
16. Towards fossil-free steel: Life cycle assessment of biosyngas-based direct reduced iron (DRI) production process. *Journal of Cleaner Production* / Nurdawati A., Zaini I. N., Wei W., Gyllenram R., Yang W., Samuelsson P. 2023. Vol. 393. Art. 136262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136262>
17. From steel to semi-finished products. *Tec-science*. 2018. 21 червня. URL: <https://www.tec-science.com/material-science/steel-making/steel-semi-finished-products-continuous-ingot-casting/>
18. Guthrie R., Isac M. Continuous Casting Practices for Steel. *Encyclopedia*. 2022. URL: <https://encyclopedia.pub/entry/23634>
19. Bragin S., Rimnac A., Linzer B., Bianchi A., Mantova A., Rizzi A., Bernhard C. Arvedi ESP process – an ultimate technology connecting casting and rolling in endless mode. Leoben University, Siemens VAI, Acciaieria Arvedi Spa. 2013. URL: https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/1072012/ARVEDI_ESP_PROCESS_AN_ULTIMATE_TECHNOLOGY_CONNECTING_CASTING_AND_ROLLING_IN_ENDLESS_MODE.pdf
20. Steckel Mills – Creative solutions for the metal industry. *SMS group*. 2022. URL: https://live.cdn.cms.sms-group.com/SMS_group_website/DataStorage/02_Downloads/2022/2022_Q2/W4-309E_Steckel_Mills.pdf
21. Collins L. E. Processing of niobium-containing steels by Steckel mill rolling. 2001. URL: https://niobium.tech/-/media/niobiumtech/attachments-biblioteca-tecnica/nt_processing-of-niobium-containing-steels-by-steckel-mill-rolling.pdf
22. Arvedi ESP is an environmentally friendly technology. *Stahleisen*. 2023. 24 травня. URL: <https://www.stahleisen.de/2023/05/24/arvedi-esp-is-an-environmentally-friendly-technology/>
23. Buchmayr B., Degner M., Palkowski H. Future Challenges in the Steel Industry and Consequences for Rolling Plant Technologies. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*. 2018. Vol. 163. P. 76–83. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00501-018-0708-x>

REFERENCES:

1. Smirnov, O. M., Timoshenko, S. M., Narivskiy, A. V., Semiriagin, S. V., Osypenko, V. V., & Skorobahatko, Yu. P. (2023). *Stal Ukrainy: vidnovlennia ta innovatsii* [Steel of Ukraine: Recovery and Innovations]. Kyiv : NVP "Vydavnytstvo 'Naukovadumka' NAN Ukrainy", 268. ISBN 978-966-00-1909-6. [in Ukrainian].
2. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). (2024). *Prohrama zelenoho vidnovlennia promyslovosti. Ukraina 2024–2028* [Green Industrial Recovery Programme. Ukraine 2024–2028]. Vienna : UNIDO. Retrieved from: https://www.unido.org/sites/default/files/unido-publications/2024-08/UKR_Green%20industrial%20recovery%20programme%20for%20Ukraine%202024-2028_external_online%20%281%29.pdf [in Ukrainian].
3. Datsenko, A. M. (2025). Osoblyvosti adaptatsii metalurhii Ukrainy do mekhanizmu transkordonnoho vuhletsevoho rehuliuвання [Features of adaptation of Ukraine's metallurgy to the mechanism of cross-border carbon regulation]. *Zdobutky ekonomiky: perspektyvy ta innovatsii – Achievements of economy: prospects and innovations*, 17. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15220994> [in Ukrainian].
4. Hlushchenko, A. M. (2025). Vplyv «Yevropeiskoi zelenoi uhody» na transformatsiiu ta dekarbonizatsiiu promyslovosti v YeS [Impact of the "European Green Deal" on transformation and decarbonization of industry in the EU]. *Ekonomichnyi visnyk NTUU "Kyivskiy politekhnichnyi instytut" – Economic Bulletin of NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*, 32. Section: Sectoral Economy. <https://doi.org/10.20535/2307-5651.32.2025.328536> [in Ukrainian].
5. Myronenko, M., Korol, R., & Kolisnyk, O. (2025). Promizhni pidsumky roboty ahrarynykh ta metalurhiinykh pidpriemstv Ukrainy u sichni ta liutomu 2025 roku [Interim results of the work of agricultural and metallurgical enterprises of Ukraine in January and February 2025]. *Informatsiini tekhnologii v ahrobiznesi ta ahraryni*

osviti: tezy dopovidei XIII Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii (23–25 kvitnia 2025 roku, m. Dnipro) – *Information Technologies in Agribusiness and Agrarian Education: Abstracts of the 13th All-Ukrainian Scientific-Practical Conference (April 23–25, 2025, Dnipro, Ukraine)*, 15–17. Dnipro: DDAEU. Retrieved from: https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/11850/1/25_Інформаційні%20технології%20в%20агробізнесі%20та%20арпарній%20освіті.pdf#page=15 [in Ukrainian].

