

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: гірничо-металургійний

Кафедра металургії чорних металів і ливарного виробництва

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Спеціальність: 136 Металургія

Затверджую

Зав. кафедрою _____

« ____ » _____ 2026 р

ЗАВДАННЯ

на випускну атестаційну роботу бакалавра

_____ Пакіна Микола Миколайовича _____

1. Тема роботи: «Розвиток процесу виробництва сталі шляхом зменшення викидів вуглецю в атмосферу»

керівник роботи: Савельєв Сергій Геннадійович _____

затверджено наказом по КНУ від « 19 » лютого 2026 р. №113с

2. Строк подання роботи студентом « 02 » червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Технологічні та екологічні показники ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (обсяг 6 млн т/рік, викиди 1,8 т CO₂/т), світовий досвід декарбонізації металургії, чинні нормативи з охорони праці.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз сучасного стану сталеплавильного виробництва та джерел викидів CO₂. 2. Обґрунтування шляхів декарбонізації, розрахунок екологічного та економічного ефектів. 3. Охорона праці та екологічна безпека. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу Схеми сталеплавильних агрегатів і систем уловлювання CO₂ (CCS/CCU), порівняльні таблиці технологій, графіки екологічної та економічної ефективності модернізації, презентація.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер етапу	Назва етапів виконання бакалаврської роботи	Термін виконання етапів
1	Аналіз літературних джерел, збір вихідних даних підприємства та складання плану роботи	20.02.26 – 05.03.26
2	Написання Розділу 1: аналіз стану виробництва сталі та джерел викидів CO ₂	06.03.26 – 25.03.26
3	Написання Розділу 2: обґрунтування інноваційних шляхів декарбонізації металургії	26.03.26 – 15.04.26
4	Виконання розрахунків зменшення викидів CO ₂ та техніко-економічного обґрунтування заходів	16.04.26 – 30.04.26
5	Написання Розділу 3: розробка заходів з охорони праці та оцінка екологічної безпеки	01.05.26 – 12.05.26
6	Підготовка графічного матеріалу, презентації та загальне оформлення пояснювальної записки	13.05.26 – 20.05.26
7	Проходження нормоконтролю, перевірка на плагіат, отримання відгуку керівника та рецензії	22.05.26 – 10.06.26
8	Остаточне зшивання роботи, підготовка доповіді та подання роботи на кафедру	11.06.26 – 17.06.26

Дата видачі завдання «_20_» лютого 2026 р.

Здобувач вищої освіти _____

(підпис)

Пакін М. М.

(П.І. по-батькові)

Керівник випускної

Кваліфікаційної роботи _____

(підпис)

Савельєв С. Г.

(П.І. по-батькові)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: с. 69, рис. 5, табл. 5, 18 джерел.

Об'єкт дослідження – процес виробництва сталі на підприємствах повного металургійного циклу.

Предмет дослідження – технологічні та організаційні заходи щодо зниження викидів вуглекислого газу при виробництві сталі.

Мета роботи – обґрунтування ефективних шляхів зменшення викидів CO₂ у процесі виробництва сталі та підвищення екологічної ефективності металургійного підприємства.

У роботі проаналізовано сучасний стан сталеплавильного виробництва та визначено основні джерела утворення викидів вуглекислого газу. Розглянуто технологічні процеси виробництва сталі (мартенівський, конвертерний, електродуговий) та їх вплив на навколишнє середовище. Особливу увагу приділено світовим тенденціям декарбонізації металургії.

Надано характеристику діяльності підприємства АрселорМіттал Кривий Ріг та проаналізовано існуючі технології очищення викидів.

У роботі запропоновано комплекс заходів щодо зниження викидів CO₂, зокрема: модернізацію конвертерного виробництва, використання альтернативних відновників (водню), впровадження технологій уловлювання вуглекислого газу, а також часткове застосування електродугових печей.

Виконано розрахунок зниження викидів CO₂, який показав можливість їх скорочення приблизно на 35 %. Проведено техніко-економічне обґрунтування запропонованих заходів, яке підтвердило їх економічну доцільність та прийнятний термін окупності.

У розділі з охорони праці та екології проаналізовано шкідливі виробничі фактори та запропоновано заходи щодо покращення умов праці. Оцінено вплив запропонованих рішень на довкілля та доведено їх позитивний екологічний ефект.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для модернізації металургійних підприємств з метою зниження екологічного навантаження та підвищення ефективності виробництва.

Ключові слова: СТАЛЬ, ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ, ВИКИДИ CO₂, ЕЛЕКТРОДУГОВА ПІЧ, ВОДЕНЬ, ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1.1 Загальна характеристика сталеплавильного виробництва.....	9
1.2 Основні джерела викидів вуглецю у металургії	11
1.3 Технологічні процеси виробництва сталі (мартенівський, конвертерний, електропічний).....	13
1.4 Світові тенденції декарбонізації металургії.....	19
1.5 Характеристика підприємства АрселорМіттал Кривий Ріг.....	21
1.6 Аналіз існуючих технологій очищення та зменшення викидів.....	23
РОЗДІЛ 2. ІННОВАЦІЙНА ЧАСТИНА. ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ ВУГЛЕЦЮ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СТАЛІ	26
2.1 Обґрунтування вибору напряму модернізації	26
2.2 Використання альтернативних відновників (водень, біопаливо).....	28
2.3 Впровадження технологій уловлювання CO ₂ (CCS/CCU)	31
2.4 Відмова від мартенівського виробництва як етап декарбонізації	34
2.5 Модернізація конвертерного процесу	36
2.6 Використання електродугових печей як екологічної альтернативи.....	39
2.7 Розрахунок зменшення викидів CO ₂	42
2.8 Техніко-економічне обґрунтування запропонованих заходів	45
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЯ	49
3.1 Аналіз шкідливих факторів на підприємстві.....	49
3.2 Заходи з покращення умов праці	52
3.3 Екологічна безпека виробництва	55
3.4 Вплив запропонованих рішень на довкілля	58
ВИСНОВКИ.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ... Помилка! Закладку не визначено.	
ДОДАТКИ	63
ДОДАТОК А	63
Схема технологічного процесу виробництва сталі.....	63
ДОДАТОК Б	64
Основні джерела викидів CO ₂ у сталеплавильному виробництві.....	64
ДОДАТОК В.....	65
Порівняння технологій виробництва сталі за рівнем викидів CO ₂	65
ДОДАТОК Г	66
Результати розрахунку зниження викидів CO ₂	66

ВСТУП

Сучасний розвиток металургійної промисловості характеризується високим рівнем технологічності, значними обсягами виробництва та водночас суттєвим впливом на навколишнє середовище. Виробництво сталі є однією з базових галузей промисловості, яка визначає рівень економічного розвитку країни, забезпечує функціонування машинобудування, будівництва, транспорту та інших стратегічно важливих секторів. Разом з тим, традиційні технології виплавки сталі супроводжуються значними викидами вуглекислого газу (CO₂), що є одним із основних чинників глобальних кліматичних змін.

Актуальність теми зумовлена необхідністю зниження негативного впливу металургійного виробництва на довкілля, зокрема шляхом скорочення викидів парникових газів. У світовій практиці металургія входить до числа найбільших джерел антропогенних викидів CO₂, що обумовлено використанням викопного палива, зокрема коксу, у доменному виробництві, а також високою енергоємністю процесів. У зв'язку з цим питання декарбонізації металургійної галузі набуває особливої ваги як на міжнародному, так і на національному рівнях.

Особливу увагу сьогодні приділяють впровадженню інноваційних технологій, спрямованих на зменшення вуглецевого сліду сталеплавильного виробництва. До таких технологій належать використання альтернативних відновників (зокрема водню), впровадження електродугових печей, удосконалення доменного та конвертерного процесів, а також застосування технологій уловлювання та утилізації вуглекислого газу. Впровадження зазначених рішень дозволяє не лише зменшити екологічне навантаження, але й підвищити ефективність виробництва та конкурентоспроможність підприємств.

Практична значущість дослідження обумовлена тим, що розглянуті підходи можуть бути застосовані на діючих металургійних підприємствах України, зокрема на підприємстві АрселорМіттал Кривий Ріг.

Аналіз технологічних процесів цього підприємства та визначення шляхів їх удосконалення з урахуванням екологічних вимог дозволяє сформулювати обґрунтовані рекомендації щодо зниження викидів CO₂.

Метою даної кваліфікаційної роботи є дослідження процесів виробництва сталі та розробка заходів, спрямованих на зменшення викидів вуглецю в атмосферу шляхом удосконалення існуючих технологій і впровадження сучасних інноваційних рішень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан сталеплавильного виробництва та основні джерела викидів CO₂;
- дослідити технологічні процеси виробництва сталі та їх вплив на довкілля;
- розглянути світовий досвід зменшення викидів вуглецю у металургії;
- виконати аналіз діяльності підприємства АрселорМіттал Кривий Ріг;
- обґрунтувати доцільність впровадження інноваційних технологій для зниження викидів;
- провести розрахунок ефективності запропонованих заходів;
- оцінити екологічний та економічний ефект від їх впровадження.

Об'єктом дослідження є процес виробництва сталі на металургійних підприємствах.

Предметом дослідження є технологічні рішення та заходи, спрямовані на зменшення викидів вуглецю при виробництві сталі.

Отримані результати можуть бути використані для удосконалення технологічних процесів сталеплавильного виробництва з метою підвищення їх екологічності та ефективності

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА. СУЧАСНИЙ СТАН ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ ТА ПРОБЛЕМА ВИКИДІВ CO₂

1.1 Загальна характеристика сталеплавильного виробництва

Сталеплавильне виробництво є ключовою ланкою металургійного комплексу, що забезпечує отримання сталі – одного з найважливіших конструкційних матеріалів сучасної промисловості. Високі механічні властивості, технологічність обробки та відносна доступність роблять сталь незамінною у машинобудуванні, будівництві, транспорті, енергетиці та інших галузях. Від рівня розвитку сталеплавильного виробництва значною мірою залежить економічний потенціал держави та її конкурентоспроможність на світовому ринку [1, с. 21].

Сутність процесу виробництва сталі полягає у переробці чавуну або металобрухту з метою зниження вмісту вуглецю та видалення шкідливих домішок, таких як сірка, фосфор, кремній і марганець, до рівня, що відповідає заданим вимогам до якості сталі. При цьому відбувається окиснення надлишкового вуглецю та інших елементів з утворенням газоподібних і шлакових продуктів, що вимагає значних енергетичних витрат і супроводжується утворенням викидів у навколишнє середовище.

У сучасній металургії застосовуються кілька основних способів виробництва сталі, серед яких домінуючими є конвертерний, електросталеплавильний та, у меншій мірі, мартенівський процес. Найбільш поширеним у світі є киснево-конвертерний спосіб, при якому рідкий чавун продувається киснем для окиснення домішок. Цей метод характеризується високою продуктивністю, відносно низькими витратами та можливістю отримання великих обсягів сталі, однак супроводжується значними викидами вуглекислого газу [1, с. 44-48].

Електросталеплавильний спосіб базується на використанні електродугових печей, у яких плавлення металобрухту або прямовідновленого заліза здійснюється за рахунок електричної енергії.

Цей метод вважається більш екологічно прийнятним, оскільки дозволяє значно зменшити викиди CO₂, особливо за умови використання електроенергії з відновлюваних джерел. Разом з тим, його застосування обмежується доступністю якісної сировини та високими вимогами до енергопостачання.

Історично важливим, але на сьогодні майже витісненим, є мартенівський спосіб виробництва сталі, який характеризується високою тривалістю процесу та значними енерговитратами. Через низьку ефективність і екологічну недосконалість цей метод практично не використовується на сучасних підприємствах [2, с. 66].

Сталеплавильне виробництво є складною багатостадійною системою, що включає підготовку шихтових матеріалів, виплавку сталі, її позапічну обробку та розливання. Кожен із цих етапів супроводжується використанням енергоресурсів і утворенням відходів, що впливає на загальний екологічний баланс виробництва. Особливу роль відіграє якість вихідної сировини, технологічні режими та рівень автоматизації процесів.

Однією з ключових особливостей сталеплавильного виробництва є його висока енергоємність. Для отримання однієї тони сталі витрачається значна кількість палива та електроенергії, що зумовлює великі обсяги викидів парникових газів, передусім вуглекислого газу. Основними джерелами утворення CO₂ є процеси спалювання коксу в доменному виробництві, окиснення вуглецю у конвертерах, а також використання енергоресурсів на допоміжних етапах [3, с. 55].

