

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
Гірничо-металургійний факультет  
Кафедра металургії та організації виробництва

Кваліфікаційна робота допущена до захисту.

Гарант освітньої програми  
«Управління модернізацією металургії»

\_\_\_\_\_ Едуард ГРИБКОВ  
9 липня 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
на здобуття освітнього ступеня «магістр»  
за підсумками виконання міждисциплінарної  
освітньо-наукової програми «Управління модернізацією металургії»  
за спеціальностями 073 Менеджмент та 136 Металургія  
на тему:

«Організація виробництва заліза прямого відновлення на засадах  
безкоксової металургії на основі впровадження принципів менеджменту  
якості продукції»

Керівники роботи

Ірина ШКРАБАК  
Євген СИНЕГІН

Консультант від бази практики

Микола АВДЄЄНКО

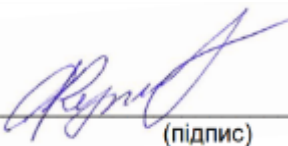
*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають  
посилання на відповідне джерело*

Здобувач:

Наталія ЧУБ

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

  
(підпис)

Олександр КУРПЕ

Запоріжжя, 2025

## ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет	<u>Гірничо-металургійний факультет</u>
Кафедра	<u>Металургії та організації виробництва</u>
Ступінь вищої освіти	<u>Магістр</u>
Спеціальність	<u>136 Металургія, 073 Менеджмент</u>
ОНП	<u>Управління модернізацією металургії</u>

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Гарант ОНП

Едуард ГРИБКОВ

«31» березня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Чуб Наталії Станіславівни

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Організація виробництва заліза прямого відновлення на засадах безкоксової металургії на основі впровадження принципів менеджменту якості продукції

керівники роботи Синегін Євген Володимирович , к.т.н, доцент

Шкрабак Ірина Володимирівна д.е.н. професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету від 31.03.2025 р. №82/31.03.2025

2. Термін подання роботи 01.07.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, державні стандарти, методична література зі спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з безкоксової металургії літературні джерела, технологічні інструкції, дані ОГЗК, Кривий Ріг. результати власних досліджень тощо.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) 1. Аналітичний розділ (літературний огляд, сучасні тенденції в металургії та підходи до управління якістю. 2. Аналітичний розділ ( Аналіз умов впровадження технології MIDREX на базі ЦГЗК, плани будівництва заводу, принципи роботи шахтної печі, SWOT аналіз вибору технології) . 3. Розрахунковий розділ (Вибір параметрів діючої технології виробництва окатків та нового виробництва в якості ключових параметрів технології та обладнання). 4. Охорона праці.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта

7. Дата видачі завдання 31.03.2025

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Реферат, зміст, вступ	01.04.2025
2	Розділ 1. Теоретичний розділ (аналітико-пошуковий)	10.04.2025
3	Розділ 2. Дослідницький розділ (аналітично-розрахунковий)	25.05.2025
4	Розділ 3. Технологічний розділ	18.05.2025
5	Розділ 4. Охорона праці	01.06.2025
7	Висновки, перелік посилань	15.06.2025
8	Оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату	30.06.2025
9	Подання завершеної роботи. Перевірка на відсутність академічного плагіату	05.07.2025

Здобувач

Наталія ЧУБ

Керівники роботи

Євген СИНЕГІН

Ірина ШКРАБАК

## РЕФЕРАТ

Чуб Н.С.. Організація виробництва заліза прямого відновлення на засадах безкоксової металургії на основі впровадження принципів менеджменту якості продукції.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за міждисциплінарною освітньо-науковою програмою «Управління модернізацією металургії» за спеціальностями 073 Менеджмент та 136 Металургія – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2025.

Мета роботи: впровадження принципів інтегрованої системи менеджменту якості (СМЯ) шляхом встроювання системи ключових параметрів технології та обладнання (КПТІО) на етапі проєктування нового виробництва НВІ за технологією MIDREX та забезпечення їх узгодженості з існуючими процесами ЦГЗК для формування цілісного безперервного ланцюга системи управління якістю.

Об'єктом дослідження є процес організації управління системою превентивного управління якістю нового металургійного виробництва в умовах гірничо-збагачувального підприємства

Предметом дослідження є організаційно-методичні підходи до адаптації систем управління якістю у контексті впровадження виробництва НВІ, а саме Ключові параметри технології та обладнання, як елемент превентивного управління якістю.

**У першому розділі** розглянуто сучасні тенденції декарбонізації металургії, технології виробництва DRI/НВІ, а також проаналізовано наукові методи дослідження, принципи системи менеджменту якості.

**У другому розділі** проведено техніко-економічне обґрунтування вибору технології, порівняльний SWOT-аналіз, розрахунок потреби у

персоналі та запропоновано модель інтеграції нового виробництва НВІ у структуру ЦГЗК/ОГЗК.