6. Denysenko, M. I., & Rubliov, V. I. (2012). Tekhnolohichni metody dlia zabezpechennia dovhovichnosti robochykh orhaniv i nadiinosti silskohospodarskykh mashyn [Technological methods to ensure the durability of working bodies and the reliability of agricultural machines]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn: zahalnodержавnyi mizhvidomchyi naukovy-tekhnichniy zbirnyk – Designing, Manufacturing and Operation of Agricultural Machinery: National Interdepartmental Scientific and Technical Collection*, 42(2), 92–102. Kirovohrad: KNTU. Retrieved from: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/2035> [in Ukrainian].

7. Denysenko, M. I. (2022). Pidvyshchennia tekhnichnoho resursu i dovhovichnosti robochykh orhaniv r'runtoobrobnykh silskohospodarskykh mashyn [Improving the technical resource and durability of working bodies of tillage agricultural machines]. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky: zbirnyk naukovykh prats – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences: Collection of Scientific Papers*, 5(36)(1), 40–47. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.40-47](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.40-47) [in Ukrainian].

8. Bhakat, A. K., Mishra, A. K., & Mishra, N. S. (2007). Characterization of wear and metallurgical properties for development of agricultural grade steel suitable in specific soil conditions. *Wear*, 263(1–6), 228–233. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.006>

9. Souza, V. P. de, Labiapari, W. da S., & Lins, V. de F. C. (2024). Stainless steels as a solution for corrosion and erosion problems involving grains in agribusiness sector applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 5605–5621. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.203>

10. Ritchie, H. (2024). How much electricity would we need for green steel? Some numbers from Chris Goodall's new book. *Sustainability by Numbers*. Retrieved from: <https://www.sustainabilitybynumbers.com/p/green-steel-goodall>

11. Wang, R. R., Zhao, Y. Q., Babich, A., Senk, D., & Fan, X. Y. (2021). Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry – An overview of challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 329, 129797. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129797>

12. Patisson, F., Mirgaux, O., & Birat, J.-P. (2021). Hydrogen steelmaking. Part 1: Physical chemistry and process metallurgy. *Matériaux & Techniques*, 109(3–4), 303. <https://doi.org/10.1051/mattech/2021025>

13. Amelang, S. (2019). Can Salzgitter cut Germany's CO₂ emissions with low-carbon steel project? *Clean Energy Wire*. Retrieved from: <https://www.cleanenergywire.org/news/can-salzgitter-cut-germanys-co2-emissions-low-carbon-steel-project>

14. Cavaliere, P. (2019). Direct Reduced Iron: Most Efficient Technologies for Greenhouse Emissions Abatement. In *Clean Ironmaking and Steelmaking Processes*, 419–484. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21209-4_8

15. SMS group. (2022). Hydrogen: Turning metals green. Retrieved from: <https://www.sms-group.com/innovation/turning-metals-green/hydrogen>

16. Nurdiawati, A., Zaini, I. N., Wei, W., Gyllenram, R., Yang, W., & Samuelsson, P. (2023). Towards fossil-free steel: Life cycle assessment of biosyngas-based direct reduced iron (DRI) production process. *Journal of Cleaner Production*, 393, 136262. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136262>

17. Tec-science. (2018). From steel to semi-finished products. *tec-science*. Retrieved from: <https://www.tec-science.com/material-science/steel-making/steel-semi-finished-products-continuous-ingot-casting/>

18. Guthrie, R., & Isac, M. (2022). Continuous Casting Practices for Steel. *Encyclopedia*. Retrieved from: <https://encyclopedia.pub/entry/23634>

19. Bragin, S., Rimnac, A., Linzer, B., Bianchi, A., Mantova, A., Rizzi, A., & Bernhard, C. (2013). Arvedi ESP process – an ultimate technology connecting casting and rolling in endless mode. Leoben University, Siemens VAI, Acciaieria Arvedi Spa. Retrieved from: https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/1072012/ARVEDI_ESP_PROCESS_AN_ULTIMATE_TECHNOLOGY_CONNECTING_CASTING_AND_ROLLING_IN_ENDLESS_MODE.pdf

20. SMS group. (2022). *Steckel Mills – Creative solutions for the metal industry*. SMS Group. Retrieved from: https://live.cdn.cms.sms-group.com/SMS_group_website/DataStorage/02_Downloads/2022/2022_Q2/W4-309E_Steckel_Mills.pdf

21. Collins, L. E. (2001). Processing of niobium-containing steels by Steckel mill rolling. Retrieved from: https://niobium.tech/-/media/niobiumtech/attachments-biblioteca-tecnica/nt_processing-of-niobium-containing-steels-by-steckel-mill-rolling.pdf

22. Stahleisen. (2023). Arvedi ESP is an environmentally friendly technology. *Stahleisen*. Retrieved from: <https://www.stahleisen.de/2023/05/24/arvedi-esp-is-an-environmentally-friendly-technology/>

23. Buchmayr, B., Degner, M., & Palkowski, H. (2018). Future challenges in the steel industry and consequences for rolling plant technologies. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 163, 76–83. <https://doi.org/10.1007/s00501-018-0708-x>

Стаття надійшла: 01.08.2025

Стаття прийнята: 08.08.2025

Опублікована: 10.11.2025