Сучасні тенденції розвитку сталеплавильного виробництва спрямовані на підвищення його ефективності, зниження енерговитрат та мінімізацію негативного впливу на довкілля. Це досягається шляхом впровадження новітніх технологій, удосконалення обладнання, автоматизації процесів та переходу до більш екологічно чистих джерел енергії. Значна увага

приділяється також повторному використанню ресурсів, зокрема металобрухту, що дозволяє зменшити потребу у первинній сировині та скоротити викиди [3, с. 72].

Таким чином, сталеплавильне виробництво є складною та ресурсомісткою галуззю, що відіграє важливу роль у розвитку промисловості, але водночас потребує суттєвої модернізації з метою зниження екологічного навантаження. Подальший розвиток галузі пов'язаний із впровадженням інноваційних технологій, спрямованих на декарбонізацію виробництва та підвищення його сталості.

1.2 Основні джерела викидів вуглецю у металургії

Металургійна промисловість є однією з найбільш енергоємних галузей економіки та водночас одним із найбільших джерел викидів парникових газів, насамперед вуглекислого газу (CO_2). Значні обсяги викидів обумовлені як специфікою технологічних процесів виробництва металу, так і широким використанням викопного палива. У структурі промислових викидів металургія займає провідне місце, що актуалізує необхідність детального аналізу джерел утворення CO_2 з метою їх подальшого скорочення.

У процесі роботи доменної печі кокс виконує подвійну функцію: є як паливом, так і відновником. При його згорянні та взаємодії з киснем утворюється значна кількість вуглекислого газу. Крім того, внаслідок реакцій відновлення оксидів заліза утворюється монооксид вуглецю (CO), який у подальшому окиснюється до CO_2 [4].

Другим важливим джерелом викидів є сталеплавильні процеси, зокрема киснево-конвертерне виробництво. У конвертері відбувається окиснення надлишкового вуглецю, що міститься в чавуні, шляхом продування розплаву киснем. У результаті утворюється значна кількість газоподібних продуктів, серед яких домінує CO , який після виходу з агрегату частково догорає до CO_2 .

Важливим джерелом вуглецевих викидів є також процес підготовки сировини, зокрема агломерація та виробництво окатків. Під час агломерації залізорудної сировини використовуються тверді види палива, які згоряють у процесі спікання, що супроводжується виділенням CO₂. Аналогічно, при випаленні окатків у печах відбувається спалювання палива, що також спричиняє викиди парникових газів.

Суттєву частку викидів формують допоміжні енергетичні процеси, пов'язані із забезпеченням функціонування металургійного підприємства. До них належать виробництво та споживання електроенергії, робота нагрівальних печей, транспортні операції, а також системи газоочищення. Якщо електроенергія виробляється з використанням викопного палива, це опосередковано збільшує загальний вуглецевий слід виробництва сталі.

У електросталеплавильному виробництві основним джерелом викидів CO₂ є не сам процес плавлення, а виробництво електроенергії, яка використовується в електродугових печах. За умови використання «зеленої» електроенергії (з відновлюваних джерел) рівень викидів може бути суттєво знижений. Проте в умовах традиційної енергетики ця перевага частково нівелюється.

Додатковим фактором утворення вуглецевих викидів є використання природного газу та інших вуглеводневих ресурсів у технологічних процесах, зокрема при нагріванні металу, сушінні сировини та в інших допоміжних операціях. Згоряння цих ресурсів також супроводжується виділенням CO₂, хоча і в менших обсягах порівняно з коксом.

Важливо зазначити, що значна частина викидів у металургії має технологічний характер, тобто є невід'ємною складовою хімічних реакцій, які забезпечують отримання металу. Це ускладнює процес їх скорочення, оскільки потребує не лише підвищення енергоефективності, але й принципової зміни технологічних підходів [4, с. 63].

Аналіз основних джерел викидів вуглецю свідчить про те, що найбільший вплив на екологічні показники мають конвертерні процеси та

операції підготовки сировини. Саме ці напрямки є пріоритетними для впровадження заходів щодо декарбонізації. Перехід до альтернативних технологій, таких як пряме відновлення заліза з використанням водню, електросталеплавильне виробництво, а також впровадження систем уловлювання та утилізації CO₂, дозволяє суттєво знизити рівень викидів [4, с. 138].

Таким чином, проблема викидів вуглецю у металургії має комплексний характер і пов'язана як з основними технологічними процесами, так і з енергетичним забезпеченням виробництва. Її вирішення потребує системного підходу, що включає модернізацію технологій, підвищення енергоефективності та впровадження інноваційних екологічних рішень.

1.3 Технологічні процеси виробництва сталі (мартенівський, конвертерний, електропічний)

Виробництво сталі є складним багатостадійним процесом, що базується на перетворенні залізорудної сировини або вторинних металевих ресурсів у метал із заданими хімічними та фізико-механічними властивостями. У сучасній металургії сформувалися три основні технологічні напрямки виробництва сталі: мартенівський, електросталеплавильний та комбіновані схеми, що поєднують різні джерела сировини та енергії. Кожен із цих процесів має свої технологічні особливості, рівень енергоефективності та екологічний вплив.

Мартенівський процес

Мартенівський процес — це історично важливий, але на сьогодні вже застарілий метод виплавки сталі. Суть технології полягає в переробці рідкого чавуну та твердого металобрухту на черені полум'яної регенеративної печі. Необхідне тепло для плавлення металу отримують за рахунок спалювання природного газу або мазуту.

Протягом довгого часу мартени були основним способом отримання сталі, оскільки дозволяли переробляти велику кількість брухту та отримувати

метал високої якості. Проте цей процес має низку критичних недоліків. По-перше, це дуже низька продуктивність: одна плавка в мартенівській печі може тривати від 5 до 10 годин (для порівняння, у кисневому конвертері — 30–50 хвилин). По-друге, процес потребує величезних витрат палива [1, с. 208].

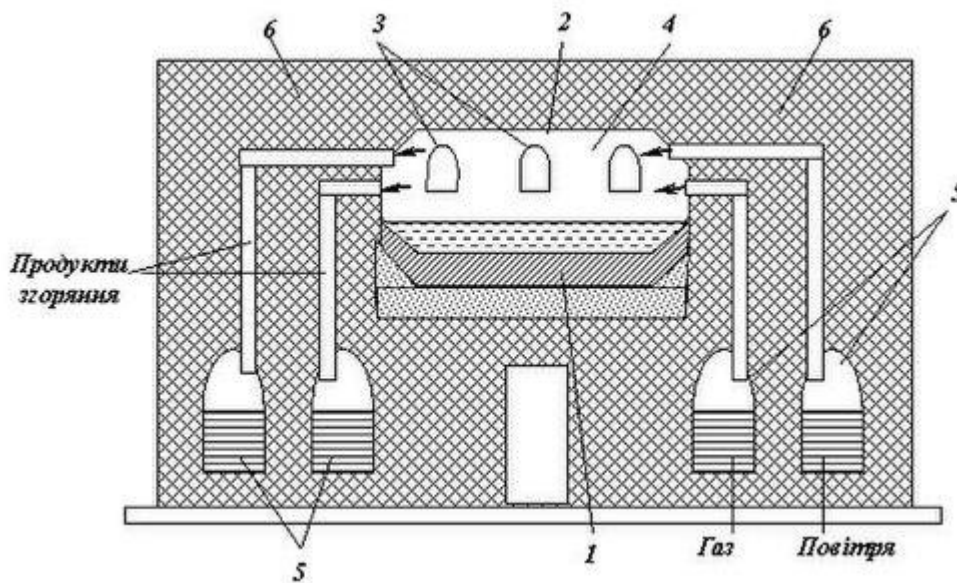


Рис. 1.1- Схема мартенівської печі.

1 - під, 2- склепіння, 3 завантажувальні вікна, 4- робочий простір; 5 - регенератори; 6-головки.

Найголовнішою причиною відмови від мартенівського виробництва стала його екологічна неефективність. Спалювання великої кількості вуглеводневого палива супроводжується колосальними викидами вуглекислого газу (CO_2) та інших шкідливих речовин. Саме тому в усьому світі мартенівські печі масово виводяться з експлуатації.

Яскравим прикладом модернізації є підприємство «АрселорМіттал Кривий Ріг», яке у 2020 році остаточно зупинило роботу свого мартенівського цеху. Цей крок став одним із найважливіших етапів на шляху підприємства до зниження вуглецевого сліду та переходу на більш сучасні конвертерні технології.

Конвертерний процес

Конвертерний процес є основним методом переробки чавуну в сталь і займає провідне місце у світовому виробництві. Найбільш поширеним є киснево-конвертерний спосіб, при якому рідкий чавун продувається чистим киснем у спеціальному агрегаті – конвертері. Кисневий конвертор наведено на рис. 1.2.

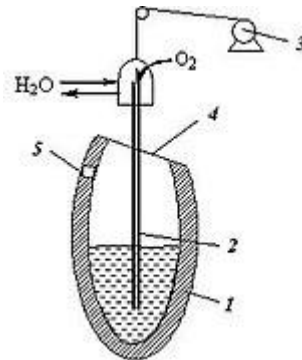


Рис 1.2 – Схема кисневого конвертора

1 – конвертор; 2 – фурма; 3 – лебідка, 4 – горловина, 5 – лютка.

У процесі продування киснем відбувається інтенсивне окиснення вуглецю, кремнію, марганцю та інших домішок, що містяться у чавуні. У результаті утворюються газоподібні продукти (переважно CO і CO₂) та шлак, який акумулює небажані елементи. Процес відзначається високою швидкістю – тривалість плавки становить у середньому 30–50 хвилин.

Основними перевагами конвертерного процесу є висока продуктивність, відносно низька собівартість продукції та можливість отримання сталі з різними властивостями. Однак цей процес також супроводжується значними викидами вуглецевих газів, що пов'язані з окисненням вуглецю та використанням енергетичних ресурсів [1, с. 288].

Важливою складовою сучасного конвертерного виробництва є використання вторинної сировини – металобрухту, що дозволяє зменшити витрати чавуну та частково скоротити викиди CO₂. Крім того, впроваджуються

системи уловлювання конвертерного газу, що дає можливість його подальшого використання як енергоресурсу.

Електросталеплавильний процес

Електросталеплавильне виробництво базується на використанні електричної енергії для плавлення металу, переважно металобрухту або прямовідновленого заліза. Основним агрегатом у цьому процесі є електродугова піч, у якій теплова енергія генерується електричною дугою між графітовими електродами та металом. Схему електродугової печі наведено на рис. 1.3.

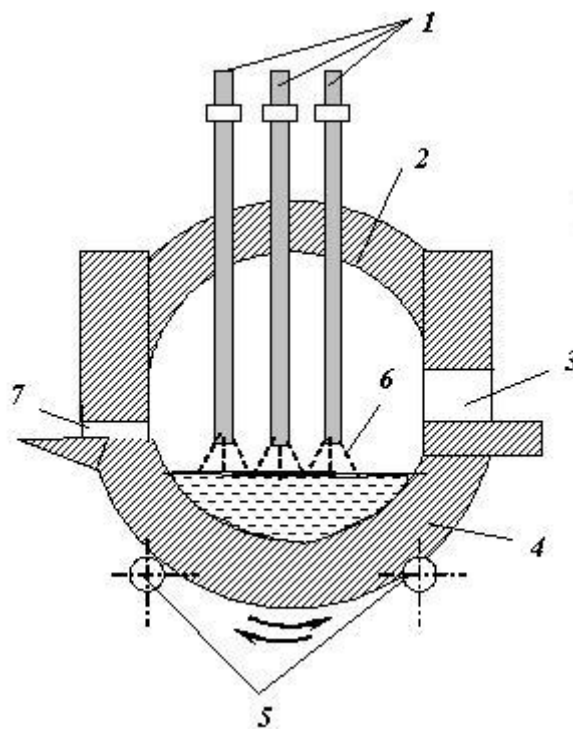


Рис. 1.3 – Схема електродугової печі

1- електроди, 2 – склепіння, 3 – завантажувальне вікно, 4 – корпус; 5 – механізм нахилу печі, 6- електродуга; 7 – льотка.

Процес плавлення в електродуговій печі дозволяє гнучко регулювати хімічний склад сталі та отримувати продукцію високої якості. Після основного плавлення проводиться позапічна обробка, яка включає рафінування, легування та доведення металу до необхідних параметрів.

Основною перевагою електросталеплавильного процесу є його відносно низький рівень прямих викидів CO₂, оскільки у ньому не використовується кокс як відновник.

Разом з тим, екологічна ефективність цього процесу значною мірою залежить від джерела електроенергії [1, с. 341].

Порівняльна характеристика процесів

Аналіз трьох основних технологічних процесів виробництва сталі свідчить про їх істотні відмінності за рівнем енерговитрат, продуктивності та екологічного впливу. Узагальнене порівняння цих технологій наведено у таблиці 1.1.

Електросталеплавильний процес є більш гнучким і екологічно орієнтованим, однак його масштабування обмежується ресурсною базою та енергетичними факторами.

У сучасних умовах спостерігається тенденція до поступового переходу від доменно-конвертерної схеми до електросталеплавильних та альтернативних технологій, що дозволяють знизити вуглецевий слід виробництва. Водночас повна відмова від традиційних процесів наразі є складною через їхню економічну ефективність і значну виробничу інфраструктуру.

Таким чином, кожен із розглянутих технологічних процесів має свої переваги та недоліки, а їх подальший розвиток пов'язаний із пошуком оптимального балансу між продуктивністю, економічною доцільністю та екологічною безпекою. Саме це визначає напрямки модернізації металургійного виробництва у контексті зменшення викидів вуглецю.

Таблиця 1.1 — Порівняльна характеристика основних технологічних процесів виробництва сталі

Характеристика	Мартенівський процес	Конвертерний процес	Електросталеплавильний процес
Суть процесу	Окиснювальний перепплав чавуну та металобрухту на черені регенеративної печі	Переробка рідкого чавуну в сталь шляхом продування киснем	Плавлення металу за допомогою електричної дуги
Основний агрегат	Мартенівська піч	Кисневий конвертер	Електродугова піч
Основна сировина	Рідкий або твердий чавун, велика частка металобрухту	Рідкий чавун, частково металобрухт	Металобрухт, прямовідновлене залізо (DRI)
Джерело енергії / Відновник	Спалювання вуглеводневого палива (природний газ, мазут)	Екзотермічні реакції окиснення домішок чавуну	Електрична енергія
Переваги	Можливість переробки великих обсягів брухту будь-якої якості; отримання якісного металу	Висока швидкість плавки (30–50 хв); низька собівартість; велика продуктивність	Гнучке регулювання хімічного складу; найвища якість сталі; максимальне використання вторсировини
Недоліки та екологічний вплив	Низька швидкість плавки (5–10 год); величезні витрати палива; колосальні викиди CO ₂ та пилю	Значні викиди вуглецевих газів під час продування	Обмеженість ресурсною базою (брухт); наявність непрямих викидів CO ₂ через електроенергію

1.4 Світові тенденції декарбонізації металургії

У сучасних умовах глобальних кліматичних змін питання зменшення викидів парникових газів набуває стратегічного значення для всіх галузей промисловості, зокрема для металургії. Світове співтовариство дедалі активніше впроваджує політику декарбонізації, спрямовану на досягнення кліматичної нейтральності. Металургійна галузь, як один із найбільших джерел викидів CO₂, опинилася у центрі цих трансформацій, що зумовлює необхідність глибокої модернізації технологічних процесів.

Однією з ключових тенденцій є поступовий перехід від традиційної доменно-конвертерної схеми виробництва сталі до альтернативних технологій із низьким рівнем викидів вуглецю. Зокрема, значну увагу приділяють технології прямого відновлення заліза (DRI), яка дозволяє замінити кокс природним газом або воднем. Особливо перспективним є використання «зеленого» водню, отриманого за допомогою відновлюваних джерел енергії. Такий підхід дозволяє практично повністю виключити викиди CO₂ на стадії відновлення заліза, оскільки побічним продуктом реакції є водяна пара.

Іншою важливою тенденцією є активне впровадження електросталеплавильних технологій. Електродугові печі, що працюють на металобрухті або прямовідновленому залізі, забезпечують значно нижчий рівень викидів порівняно з традиційними методами, особливо за умови використання електроенергії з відновлюваних джерел. У багатьох країнах спостерігається збільшення частки електросталеплавильного виробництва, що відповідає загальній стратегії декарбонізації промисловості.

Суттєвим напрямом розвитку є впровадження технологій уловлювання, зберігання та утилізації вуглекислого газу (CCS та CCU). Ці технології передбачають вилучення CO₂ з газових потоків металургійних агрегатів з подальшим його захороненням або використанням у промислових процесах. Хоча такі рішення потребують значних інвестицій і складної інфраструктури, вони розглядаються як ефективний інструмент зниження викидів у

короткостроковій перспективі, особливо для підприємств, які не можуть швидко перейти на нові технології [5, с. 55].

Окрему увагу приділяють підвищенню енергоефективності виробництва. Це включає модернізацію обладнання, оптимізацію технологічних режимів, впровадження систем автоматизації та цифровізації виробничих процесів. Використання сучасних інформаційних технологій дозволяє більш точно контролювати параметри виробництва, знижувати втрати енергії та мінімізувати утворення викидів.

Важливим елементом декарбонізації є також розвиток циркулярної економіки, що передбачає максимальне використання вторинних ресурсів, зокрема металобрухту. Переробка брухту потребує значно менших енергетичних витрат порівняно з виробництвом сталі з первинної сировини, що сприяє зменшенню викидів CO₂. У зв'язку з цим у багатьох країнах стимулюється розвиток систем збору та переробки металевих відходів.

На глобальному рівні декарбонізація металургії підтримується державними програмами, міжнародними угодами та екологічними стандартами. Встановлення обмежень на викиди, запровадження вуглецевих податків та систем торгівлі квотами на викиди стимулюють підприємства до впровадження екологічно чистих технологій. Крім того, зростає роль інвестицій у «зелені» проекти та розвиток інновацій у галузі металургії.

Разом з тим, процес декарбонізації стикається з рядом викликів, серед яких високі капітальні витрати на модернізацію виробництва, необхідність розвитку нової інфраструктури, а також обмеженість доступу до дешевих відновлюваних джерел енергії. Для країн із традиційно розвиненою металургією, зокрема України, ці виклики є особливо актуальними, оскільки потребують комплексного підходу до трансформації галузі [5, с. 64].

Таким чином, світові тенденції декарбонізації металургії свідчать про поступовий перехід до більш екологічно чистих та енергоефективних технологій. Основними напрямками цього процесу є використання альтернативних відновників, розвиток електросталеплавильного виробництва,

впровадження технологій уловлювання CO₂, підвищення енергоефективності та розширення використання вторинних ресурсів. Реалізація цих заходів є необхідною умовою сталого розвитку металургійної галузі та зниження її впливу на довкілля.

1.5 Характеристика підприємства АрселорМіттал Кривий Ріг

Підприємство АрселорМіттал Кривий Ріг є одним із найбільших металургійних комбінатів України та повного металургійного циклу, що займає провідні позиції у вітчизняній та світовій металургії. Воно входить до складу міжнародної корпорації ArcelorMittal — найбільшого виробника сталі у світі, що визначає високий рівень технологічного розвитку, управління та інтеграції у глобальні виробничі ланцюги [5, с. 5]

Підприємство розташоване у місті Кривий Ріг — одному з найбільших промислових центрів України, який має потужну сировинну базу залізних руд. Вигідне географічне положення, наявність розвиненої транспортної інфраструктури та доступ до ресурсів сприяють ефективному функціонуванню комбінату.

АрселорМіттал Кривий Ріг є підприємством повного металургійного циклу, що включає всі основні стадії виробництва сталі: видобуток і збагачення руди, виробництво агломерату, виплавку чавуну у доменних печах, виробництво сталі у конвертерах, а також прокатне виробництво. Така структура дозволяє забезпечити високий рівень автономності та контролю якості на всіх етапах виробничого процесу.

Основною продукцією підприємства є чавун, сталь та широкий асортимент прокатної продукції, включаючи арматуру, катанку та інші види довгого прокату. Продукція комбінату використовується у будівництві, машинобудуванні, транспортній галузі та експортується до багатьох країн світу, що забезпечує значну частку валютних надходжень до економіки України.

Технологічна база підприємства сформована переважно на основі класичної доменно-конвертерної схеми виробництва сталі. У доменному виробництві використовуються великі доменні печі, які забезпечують виплавку чавуну з використанням коксу як основного відновника. Подальша переробка чавуну здійснюється у киснево-конвертерному цеху, де відбувається окиснення домішок і отримання сталі необхідного складу [5]

Водночас підприємство поступово впроваджує сучасні технологічні рішення, спрямовані на підвищення ефективності виробництва та зниження негативного впливу на довкілля. Зокрема, реалізуються програми модернізації обладнання, реконструкції доменних печей, впровадження систем очищення газів та пиловловлювання. Значна увага приділяється зменшенню енерговитрат і підвищенню рівня автоматизації виробничих процесів.

Екологічний аспект діяльності підприємства є одним із найбільш актуальних, оскільки виробництво сталі супроводжується значними викидами забруднюючих речовин, включаючи вуглекислий газ, пил, оксиди сірки та азоту.

Основними джерелами викидів на підприємстві є мартенівське виробництво, агломераційні фабрики та сталеплавильні агрегати. У зв'язку з цим підприємство впроваджує заходи з екологічної модернізації, спрямовані на зниження викидів та покращення екологічної ситуації в регіоні.

Важливою складовою розвитку АрселорМіттал Кривий Ріг є інтеграція у глобальні екологічні ініціативи, що реалізуються компанією ArcelorMittal. Це передбачає поступовий перехід до більш екологічно чистих технологій, зокрема зменшення вуглецевого сліду виробництва, підвищення енергоефективності та впровадження інноваційних рішень у сфері декарбонізації.

Разом з тим, підприємство стикається з низкою викликів, серед яких зношеність частини обладнання, висока енергоємність виробництва та необхідність значних інвестицій у модернізацію. Крім того, актуальним є

питання адаптації до сучасних екологічних стандартів та вимог міжнародного ринку щодо зниження викидів парникових газів [5, с. 70]

Таким чином, АрселорМіттал Кривий Ріг є потужним металургійним підприємством із повним виробничим циклом, яке відіграє важливу роль в економіці України. Водночас його діяльність пов'язана з істотним екологічним навантаженням, що обумовлює необхідність подальшої модернізації та впровадження технологій, спрямованих на зменшення викидів вуглецю та підвищення сталості виробництва.

1.6 Аналіз існуючих технологій очищення та зменшення викидів

Сучасне металургійне виробництво характеризується значним рівнем техногенного навантаження на навколишнє середовище, що обумовлює необхідність впровадження ефективних технологій очищення та зменшення викидів забруднюючих речовин. Основними видами викидів у металургії є пил, оксиди сірки (SO_2), оксиди азоту (NO_x), а також вуглекислий газ (CO_2), який є головним парниковим газом. З огляду на це, сучасні підходи до екологізації виробництва передбачають як очищення газових викидів, так і безпосереднє зниження їх утворення на стадії технологічного процесу.

Технології очищення викидів у металургії можна умовно поділити на механічні, фізико-хімічні та комбіновані. До найбільш поширених належать пилогазоочисні установки, які застосовуються для уловлювання твердих частинок, що утворюються під час агломерації, доменного та сталеплавильного виробництва. Серед них широко використовуються циклонні апарати, рукавні фільтри та електрофільтри. Електрофільтри забезпечують високий ступінь очищення газів за рахунок осадження заряджених частинок на електродах, що дозволяє ефективно зменшувати викиди пилу [3, с. 28].

Рукавні фільтри, у свою чергу, характеризуються високою ефективністю очищення та можливістю затримання дрібнодисперсних частинок. Вони широко застосовуються у сталеплавильному виробництві, зокрема при очищенні газів електродугових печей та конвертерів. Однак їх використання потребує регулярного обслуговування та заміни фільтруючих елементів.

Для очищення газів від газоподібних домішок, таких як оксиди сірки та азоту, застосовуються фізико-хімічні методи, зокрема абсорбція, адсорбція та каталітичне очищення. Системи десульфуризації дозволяють зменшити вміст SO₂ шляхом його зв'язування з реагентами, тоді як каталітичні нейтралізатори сприяють зниженню викидів NO_x. Проте ці технології мають обмежений вплив на викиди CO₂, оскільки останній є стабільною сполукою, що не піддається простому хімічному зв'язуванню в умовах традиційного виробництва.

У зв'язку з цим особливу увагу приділяють технологіям уловлювання та зберігання вуглекислого газу (CCS — Carbon Capture and Storage) та його утилізації (CCU — Carbon Capture and Utilization). Ці технології передбачають вилучення CO₂ з газових потоків, його стиснення, транспортування та подальше зберігання у геологічних формаціях або використання у промислових процесах. Незважаючи на значний потенціал, широке впровадження таких технологій стримується високими капітальними витратами та складністю реалізації.

Паралельно з технологіями очищення активно розвиваються підходи, спрямовані на зменшення утворення викидів безпосередньо у процесі виробництва. До таких належать оптимізація технологічних режимів, підвищення якості сировини, використання альтернативних видів палива та впровадження енергоефективних рішень. Наприклад, часткова заміна коксу природним газом або пиловугільним паливом у доменному процесі дозволяє знизити викиди CO₂.

Суттєвим напрямом є також використання вторинних енергоресурсів, зокрема доменного та конвертерного газу, які можуть бути повторно

використані як паливо. Це дозволяє зменшити споживання первинних енергоресурсів і, відповідно, скоротити загальні викиди [3, с. 7].

Окрему роль відіграє цифровізація та автоматизація виробництва, що забезпечує більш точний контроль технологічних параметрів і дозволяє мінімізувати втрати енергії та сировини. Використання сучасних систем моніторингу викидів дає можливість оперативно реагувати на відхилення та підвищувати ефективність природоохоронних заходів.

Аналіз існуючих технологій свідчить про те, що традиційні методи очищення є ефективними для зниження викидів пилю та токсичних газів, проте мають обмежені можливості щодо скорочення викидів вуглекислого газу. У зв'язку з цим основний акцент у сучасній металургії зміщується у бік технологій, спрямованих на запобігання утворенню CO₂, а не лише його уловлювання.

Таким чином, існуючі технології очищення та зменшення викидів у металургії формують комплексний підхід до вирішення екологічних проблем, однак потребують подальшого вдосконалення. Це обумовлює необхідність розробки та впровадження інноваційних рішень, які забезпечать суттєве зниження викидів вуглецю та відповідатимуть сучасним вимогам сталого розвитку. Саме ці аспекти будуть розглянуті у наступному розділі роботи.

РОЗДІЛ 2. ІННОВАЦІЙНА ЧАСТИНА. ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ ВУГЛЕЦЮ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СТАЛІ

2.1 Обґрунтування вибору напрямку модернізації

Сучасний етап розвитку металургійної галузі характеризується необхідністю одночасного забезпечення високої продуктивності виробництва та зниження його екологічного впливу. Як було встановлено в аналітичній частині роботи, основними джерелами викидів вуглекислого газу у виробництві сталі є киснево-конвертерне виробництво та енергетичне забезпечення технологічних операцій. У зв'язку з цим вибір напрямку модернізації має базуватися на комплексному аналізі технологічних, екологічних та економічних факторів [7, с. 208].

Першочерговим критерієм вибору є потенціал зниження викидів CO₂. Найбільш значний ефект може бути досягнутий за рахунок модернізації доменного виробництва, оскільки саме цей етап формує основну частку вуглецевих викидів. Однак повна відмова від доменного процесу на сучасному етапі розвитку підприємств, зокрема таких як АрселорМіттал Кривий Ріг, є економічно та технологічно складною через значні капітальні витрати та необхідність кардинальної перебудови виробничої інфраструктури.

З урахуванням цього доцільним є поетапний підхід до модернізації, який передбачає поєднання вдосконалення існуючих технологій із поступовим впровадженням інноваційних рішень [7, с. 233].

Одним із найбільш перспективних напрямів є зниження споживання коксу у доменному процесі шляхом часткової заміни його альтернативними видами палива, такими як природний газ або пиловугільне паливо. Це дозволяє зменшити викиди CO₂ без суттєвого втручання у конструкцію основного обладнання.

Іншим важливим напрямом модернізації є підвищення ефективності киснево-конвертерного виробництва. Зокрема, оптимізація режимів продування, використання вторинної сировини (металобрухту) та впровадження систем уловлювання конвертерного газу дозволяють зменшити викиди та підвищити енергоефективність процесу. Рациональне використання конвертерного газу як вторинного енергоресурсу сприяє зниженню загального споживання палива.

Значний потенціал декарбонізації пов'язаний із розвитком електросталеплавильного виробництва. Перехід до використання електродугових печей дозволяє суттєво зменшити прямі викиди CO₂, особливо за умови використання електроенергії з низьким вуглецевим слідом. Проте для підприємств повного металургійного циклу цей напрям потребує поступового впровадження через обмеження, пов'язані з доступністю металобрухту та необхідністю модернізації енергетичної інфраструктури.

Окрему увагу слід приділити впровадженню технологій уловлювання та утилізації вуглекислого газу. Незважаючи на високі витрати, ці технології можуть бути ефективним доповненням до існуючих виробничих процесів, особливо на тих ділянках, де зменшення утворення CO₂ є технологічно обмеженим. Використання таких рішень дозволяє досягти швидкого екологічного ефекту без повної заміни виробничих потужностей.

Вибір конкретного напрямку модернізації також визначається економічними факторами. До них належать вартість впровадження технологій, термін їх окупності, вплив на собівартість продукції та конкурентоспроможність підприємства [8, с. 28].

У сучасних умовах важливу роль відіграють також екологічні платежі, вуглецеві податки та вимоги міжнародних ринків до «вуглецевого сліду» продукції.

З урахуванням зазначених факторів у даній роботі обґрунтовується доцільність комплексної модернізації, що включає:

– оптимізацію доменного процесу з метою зниження споживання коксу;

- підвищення ефективності конвертерного виробництва;
- часткове впровадження електросталеплавильних технологій;
- використання вторинних енергоресурсів;
- впровадження елементів технологій уловлювання CO₂.

Такий підхід дозволяє досягти балансу між екологічною ефективністю та економічною доцільністю, що є ключовою вимогою сучасного промислового розвитку. Він також відповідає світовим тенденціям декарбонізації металургії та враховує специфіку функціонування підприємств повного циклу [8].

Таким чином, обраний напрям модернізації є обґрунтованим з точки зору технологічної реалізованості, економічної ефективності та екологічної доцільності. Його реалізація дозволить суттєво знизити викиди вуглецю при виробництві сталі та створить передумови для подальшого переходу до більш екологічно чистих технологій, що буде детально розглянуто у наступних підрозділах роботи.

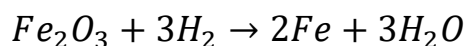
2.2 Використання альтернативних відновників (водень, біопаливо)

Одним із найбільш перспективних напрямів декарбонізації металургійного виробництва є використання альтернативних відновників, які дозволяють зменшити або повністю усунути викиди вуглекислого газу, що утворюється у процесі відновлення заліза. Традиційно у доменному виробництві як відновник застосовується вуглець у складі коксу, що неминуче призводить до утворення CO₂. У зв'язку з цим заміна вуглецевмісних відновників на альтернативні є одним із ключових напрямів модернізації.

Використання водню як відновника

Найбільш перспективним альтернативним відновником є водень, який може використовуватися у процесах прямого відновлення заліза. Принципова відмінність водню від традиційних відновників полягає в тому, що в результаті реакції відновлення оксидів заліза утворюється не вуглекислий газ, а водяна

пара. Це дозволяє практично повністю виключити прямі викиди CO₂ на даній стадії виробництва.



Застосування водню можливе в установках прямого відновлення заліза (DRI), після чого отриманий продукт використовується в електродугових печах для виплавки сталі. Така технологічна схема вже активно розробляється та впроваджується у ряді країн як основа «зеленої металургії».

Основними перевагами використання водню є:

- значне зниження або повна відсутність викидів CO₂ на стадії відновлення;
- можливість інтеграції з відновлюваними джерелами енергії (при виробництві «зеленого» водню);
- підвищення екологічної привабливості продукції.

Разом з тим, існують і суттєві обмеження. Виробництво водню потребує значних енергетичних витрат, особливо у випадку електролізу води. Крім того, необхідна модернізація існуючої інфраструктури, включаючи системи транспортування та зберігання водню. В умовах підприємств повного циклу, таких як АрселорМіттал Кривий Ріг, впровадження водневої технології можливе переважно у довгостроковій перспективі або у вигляді окремих пілотних проєктів [3, с. 88].

Використання біопалива

Іншим напрямом зниження вуглецевих викидів є використання біопалива як часткової заміни традиційних вуглецевмісних матеріалів. До біопалива, що може застосовуватися у металургії, належать деревне вугілля, біококс, біогаз та інші продукти переробки біомаси.

Перевагою біопалива є його відносна вуглецева нейтральність, оскільки вуглець, що виділяється при його використанні, попередньо був поглинутий рослинами у процесі фотосинтезу. Таким чином, загальний баланс викидів CO₂ може бути суттєво знижений. Використання біопалива можливе як у доменному виробництві (часткова заміна коксу), так і в агломераційних процесах.

До основних переваг застосування біопалива належать:

- зменшення викидів парникових газів;
- можливість використання відновлюваних ресурсів;
- відносна простота інтеграції у існуючі технологічні процеси.

Разом з тим, широке використання біопалива обмежується рядом факторів. Серед них — обмеженість ресурсної бази, необхідність забезпечення стабільної якості палива, а також можливий вплив на технологічні параметри процесу. Крім того, логістика постачання біопалива може бути складною, особливо для великих металургійних підприємств.

Порівняльна оцінка та доцільність впровадження

Порівняльний аналіз альтернативних відновників свідчить про те, що використання водню є найбільш ефективним з точки зору досягнення глибокої декарбонізації, проте потребує значних інвестицій і часу для реалізації. Біопаливо, у свою чергу, є більш доступним і може бути впроваджене на існуючих виробничих потужностях без кардинальної перебудови технологічних процесів, але забезпечує лише часткове зниження викидів [4, с. 123].

З урахуванням цього для підприємств із традиційною доменно-конвертерною схемою виробництва доцільним є поєднання обох підходів: короткострокове використання біопалива для поступового зниження викидів та довгострокове впровадження водневих технологій як стратегічного напрямку розвитку.

Таким чином, застосування альтернативних відновників є важливим елементом модернізації металургійного виробництва, що дозволяє суттєво знизити вуглецевий слід.

Вибір конкретного рішення залежить від технічних можливостей підприємства, економічних умов та доступності ресурсів, що має бути враховано при розробці комплексної стратегії декарбонізації.

2.3 Впровадження технологій уловлювання CO₂ (CCS/CCU)

У сучасних умовах декарбонізації металургійного виробництва важливу роль відіграють технології уловлювання та подальшого поводження з вуглекислим газом. Оскільки значна частина викидів CO₂ у металургії має технологічне походження і є невід’ємною складовою хімічних процесів, повне їх усунення лише за рахунок оптимізації виробництва є обмеженим. У зв’язку з цим доцільним є застосування технологій CCS (Carbon Capture and Storage) та CCU (Carbon Capture and Utilization), які дозволяють зменшити обсяг викидів шляхом вилучення CO₂ з газових потоків.

Сутність та принцип дії технологій CCS/CCU [9, с. 214].

Технологія CCS передбачає уловлювання вуглекислого газу з промислових викидів, його стиснення, транспортування та подальше зберігання у геологічних формаціях, таких як виснажені газові родовища або глибокі соляні пласти. Основною метою є ізоляція CO₂ від атмосфери на тривалий період. Схему уловлювання та зберігання вуглецю (CCS) наведено на рис. 2.1.



Рис. 2.1- Схема уловлювання та зберігання вуглецю

Технологія Уловлювання та утилізації вуглецю (CCU) (див. рис. 2.2), на відміну від CCS, передбачає використання уловленого CO₂ як сировини для інших промислових процесів. Наприклад, вуглекислий газ може застосовуватися у виробництві синтетичного палива, хімічної продукції, будівельних матеріалів або для підвищення нафтовіддачі пластів.



Рис. 2.2 Уловлювання та утилізація вуглецю (CCU)

Процес уловлювання CO₂ може здійснюватися кількома методами:

- посткомбуційне уловлювання (після спалювання палива);
- передкомбуційне уловлювання (до процесу спалювання);
- оксипаливне спалювання, при якому використовується кисень замість повітря для отримання концентрованого потоку CO₂ [9, с. 244].

У металургії найбільш доцільним є застосування посткомбуційного уловлювання, оскільки воно може бути інтегроване у вже існуючі технологічні процеси без їх суттєвої перебудови.

Особливості застосування у металургійному виробництві

На металургійних підприємствах основними джерелами викидів CO₂ є доменні печі, конвертери та агломераційні установки. Газові потоки цих агрегатів містять значні концентрації CO₂, що створює передумови для його ефективного уловлювання.

На підприємствах повного циклу, таких як АрселорМіттал Кривий Ріг, впровадження технологій CCS/CCU може бути реалізовано шляхом встановлення установок очищення доменного та конвертерного газу з подальшим виділенням CO₂. Особливо перспективним є використання доменного газу, який має відносно стабільний склад і великий об'єм.

Важливою перевагою є можливість поєднання технологій уловлювання з існуючими системами газоочищення, що дозволяє зменшити витрати на їх впровадження. Крім того, використання уловленого CO₂ у виробництві синтетичних газів або хімічної продукції може частково компенсувати витрати.

Переваги та недоліки технологій [9, с. 273].

Впровадження технологій уловлювання, зберігання та утилізації вуглецю (CCS/CCU) має низку суттєвих переваг, але водночас супроводжується певними технологічними та економічними обмеженнями. Основні плюси та мінуси цих систем узагальнено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Переваги та недоліки впровадження технологій CCS/CCU

Переваги	Недоліки
Значне зниження викидів CO ₂ (до 80–90 % при ефективній роботі системи)	Високі капітальні та експлуатаційні витрати на впровадження та обслуговування
Можливість інтеграції у вже існуючі виробничі процеси підприємства	Значне енергоспоживання процесу уловлювання та стиснення газу
Швидкий екологічний ефект без необхідності кардинальної зміни технології виробництва	Необхідність створення інфраструктури для транспортування та безпечного зберігання CO ₂
Потенціал повторного використання уловленого CO ₂ у промисловості (технологія CCU)	Обмеженість сфер ефективного використання та ринків збуту для уловленого вуглекислого газу

Обґрунтування доцільності впровадження

З урахуванням особливостей металургійного виробництва впровадження технологій CCS/CCU є доцільним як додатковий інструмент

зниження викидів, особливо у коротко- та середньостроковій перспективі. На відміну від повної заміни технологічних процесів (наприклад, переходу на водень), ці рішення можуть бути реалізовані поетапно та з меншими ризиками для стабільності виробництва.

Для підприємств типу АрселорМіттал Кривий Ріг оптимальним є впровадження локальних систем уловлювання CO₂ на найбільш потужних джерелах викидів із подальшим використанням уловленого газу як вторинного ресурсу. Такий підхід дозволяє досягти помітного екологічного ефекту при збереженні існуючої виробничої структури.

Таким чином, технології уловлювання та утилізації вуглекислого газу є важливим елементом сучасної стратегії декарбонізації металургії. Вони не замінюють, а доповнюють інші заходи, такі як використання альтернативних відновників та підвищення енергоефективності. Комплексне застосування цих підходів дозволяє забезпечити значне зниження викидів CO₂ та підвищити екологічну стійкість виробництва.

У подальших підрозділах буде розглянуто інші напрями модернізації технологічних процесів, спрямовані на підвищення ефективності та зменшення екологічного навантаження.

2.4 Відмова від мартенівського виробництва як етап декарбонізації

Мартенівське виробництво довгий час було основним способом виплавки сталі, але сьогодні воно визнане найбільш енергоємним і шкідливим для екології. Тому в сучасних умовах мова йде не про його оптимізацію, а про повне виведення з експлуатації. Для підприємств повного циклу, таких як «АрселорМіттал Кривий Ріг», закриття мартенівського цеху стало одним із найголовніших кроків для зниження викидів CO₂.

Основні причини відмови від мартенівського процесу

Головна екологічна проблема мартена — це необхідність спалювати величезну кількість природного газу для нагріву печі. До основних причин масового закриття таких агрегатів належать: – колосальні викиди вуглекислого

газу (CO₂) та пилу; – величезні витрати палива та дуже низька енергоефективність; – занадто довгий час плавки (від 5 до 10 годин); – неможливість модернізувати піч так, щоб вона відповідала сучасним екологічним нормам.

Екологічний ефект від закриття

Зупинка мартенівських печей дає миттєвий і дуже помітний екологічний ефект. Оскільки для розігріву металу більше не спалюється вуглеводневе паливо, прямі викиди CO₂ на цій ділянці падають до нуля. Замість мартена сталь виплавляють у кисневих конвертерах або електродугових печах, які працюють значно швидше і з набагато меншим вуглецевим слідом.

Досвід «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Яскравим прикладом такого підходу є підприємство «АрселорМіттал Кривий Ріг», де останню мартенівську піч назавжди зупинили навесні 2020 року. Це дозволило комбінату кардинально зменшити вуглецевий слід і знизити загальне забруднення повітря. Відмова від цієї застарілої технології була критично важливою умовою для того, щоб завод міг продовжувати роботу в умовах посилення міжнародних екологічних стандартів [10 с. 120].

Обґрунтування ефективності такого рішення

Повна заміна мартенівського процесу на більш сучасні сталеплавильні технології дає змогу: – повністю ліквідувати обсяги викидів парникових газів, що генерувалися мартеном; – знизити загальну собівартість сталі за рахунок економії дорогого природного газу; – значно підвищити продуктивність сталеплавильного переділу.

Таким чином, виведення з експлуатації мартенівських печей – це найбільш ефективний інструмент декарбонізації на даному етапі. У подальших підрозділах буде розглянуто, як саме можна модернізувати та оптимізувати роботу вже сучасних агрегатів, які прийшли на зміну мартенам.

2.5 Модернізація конвертерного процесу

Киснево-конвертерне виробництво є основним способом отримання сталі у світі та займає провідне місце у структурі металургійного виробництва підприємств повного циклу. Незважаючи на високу продуктивність і економічну ефективність, конвертерний процес супроводжується значними викидами газів, зокрема оксиду вуглецю (CO) та вуглекислого газу (CO₂), що утворюються внаслідок окиснення вуглецю та інших домішок у чавуні. У зв'язку з цим модернізація конвертерного процесу є важливим напрямом зниження вуглецевого сліду виробництва сталі [15, с. 111].

Для підприємств повного циклу, таких як АрселорМіттал Кривий Ріг, удосконалення конвертерного виробництва дозволяє досягти значного екологічного ефекту без необхідності кардинальної перебудови всієї технологічної схеми.

Основні напрями модернізації

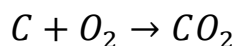
Модернізація конвертерного процесу передбачає комплекс заходів, спрямованих на підвищення ефективності використання сировини та енергії, а також зменшення утворення і викидів газів (див. табл. 2.2).

До ключових напрямів належать

- оптимізація режимів продування киснем;
- збільшення частки металобрухту у шихті;
- впровадження систем уловлювання та утилізації конвертерного газу;
- підвищення рівня автоматизації та цифрового контролю процесу;
- удосконалення конструкції конвертерів та допоміжного обладнання.

Оптимізація процесу продування

Процес продування рідкого чавуну киснем є ключовою стадією конвертерного виробництва, під час якої відбувається окиснення вуглецю:



Однак у реальних умовах значна частина вуглецю окиснюється до CO, який при виході з конвертера догорає до CO₂.

Таблиця 2.2 — Основні напрями та ефекти модернізації конвертерного процесу

Напрямок модернізації	Зміст заходу	Очікуваний екологічний та технологічний ефект
Оптимізація процесу продування	Регулювання інтенсивності подачі кисню, положення фурми та тривалості плавки	Зменшення утворення надлишкового газу, зниження втрат тепла, скорочення тривалості плавки
Збільшення частки металобрухту	Заміщення частини рідкого чавуну вторинною сировиною (брухтом) у шихті	Зниження вуглецевого навантаження, скорочення витрат енергії та первинної сировини (потребує контролю теплового балансу)
Уловлювання та використання газу	Очищення та збір конвертерного газу (з високим вмістом CO) для використання як вторинного палива	Зменшення викидів парникових газів, зниження споживання природного газу, підвищення енергоефективності
Автоматизація та цифровізація	Застосування датчиків, математичних моделей та систем керування у реальному часі	Мінімізація перевитрат кисню та енергії, зменшення побічних продуктів, стабільна якість сталі

Оптимізація параметрів продування (інтенсивності подачі кисню, положення фурми, тривалості процесу) дозволяє зменшити утворення надлишкового газу та підвищити ефективність використання кисню.

Раціональне керування процесом сприяє зниженню втрат тепла, скороченню тривалості плавки та зменшенню викидів, що є важливим фактором підвищення екологічної ефективності виробництва [15, с. 108].

Збільшення частки металобрухту

Одним із ефективних способів зниження викидів CO₂ є збільшення частки металобрухту у шихті конвертера. Використання вторинної сировини

дозволяє зменшити потребу у рідкому чавуні, виробництво якого супроводжується значними викидами.

Перевагами цього підходу є:

- зниження загального вуглецевого навантаження;
- скорочення витрат енергії;
- зменшення обсягів використання первинної сировини.

Разом з тим, можливості збільшення частки брухту обмежуються тепловим балансом процесу та вимогами до якості сталі, що потребує ретельного техніко-економічного обґрунтування.

Уловлювання та використання конвертерного газу

Конвертерний газ, що утворюється під час продування, містить значну кількість CO та має високий енергетичний потенціал. У традиційних схемах значна частина цього газу просто спалюється, що призводить до утворення CO₂ без отримання корисного ефекту.

Впровадження систем уловлювання та очищення конвертерного газу дозволяє використовувати його як вторинне паливо для інших технологічних процесів. Це сприяє:

- зменшенню викидів парникових газів;
- зниженню споживання природного газу та інших видів палива;
- підвищенню загальної енергоефективності підприємства [16, с. 73].

Автоматизація та цифровізація процесу

Сучасні системи автоматичного керування дозволяють значно підвищити точність контролю параметрів конвертерного процесу.

Використання датчиків, математичних моделей та систем прогнозування забезпечує оптимізацію режимів роботи у реальному часі.

Це дозволяє:

- мінімізувати перевитрати кисню та енергії;
- зменшити утворення побічних продуктів;
- підвищити стабільність якості сталі;
- скоротити викиди забруднюючих речовин.

Обґрунтування ефективності модернізації

Комплексна модернізація конвертерного процесу забезпечує зниження викидів CO₂ за рахунок:

- підвищення ефективності окислювальних реакцій;
- зменшення споживання первинної сировини;
- використання вторинних енергоресурсів;
- оптимізації технологічних параметрів.

Важливою перевагою є можливість поетапного впровадження заходів без зупинки виробництва, що робить їх економічно доцільними та практично реалізованими [16, с. 83].

Для підприємств, таких як АрселорМіттал Кривий Ріг, модернізація конвертерного процесу є ефективним інструментом підвищення конкурентоспроможності та відповідності сучасним екологічним стандартам.

Таким чином, модернізація киснево-конвертерного процесу є важливим напрямом зниження викидів вуглецю у металургійному виробництві. Реалізація запропонованих заходів дозволяє підвищити енергоефективність, зменшити екологічне навантаження та забезпечити стабільну якість продукції. У поєднанні з іншими заходами декарбонізації це формує комплексний підхід до модернізації металургійного підприємства.

2.6 Використання електродугових печей як екологічної альтернативи

У контексті глобальної декарбонізації металургійного виробництва одним із найбільш ефективних напрямів є перехід до електросталеплавильних технологій, зокрема використання електродугових печей (ЕП). Даний підхід дозволяє суттєво знизити рівень викидів вуглекислого газу порівняно з традиційною доменно-конвертерною схемою виробництва сталі, що робить його важливим елементом стратегії екологічної модернізації підприємств.

Сутність та технологічні особливості процесу

Електродугова піч є агрегатом, у якому плавлення металу здійснюється за рахунок теплової енергії електричної дуги, що виникає між графітовими

електродами та металевою шихтою. Як основна сировина використовується металобрухт або прямовідновлене залізо, що дозволяє значно зменшити потребу у первинній рудній сировині [17, с. 33].

Технологічний процес включає такі основні стадії:

- завантаження шихти;
- плавлення металу під дією електричної дуги;
- окиснення домішок та рафінування;
- позапічна обробка та доведення сталі до необхідного складу.

Завдяки гнучкості управління процесом електродугові печі дозволяють отримувати широкий спектр сталей із заданими властивостями.

Екологічні переваги електродугового виробництва

Основною перевагою використання електродугових печей є значне зниження прямих викидів CO₂. На відміну від доменного процесу, у якому використовується кокс як джерело вуглецю та енергії, в електросталеплавильному виробництві відсутній етап відновлення заліза з руди, що є основним джерелом вуглецевих викидів.

Екологічні переваги включають:

- зменшення викидів CO₂ у 2–4 рази порівняно з традиційними технологіями;
- відсутність необхідності використання коксу;
- зниження рівня викидів пилу та інших забруднюючих речовин;
- можливість використання вторинної сировини.

Особливо важливим є те, що екологічний ефект значною мірою залежить від джерела електроенергії. При використанні електроенергії з відновлюваних джерел викиди CO₂ можуть бути мінімізовані до майже нульового рівня.

Економічні та технологічні аспекти впровадження

Незважаючи на значні екологічні переваги, впровадження електродугових печей потребує врахування ряду економічних та технологічних факторів. До них належать:

- висока вартість електроенергії;

- необхідність модернізації енергетичної інфраструктури;
- залежність від наявності металобрухту або прямовідновленого заліза;
- обмеження щодо масштабів виробництва.

Для підприємств повного циклу, таких як АрселорМіттал Кривий Ріг, повний перехід на електросталеплавильну технологію є складним і потребує значних інвестицій. У зв'язку з цим більш доцільним є поетапне впровадження електродугових печей як доповнення до існуючих виробничих потужностей [5, с. 57]

Порівняльна оцінка з традиційними технологіями

Порівняння електродугового та доменно-конвертерного виробництва свідчить про суттєві відмінності у рівні екологічного впливу. Якщо у традиційній схемі основні викиди формуються на стадії доменного виробництва, то в електросталеплавильному процесі вони переважно пов'язані з генерацією електроенергії.

Таким чином, перехід до електродугових печей дозволяє:

- скоротити прямі викиди CO₂;
- підвищити гнучкість виробництва;
- зменшити залежність від викопного палива.

Водночас для досягнення максимального ефекту необхідно забезпечити використання низьковуглецевих джерел електроенергії.

Обґрунтування доцільності впровадження

З урахуванням сучасних вимог до екологічності виробництва використання електродугових печей є одним із найбільш перспективних напрямів модернізації металургійних підприємств. Для підприємств, що функціонують за традиційною схемою, оптимальним є поєднання електросталеплавильного виробництва з існуючими технологіями [6, с. 675].

Такий підхід дозволяє:

- поступово знижувати викиди CO₂;
- адаптувати виробництво до сучасних екологічних стандартів;

- мінімізувати інвестиційні ризики;
- підвищити конкурентоспроможність продукції на світовому ринку.

Таким чином, використання електродугових печей є ефективною екологічною альтернативою традиційним методам виробництва сталі. Незважаючи на наявні обмеження, дана технологія має значний потенціал для зниження викидів вуглецю та підвищення ефективності виробництва. Її впровадження у поєднанні з іншими заходами декарбонізації дозволяє сформуванню комплексний підхід до модернізації металургійного підприємства.

2.7 Розрахунок зменшення викидів CO₂

Одним із ключових етапів обґрунтування ефективності запропонованих заходів з модернізації металургійного виробництва є кількісна оцінка зниження викидів вуглекислого газу. Проведення відповідних розрахунків дозволяє визначити екологічний ефект від впровадження інноваційних рішень та підтвердити їх доцільність.

Вихідні дані для розрахунку

Для оцінки зменшення викидів CO₂ прийmemo умовні, але наближені до реальних показники роботи підприємства типу АрселорМіттал Кривий Ріг [5, с. 75]:

- річний обсяг виробництва сталі: 6 млн т;
- середні питомі викиди CO₂ при доменно-конвертерному виробництві: 1,8 т CO₂/т сталі;
- частка зниження викидів за рахунок впровадження заходів:
 - оптимізація доменного процесу – 10 %;
 - модернізація конвертерного процесу – 5 %;
 - використання альтернативних відновників – 15 %;
 - впровадження електродугових печей (частково) – 20 % (для 25 % обсягу виробництва).

Розрахунок базового рівня викидів

Загальний обсяг викидів CO₂ до модернізації визначається за формулою:

$$E_0 = Q \cdot e$$

де

E_0 — загальні викиди CO₂, т/рік;

Q — обсяг виробництва сталі, т/рік;

e — питомі викиди CO₂, т/т сталі.

Підставляючи значення:

$$E_0 = 6 \cdot 10^6 \times 1,8 = 10,8 \cdot 10^6 \text{ т CO}_2/\text{рік}.$$

Отже, базовий рівень викидів становить 10,8 млн т CO₂ на рік.

Розрахунок зниження викидів

1. Оптимізація доменного процесу:

$$\Delta E_1 = 0,10 \cdot E_0 = 1,08 \text{ млн т CO}_2/\text{рік}$$

2. Модернізація конвертерного процесу:

$$\Delta E_2 = 0,05 \cdot E_0 = 0,54 \text{ млн т CO}_2/\text{рік}$$

3. Використання альтернативних відновників:

$$\Delta E_3 = 0,15 \cdot E_0 = 1,62 \text{ млн т CO}_2/\text{рік}$$

4. Впровадження електродугових печей:

Оскільки електropечі охоплюють 25 % виробництва:

$$\Delta E_4 = 0,25 \cdot 0,20 \cdot E_0 = 0,54 \text{ млн т CO}_2/\text{рік}$$

Загальний ефект

Сумарне зниження викидів:

$$\Delta E = \Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta E_3 + \Delta E_4$$

$$\Delta E = 1,08 + 0,54 + 1,62 + 0,54 = 3,78 \text{ млн т CO}_2/\text{рік}$$

Новий рівень викидів:

$$E = E_0 - \Delta E = 10,8 - 3,78 = 7,02 \text{ млн т CO}_2/\text{рік}$$

Аналіз отриманих результатів

Отримані результати свідчать про те, що впровадження комплексу заходів дозволяє знизити викиди CO₂ приблизно на:

$$\frac{3,78}{10,8} \cdot 100\% \approx 35\%$$

Таким чином, загальне скорочення становить близько 35 %, що є суттєвим показником для підприємств металургійної галузі.

Розраховані данні заносимо в табл. 2.3

Найбільший внесок у зниження викидів забезпечують:

- використання альтернативних відновників;
- оптимізація доменного процесу.

Менший, але стабільний ефект дають:

- модернізація конвертерного процесу;
- часткове впровадження електродугових печей.

Обґрунтування достовірності розрахунків

Представлений розрахунок базується на узагальнених галузевих показниках та середніх значеннях ефективності технологій.

Незважаючи на умовність вихідних даних, результати відображають реалістичний порядок величин та можуть бути використані для попередньої оцінки ефективності заходів [9, с. 223].

Для більш точного аналізу необхідно враховувати специфіку конкретного підприємства, технологічні параметри та реальні показники виробництва.

Таким чином, проведений розрахунок підтверджує високу ефективність запропонованих заходів щодо зниження викидів CO₂. Комплексна модернізація металургійного виробництва дозволяє досягти значного екологічного ефекту без повної заміни технологічної бази [10, с. 33].

Таблиця 2.3 - Оцінка ефективності заходів зі зниження викидів CO₂

Напрямок модернізації	Охоплення виробництва	Заявлена частка зниження	Обсяг зниження викидів, млн т CO ₂ /рік
Оптимізація доменного процесу	100 %	10 %	1,08
Модернізація конвертерного процесу	100 %	5 %	0,54
Використання альтернативних відновників	100 %	15 %	1,62
Впровадження електродугових печей	25 %	20 %	0,54
Загальний ефект (сумарно)	-	~35 %	3,78

Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого техніко-економічного обґрунтування впровадження інноваційних рішень та формування стратегії сталого розвитку підприємства.

2.8 Техніко-економічне обґрунтування запропонованих заходів

Впровадження заходів з модернізації металургійного виробництва, спрямованих на зниження викидів CO₂, потребує не лише технічного, але й економічного обґрунтування. Це дозволяє оцінити доцільність інвестицій, визначити терміни їх окупності та вплив на собівартість продукції. Особливо актуальним це є для великих підприємств повного циклу, таких як АрселорМіттал Кривий Ріг, де будь-які зміни мають значний фінансовий масштаб.

Загальна характеристика витрат

Запропоновані у попередніх підрозділах заходи включають:

- оптимізацію доменного процесу;
- модернізацію конвертерного виробництва;

- впровадження альтернативних відновників;
- часткове використання електродугових печей;
- впровадження технологій уловлювання CO₂.

Капітальні витрати (інвестиції) включають:

- модернізацію обладнання;
- впровадження нових технологічних установок;
- автоматизацію процесів;
- створення інфраструктури для нових енергоносіїв.

Експлуатаційні витрати пов'язані з:

- енергоспоживанням;
- обслуговуванням обладнання;
- закупівлею сировини та матеріалів;
- витратами на персонал.

Оцінка економічного ефекту

Економічний ефект від впровадження заходів формується за рахунок:

- зниження витрат на паливо (кокс, природний газ);
- використання вторинних енергоресурсів;
- зменшення екологічних платежів;
- підвищення продуктивності виробництва;
- покращення якості продукції.

Річний економічний ефект визначається за формулою:

$$E_{ек} = \Delta C + \Delta P + \Delta T$$

де

ΔC — зниження собівартості продукції;

ΔP — додатковий прибуток від підвищення якості та обсягів виробництва;

ΔT — економія на екологічних платежах.

Для умовного розрахунку прийmemo:

- економія на паливі: 20 дол./т сталі;
- обсяг виробництва: 6 млн т/рік;

- економія на екологічних платежах: 10 дол./т CO₂;
- зменшення викидів: 3,78 млн т CO₂/рік (згідно з п. 2.7).

Тоді:

- економія на паливі:

$$6 \cdot 10^6 \times 20 = 120 \text{ млн дол./рік};$$

- економія на екологічних платежах:

$$3,78 \cdot 10^6 \times 10 = 37,8 \text{ млн дол./рік.}$$

Сумарний економічний ефект становить приблизно:

$$E_{\text{ек}} \approx 157,8 \text{ млн дол./рік}$$

Оцінка інвестицій та терміну окупності

Загальні інвестиції у впровадження заходів можуть становити (умовно):

- модернізація доменного виробництва — 150 млн дол.;
- конвертерний процес — 100 млн дол.;
- електродугові печі — 300 млн дол.;
- системи уловлювання CO₂ — 250 млн дол.

Загальний обсяг інвестицій:

$$I = 800 \text{ млн дол.}$$

Термін окупності визначається за формулою:

$$T = \frac{I}{E_{\text{ек}}}$$

$$T = \frac{800}{157,8} \approx 5,1 \text{ років}$$

Розраховані дані зводимо да табл. 2.4

Аналіз отриманих результатів

Отриманий термін окупності становить близько 5 років, що є прийнятним показником для капіталомістких галузей, таких як металургія. Це свідчить про економічну доцільність впровадження запропонованих заходів.

Таблиця 2.4 — Техніко-економічні показники впровадження заходів модернізації

Показник	Значення
Річний обсяг виробництва сталі	6 млн т
Сумарне зниження викидів CO ₂	3,78 млн т/рік
Економія на паливі	120,0 млн дол./рік
Економія на екологічних платежах	37,8 млн дол./рік
Загальний річний економічний ефект (E _{річ})	157,8 млн дол./рік
Загальні капітальні інвестиції (I _{заг})	800,0 млн дол.
Орієнтовний термін окупності (T _{ок})	~ 5 років

- Крім прямого економічного ефекту, слід враховувати і непрямі вигоди:
- зниження ризиків, пов’язаних із екологічними штрафами;
 - підвищення інвестиційної привабливості підприємства;
 - відповідність міжнародним екологічним стандартам;
 - можливість виходу на ринки «зеленої» продукції.

Для підприємств, таких як АрселорМіттал Кривий Ріг, реалізація таких заходів є стратегічно важливою умовою збереження конкурентоспроможності в умовах глобальної декарбонізації.

Таким чином, проведене техніко-економічне обґрунтування підтверджує доцільність впровадження запропонованих заходів. Отримані результати свідчать про можливість досягнення значного економічного ефекту при відносно прийнятному терміні окупності інвестицій.

Комплексна модернізація виробництва дозволяє не лише знизити викиди CO₂, але й підвищити ефективність функціонування підприємства в цілому, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку.

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЯ

3.1 Аналіз шкідливих факторів на підприємстві

Сучасне металургійне виробництво характеризується наявністю значної кількості шкідливих і небезпечних факторів, які можуть негативно впливати на здоров'я працівників, а також на стан навколишнього середовища. Особливо це стосується підприємств повного металургійного циклу, таких як АрселорМіттал Кривий Ріг, де зосереджено широкий спектр технологічних процесів — від підготовки сировини до виплавки сталі.

Аналіз шкідливих факторів є необхідною умовою для розробки ефективних заходів з охорони праці, зниження виробничого травматизму та мінімізації екологічного впливу.

Класифікація шкідливих факторів

Шкідливі виробничі фактори у металургії можна умовно поділити на такі основні групи:

- фізичні;
- хімічні;
- термічні;
- шумові та вібраційні;
- психофізіологічні.

Такий підхід дозволяє комплексно оцінити умови праці та визначити основні ризики для персоналу.

Фізичні фактори

До фізичних факторів належать підвищена запиленість повітря, висока температура, інтенсивне теплове випромінювання, а також підвищений рівень електромагнітних полів.

У доменних та сталеплавильних цехах температура повітря може значно перевищувати нормативні значення, що створює несприятливі умови праці [16, с. 313].

Запиленість повітря зумовлена процесами агломерації, транспортування та завантаження сировини. Пил містить оксиди заліза, кремнію та інші мінеральні частинки, що можуть негативно впливати на органи дихання.

Хімічні фактори

У процесі виробництва сталі утворюється значна кількість газоподібних шкідливих речовин, серед яких:

- оксид вуглецю (CO);
- вуглекислий газ (CO₂);
- оксиди азоту (NO_x);
- діоксид сірки (SO₂).

Оксид вуглецю є особливо небезпечним через його токсичність і здатність зв'язуватися з гемоглобіном крові, що призводить до кисневого голодування організму. Викиди цих речовин характерні для доменного, конвертерного та агломераційного виробництв [15, с. 255].

Термічні фактори

Металургійні процеси супроводжуються високими температурами, що створює ризик теплового перевантаження організму працівників. Інтенсивне теплове випромінювання від розплавленого металу та гарячих поверхонь обладнання може призводити до опіків та перегріву.

Особливо небезпечними є роботи поблизу доменних печей, конвертерів та електродугових печей, де температура може досягати кількох тисяч градусів у зоні плавлення.

Шум і вібрація

Робота металургійного обладнання супроводжується високим рівнем шуму, який може перевищувати допустимі норми. Джерелами шуму є компресори, вентилятори, транспортні системи та металургійні агрегати.

Тривалий вплив шуму призводить до:

- зниження слуху;
- підвищеної втомлюваності;
- зниження концентрації уваги.

Вібрація, що виникає під час роботи обладнання, також негативно впливає на організм людини, зокрема на опорно-руховий апарат і нервову систему [16, с. 465].

Психофізіологічні фактори

До цієї групи належать значні фізичні навантаження, напруженість праці, відповідальність за технологічні процеси та необхідність роботи в умовах підвищеної небезпеки. Робота у гарячих цехах часто супроводжується високим рівнем стресу, що може негативно впливати на працездатність і стан здоров'я працівників [15, с. 318].

Вплив на навколишнє середовище

Окрім впливу на персонал, металургійне виробництво має значний екологічний вплив. Основними його проявами є:

- викиди забруднюючих речовин в атмосферу;
- утворення відходів виробництва (шлаки, пил);
- забруднення водних ресурсів;
- теплове забруднення.

Особливо актуальною є проблема викидів CO₂, що розглядається у даній роботі як ключовий фактор негативного впливу на клімат.

Обґрунтування необхідності заходів з охорони праці

Наявність великої кількості шкідливих факторів обумовлює необхідність впровадження комплексної системи заходів з охорони праці, яка включає:

- технічні засоби захисту;
- організаційні заходи;
- використання засобів індивідуального захисту;
- контроль умов праці.

Для підприємств, таких як АрселорМіттал Кривий Ріг, це є обов'язковою умовою забезпечення безпеки персоналу та відповідності нормативним вимогам.

Таким чином, металургійне виробництво характеризується комплексом шкідливих і небезпечних факторів, що впливають як на працівників, так і на навколишнє середовище. Їх системний аналіз дозволяє визначити основні напрями підвищення безпеки праці та зниження екологічного навантаження.

Отримані результати є основою для розробки ефективних заходів з охорони праці, які будуть розглянуті у наступних підрозділах.

3.2 Заходи з покращення умов праці

З урахуванням виявлених у підрозділі 3.1 шкідливих і небезпечних факторів, характерних для металургійного виробництва, важливим завданням є розробка та впровадження комплексу заходів, спрямованих на покращення умов праці, зниження рівня виробничого травматизму та профілактику професійних захворювань. Особливої актуальності це набуває для підприємств повного циклу, таких як АрселорМіттал Кривий Ріг, де поєднуються різноманітні виробничі процеси з підвищеним рівнем небезпеки.

Заходи з покращення умов праці доцільно розглядати як комплекс взаємопов'язаних рішень, що включають технічні, організаційні та санітарно-гігієнічні аспекти [18, с. 21].

Технічні заходи

Технічні заходи є основою забезпечення безпеки праці, оскільки спрямовані на усунення або зменшення впливу шкідливих факторів безпосередньо у джерелі їх виникнення.

До основних технічних заходів належать:

- модернізація обладнання з метою зниження рівня шуму, вібрації та тепловиділення;
- герметизація технологічних агрегатів, що дозволяє зменшити викиди

шкідливих газів і пилу у робочу зону;

– встановлення ефективних систем вентиляції та аспірації, які забезпечують очищення повітря від пилу та газів;

– автоматизація та дистанційне керування процесами, що дозволяє мінімізувати перебування персоналу у небезпечних зонах;

– теплоізоляція обладнання, яка знижує рівень теплового випромінювання.

Особливо ефективним є впровадження автоматизованих систем контролю, які дозволяють оперативно реагувати на зміну параметрів виробничого середовища [18, с. 113].

Організаційні заходи

Організаційні заходи спрямовані на раціональну організацію праці та зниження впливу шкідливих факторів за рахунок управлінських рішень.

До них належать:

– раціоналізація режимів праці та відпочинку, зокрема скорочення тривалості перебування у шкідливих умовах;

– чітке регламентування технологічних процесів та дотримання інструкцій з охорони праці;

– проведення навчання та інструктажів персоналу;

– контроль за станом виробничого середовища (моніторинг концентрації шкідливих речовин, рівня шуму, температури);

– забезпечення медичних оглядів працівників.

Важливим елементом є формування культури безпеки на підприємстві, що передбачає усвідомлення працівниками важливості дотримання вимог охорони праці.

Санітарно-гігієнічні заходи

Санітарно-гігієнічні заходи спрямовані на створення комфортних і безпечних умов праці шляхом нормалізації параметрів виробничого середовища.

До них належать:

- забезпечення оптимального мікроклімату (температура, вологість, швидкість руху повітря);
- очищення повітря від пилу та шкідливих газів;
- організація місць відпочинку та охолодження для працівників гарячих цехів;
- забезпечення працівників питною водою;
- дотримання норм освітлення робочих місць.

Ці заходи сприяють зниженню втомлюваності працівників та підвищенню їх працездатності.

Засоби індивідуального захисту

У випадках, коли повністю усунути вплив шкідливих факторів неможливо, застосовуються засоби індивідуального захисту (ЗІЗ), до яких належать:

- захисний спецодяг та спецвзуття;
- каски, окуляри та щитки;
- респіратори та протигази;
- засоби захисту слуху (наушники, беруші);
- термостійкі рукавиці та екрани.

Використання ЗІЗ є обов'язковим елементом системи охорони праці та значно знижує ризик травматизму.

Обґрунтування ефективності заходів

Комплексне впровадження зазначених заходів дозволяє:

- знизити рівень шкідливих факторів до нормативних значень;
- зменшити кількість нещасних випадків;
- покращити стан здоров'я працівників;
- підвищити продуктивність праці;
- зменшити витрати, пов'язані з лікуванням та компенсаціями.

Для підприємств, таких як АрселорМіттал Кривий Ріг, впровадження сучасних заходів з охорони праці є не лише вимогою законодавства, але й важливим фактором підвищення ефективності виробництва.

Таким чином, покращення умов праці у металургійному виробництві можливе лише за умови комплексного підходу, що поєднує технічні, організаційні та санітарно-гігієнічні заходи.

Реалізація запропонованих рішень дозволяє забезпечити безпечні умови праці, знизити вплив шкідливих факторів та підвищити ефективність діяльності підприємства.

3.3 Екологічна безпека виробництва

Екологічна безпека металургійного виробництва є одним із ключових аспектів сучасного промислового розвитку, що визначає не лише рівень впливу підприємства на навколишнє середовище, але й його відповідність міжнародним стандартам сталого розвитку. В умовах посилення екологічних вимог особливого значення набуває впровадження комплексних заходів, спрямованих на зниження викидів забруднюючих речовин, раціональне використання ресурсів та мінімізацію негативного впливу на довкілля.

Для підприємств повного металургійного циклу, таких як АрселорМіттал Кривий Ріг, забезпечення екологічної безпеки є стратегічним завданням, що потребує системного підходу та інтеграції екологічних рішень у всі стадії виробництва.

Основні напрями забезпечення екологічної безпеки

Екологічна безпека виробництва досягається шляхом реалізації комплексу взаємопов'язаних заходів, серед яких:

- зниження викидів забруднюючих речовин в атмосферу;
- очищення промислових газів та пилу;
- раціональне використання водних ресурсів;

- утилізація та переробка відходів;
- впровадження енергоефективних технологій.

Комплексний підхід дозволяє не лише зменшити негативний вплив на довкілля, але й підвищити ефективність використання ресурсів.

Очищення газових викидів

Одним із основних джерел забруднення атмосферного повітря є газові викиди доменного, конвертерного та агломераційного виробництва. Для їх очищення застосовуються сучасні газоочисні установки, зокрема:

- електрофільтри;
- рукавні фільтри;
- скрубери;
- системи сухого та мокрого очищення газів.

Застосування цих технологій дозволяє ефективно видаляти пил, оксиди сірки, азоту та інші шкідливі речовини, що значно знижує рівень забруднення атмосфери.

Особливу увагу приділяють уловлюванню вуглекислого газу, що розглядається як один із ключових факторів боротьби зі зміною клімату. У цьому контексті перспективним є впровадження технологій CCS/CCU, розглянутих у попередніх розділах.

Раціональне використання водних ресурсів

Металургійне виробництво характеризується значним споживанням води, яка використовується для охолодження обладнання, очищення газів та інших технологічних процесів [16, с. 243]. Для зменшення негативного впливу на водні ресурси застосовуються:

- системи оборотного водопостачання;
- очищення стічних вод;
- повторне використання технічної води;
- зниження втрат води у виробництві.

Це дозволяє значно скоротити обсяг забору води з природних джерел та зменшити рівень їх забруднення

Управління відходами виробництва

У процесі металургійного виробництва утворюється значна кількість відходів, зокрема шлаки, пил та інші тверді залишки. Сучасний підхід до екологічної безпеки передбачає не лише їх утилізацію, але й повторне використання.

Основні напрями поводження з відходами включають:

- переробку доменних і сталеплавильних шлаків;
- використання пилу у виробництві агломерату;
- вторинне використання матеріалів у будівництві;
- мінімізацію обсягів захоронення відходів.

Такий підхід сприяє зменшенню навантаження на навколишнє середовище та підвищенню ресурсної ефективності виробництва.

Енергоефективність та зниження викидів CO₂

Важливим напрямом забезпечення екологічної безпеки є підвищення енергоефективності виробництва. Зниження споживання енергії безпосередньо впливає на скорочення викидів CO₂, що є одним із головних завдань сучасної металургії [15, с. 385].

До основних заходів належать:

- оптимізація технологічних процесів;
- використання вторинних енергоресурсів;
- впровадження енергоощадного обладнання;
- частковий перехід на електросталеплавильні технології.

Реалізація цих заходів дозволяє досягти значного екологічного ефекту та підвищити ефективність виробництва.

Обґрунтування ефективності екологічних заходів

Комплексне впровадження заходів з екологічної безпеки дозволяє:

- суттєво знизити викиди забруднюючих речовин;
- зменшити споживання природних ресурсів;
- підвищити рівень утилізації відходів;

- забезпечити відповідність екологічним нормам і стандартам;
- покращити екологічний імідж підприємства.

Для підприємств, таких як АрселорМіттал Кривий Ріг, це є важливою умовою інтеграції у світовий ринок та дотримання вимог екологічної політики.

Таким чином, екологічна безпека металургійного виробництва забезпечується шляхом реалізації комплексу технічних, організаційних та технологічних заходів. Їх впровадження дозволяє мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище, підвищити ефективність використання ресурсів та забезпечити сталий розвиток підприємства [15, с. 413].

Комплексний підхід до вирішення екологічних проблем є необхідною умовою функціонування сучасного металургійного виробництва та відповідає глобальним тенденціям декарбонізації економіки.

3.4 Вплив запропонованих рішень на довкілля

У сучасних умовах розвитку промисловості важливим етапом обґрунтування інноваційних заходів є оцінка їх впливу на навколишнє середовище. Запропоновані у даній роботі рішення, спрямовані на зниження викидів CO₂ та підвищення ефективності металургійного виробництва, мають комплексний вплив на екологічний стан довкілля. Особливо це актуально для великих промислових підприємств, таких як АрселорМіттал Кривий Ріг, діяльність яких пов'язана з інтенсивним використанням природних ресурсів.

Вплив на атмосферне повітря

Найбільш суттєвий позитивний ефект від впровадження запропонованих заходів проявляється у зниженні викидів забруднюючих речовин в атмосферу. Як показано у підрозділі 2.7, загальне скорочення викидів CO₂ може становити близько 35 %, що є значним показником для металургійної галузі [17, с. 243].

Крім вуглекислого газу, зменшуються також викиди:

- оксиду вуглецю (CO);
- оксидів азоту (NO_x);

- діоксиду сірки (SO₂);
- пилу та аерозолів.

Це досягається за рахунок оптимізації технологічних процесів, використання альтернативних відновників, впровадження електродугових печей та систем очищення газів. Зниження концентрації шкідливих речовин сприяє покращенню якості повітря та зменшенню негативного впливу на здоров'я населення.

Вплив на водні ресурси

Запропоновані заходи також позитивно впливають на стан водних ресурсів. Впровадження оборотних систем водопостачання та вдосконалення процесів очищення стічних вод дозволяє:

- зменшити обсяг споживання природної води;
- скоротити скиди забруднених стічних вод;
- знизити концентрацію шкідливих речовин у водних об'єктах.

Таким чином, зменшується антропогенне навантаження на водні екосистеми та забезпечується більш раціональне використання водних ресурсів.

Вплив на земельні ресурси та відходи

Важливим аспектом є зменшення обсягів утворення та накопичення відходів виробництва. Завдяки впровадженню технологій повторного використання шлаків і пилу, а також оптимізації процесів виробництва досягається:

- зменшення площ, зайнятих відвалами;
- скорочення обсягів захоронення відходів;
- підвищення рівня утилізації матеріалів.

Це сприяє зниженню негативного впливу на ґрунти та запобігає їх деградації.

Вплив на кліматичні зміни

Зниження викидів CO₂ є ключовим фактором у боротьбі зі зміною клімату. Запропоновані заходи спрямовані на скорочення парникових газів, що дозволяє:

- зменшити вуглецевий слід виробництва сталі;
- сприяти виконанню міжнародних екологічних зобов'язань;
- знизити ризики, пов'язані з кліматичними змінами.

Особливо важливим є впровадження технологій, що дозволяють перейти до низьковуглецевого виробництва, таких як використання водню та електродугових печей [17, с. 433].

Комплексна оцінка екологічного ефекту

Запропоновані у роботі заходи мають комплексний позитивний вплив на довкілля, який проявляється у:

- зниженні рівня забруднення атмосфери;
- раціональному використанні природних ресурсів;
- скороченні обсягів відходів;
- підвищенні екологічної безпеки виробництва.

Можливі екологічні ризики

Разом із позитивними ефектами слід враховувати і можливі ризики, пов'язані з впровадженням нових технологій, зокрема:

- підвищення енергоспоживання (при використанні електродугових печей);
- необхідність утилізації нових видів відходів;
- вплив виробництва водню на навколишнє середовище.

Однак ці ризики можуть бути мінімізовані шляхом застосування сучасних технологій та ефективного управління виробничими процесами.

Таким чином, запропоновані рішення мають суттєвий позитивний вплив на навколишнє середовище. Вони дозволяють значно знизити рівень забруднення, підвищити ефективність використання ресурсів та сприяти переходу до екологічно сталого виробництва.

ВИСНОВКИ

Сталеплавильне виробництво є однією з найбільш енергоємних галузей промисловості та належить до основних джерел промислових викидів вуглекислого газу. Основна частка викидів CO₂ формується у доменному та киснево-конвертерному виробництві внаслідок використання коксу, спалювання палива та протікання окислювальних реакцій під час виплавки сталі.

Мартенівський спосіб виробництва сталі характеризується найбільшою тривалістю плавки, значними витратами енергоресурсів та високим рівнем викидів парникових газів. У сучасних умовах ця технологія є екологічно та економічно недоцільною, тому її виведення з експлуатації є одним із найефективніших етапів декарбонізації металургійного виробництва.

Киснево-конвертерний процес забезпечує високу продуктивність і відносно низьку собівартість виробництва сталі, однак супроводжується значними викидами CO та CO₂. Зниження екологічного навантаження можливе шляхом оптимізації режимів продування, збільшення частки металобрухту у шихті, використання вторинних енергоресурсів та впровадження систем уловлювання конвертерного газу.

Електросталеплавильне виробництво є більш екологічною альтернативою традиційним способам виплавки сталі, оскільки дозволяє значно скоротити прямі викиди вуглецю. Ефективність цього процесу суттєво зростає за умови використання електроенергії з відновлюваних джерел та застосування прямовідновленого заліза.

Перспективним напрямом декарбонізації металургії є використання альтернативних відновників, зокрема водню та біопалива.

Використання водню у процесах прямого відновлення заліза дозволяє практично усунути утворення CO₂ на стадії відновлення, оскільки продуктом реакції є водяна пара. Біопаливо забезпечує часткове зниження викидів за рахунок заміни традиційних вуглецевмісних матеріалів.

Технології уловлювання та утилізації вуглекислого газу (CCS/CCU) дозволяють суттєво скоротити обсяги викидів без повної зміни існуючих технологічних схем виробництва. Найбільш доцільним є їх використання на підприємствах повного циклу, де основними джерелами викидів є доменні печі, конвертери та агломераційні установки.

Для підприємства АрселорМіттал Кривий Ріг найбільш доцільним є комплексний підхід до модернізації, який включає підвищення ефективності конвертерного виробництва, використання вторинної сировини, впровадження систем уловлювання CO₂ та поступовий розвиток електросталеплавильних технологій. Такий підхід дозволяє зменшити вуглецевий слід виробництва, підвищити енергоефективність та забезпечити відповідність сучасним екологічним вимогам.

Комплексне впровадження заходів декарбонізації сприяє зниженню рівня шкідливих викидів, скороченню споживання енергоресурсів та підвищенню екологічної безпеки металургійного виробництва. Подальший розвиток галузі пов'язаний із переходом до низьковуглецевих технологій, використанням відновлюваних джерел енергії та поетапною модернізацією існуючих виробничих процесів.

ДОДАТОК А

Схема технологічного процесу виробництва сталі

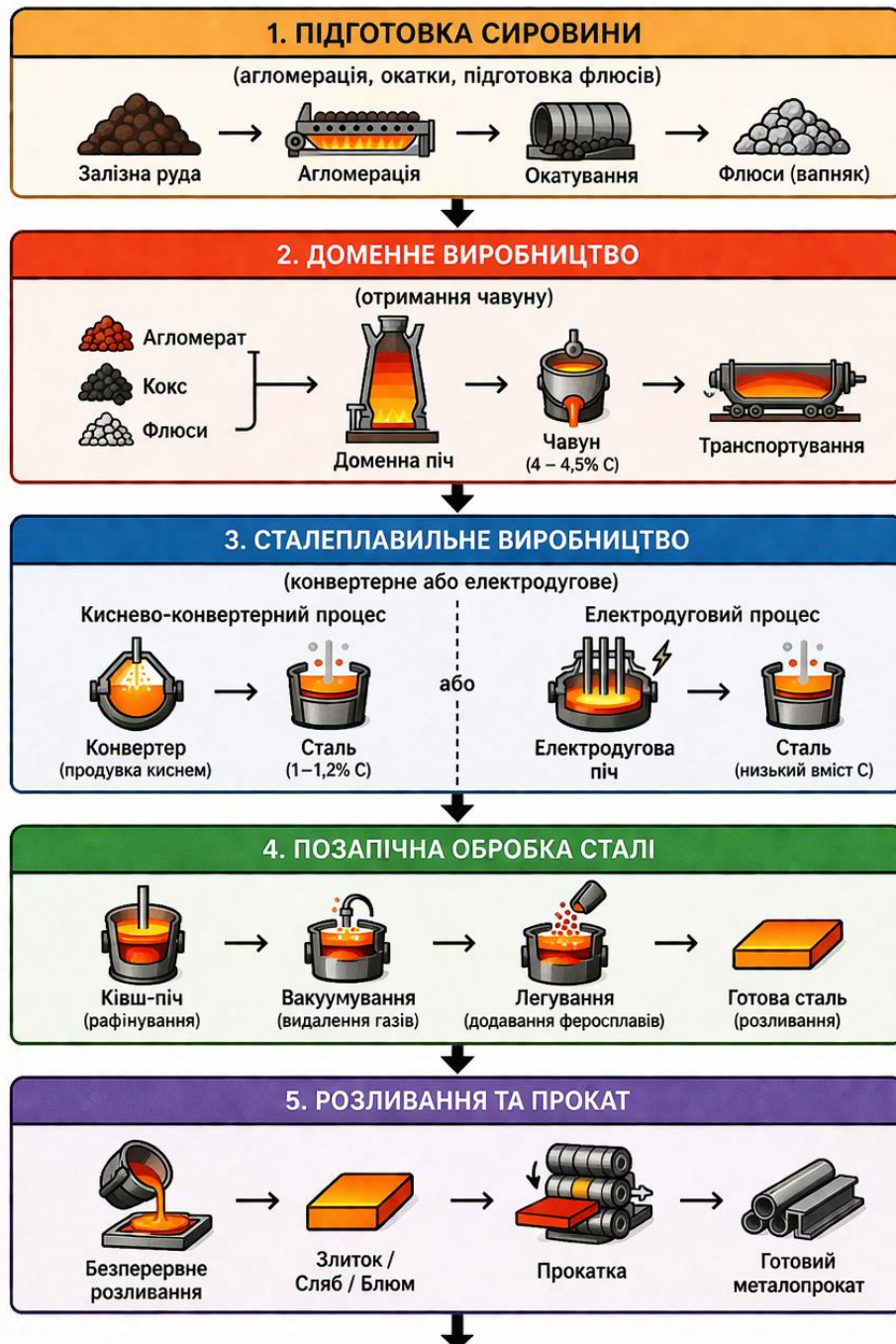


Рисунок А.1 – Технологічна схема виробництва сталі
(повний металургійний цикл)

ДОДАТОК Б

Основні джерела викидів CO₂ у стадеплавильному виробництві

Етап виробництва	Джерело викидів	Частка, %
Конвертерне виробництво	Окиснення домішок	10–15
Енергетика	Спалювання палива	10–20
Інші процеси	Допоміжні операції	5–10

ДОДАТОК В

Порівняння технологій виробництва сталі за рівнем викидів CO₂

Технологія	Викиди CO₂, т/т сталі	Характеристика
Доменна конвертерна	1,8–2,2	Високий рівень викидів
Електродугова піч	0,4–0,8	Залежить від електроенергії
Воднева технологія	0,1–0,3	Перспективна, низьковуглецева

ДОДАТОК Г

Результати розрахунку зниження викидів CO₂

Захід	Зниження, %	Економія, млн т CO₂/рік
Оптимізація доменної печі	10	1,08
Модернізація конвертера	5	0,54
Альтернативні відновники	15	1,62
Електродугові печі	5	0,54
Разом	≈ 35 %	3,78