**У третьому розділі** сформовано пропозиції щодо впровадження інтегрованої системи управління якістю на основі контролю КПТІО з етапу проектування, автоматизації моніторингу та злиття систем контролю якості на вході та виході суміжних виробництв

СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТУ ЯКОСТІ, КЛЮЧОВІ ПАРАМЕТРИ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ, ПРЕВЕНТИВНЕ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ, ГАРЯЧЕБРИКЕТОВАНЕ ЗАЛІЗО, ДУГОВА ПІЧ, УПРАВЛІНСЬКІ ПРОЦЕСИ, СТРУКТУРНІ ЗМІНИ, СИСТЕМНИЙ ОПІР, УПРАВЛІНЬСКА МОДЕЛЬ, DRI-ПРОЦЕС

### **Список публікацій здобувача**

1. Чуб Н.С., Костенко І.С. Продуктивність застосування Power BI для дослідження макроекономічних показників країни. Матеріали 7 міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів «Інженерія програмного забезпечення і передові інформаційні технології (Soft Tech-2024). 20-22 листопада 2024 року, м. Київ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», ФІОТ, С. 128-132.

2. Тимошенко Д.О., Кухар В.В., Волкова В.Є., Чуб Н.С., Кириченко І.Г. Comparing the environmental performance of steelmaking technologies. Науковий Журнал Метінвест Політехніки, 2025, №3

3. Кухар В., Шкрабак І., Шаульська Л., Чуб Н., Приходков А. Організаційні засади впровадження металургійних кластерів та відновлення промислового потенціалу України на основі розвитку водневих технологій. Modeling the Development of the Economic Systems. 2025. № 1. С. 101–107. DOI: <https://doi.org/10.31891/mdes/2025-15-14>.

## ЗМІСТ

РЕФЕРАТ .....	4
ВСТУП .....	7
<b>1 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ПРЕВЕНТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЗАЛІЗА ПРЯМОГО ВІДНОВЛЕННЯ.....</b>	<b>9</b>
1.1 Передумови переходу на «зелену» металургію.....	9
1.2 Технологія виробництва заліза прямого відновлення (DRI): фізико-хімічні основи, сучасні процеси та технічні рішення.....	17
1.3 Принципи управління якістю .....	21
<b>2 АНАЛІЗ УМОВ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ MIDREX НА БАЗІ ЦГЗК.....</b>	<b>27</b>
2.1 Плани будівництва DRI-заводів у світі та ЄС.....	27
2.2 Обґрунтування вибору SWOT-аналізу та бенчмаркінгу для дослідження.....	31
2.3 Принцип роботи шахтної печі MIDREX.....	35
2.4 Превентивне управління якістю.....	55
2.5 Економічна доцільність впровадження нового виробництва НВІ MIDREX у Кривому Розі з урахуванням приросту доданої вартості .....	60
2.6 Аналіз наявної організаційної структури ЦГОК.....	69
<b>3 ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО СУЧАСНИХ УПРАВЛІНСЬКИХ ПІДХОДІВ НА НОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ ПРЯМОВІДНОВЛЕНОГО ЗАЛІЗА (DRI/НВІ) ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ MIDREX.....</b>	<b>72</b>
3.1 Чому Кривий Ріг .....	72
3.2 Пропозиції в СМЯ .....	73
3.3 Системи контролю якості .....	86
3.4 Пропозиції в технології .....	89
3.5 Формування команди та організаційна структура інтегрованого підрозділу ...	99
3.6 Інтеграція СМЯ з ERP, SCADA, MES та IIoT .....	105
<b>4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА НА НОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ НВІ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ MIDREX.....</b>	<b>109</b>
4.1 Загальні вимоги до охорони праці.....	109
4.2 Вимоги до екологічної безпеки .....	110
ВИСНОВКИ.....	115
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	118

## ВСТУП

У сучасних умовах трансформації глобальної металургії, викликаній необхідністю скорочення викидів парникових газів, підвищення енергоефективності та впровадження принципів сталого розвитку, дедалі актуальнішим стає впровадження технологій безкоксового виробництва сталі. Однією з таких технологій є виробництво заліза прямого відновлення (Direct Reduced Iron, DRI), зокрема за технологією MIDREX, яка на сьогодні охоплює понад 80% світового обсягу DRI. Створення виробництва гарячебрикетованого заліза (HBI) на базі існуючої сировинної інфраструктури Центрального гірничо-збагачувального комбінату (ЦГОК, м. Кривий Ріг) відповідає як глобальним екологічним трендам, так і стратегічним планам розвитку металургійної галузі України взагалі і стратегічним планам розвитку компанії METINVEST, зокрема.

Передумовами виникнення потреби у реалізації такого проєкту є зростання європейських вимог до "зеленої" сталі, запровадження CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism), підвищення конкуренції на світових ринках сталі, а також доступ України до високоякісної залізорудної сировини. У відповідь на ці виклики група METINVEST розглядає перехід до виробництва сталі на основі безкоксових технологій, що передбачає інтенсивну модернізацію виробництва, включаючи проєкт будівництва установки MIDREX для виробництва HBI.

Огляд досліджень свідчить, що тема прямого відновлення заліза активно розробляється у працях провідних дослідників і організацій, зокрема: Midrex Technologies Inc., IEA, World Steel Association. В Україні ці питання піднімаються у звітах GMK Center, матеріалах компанії METINVEST, а також в аналітичних публікаціях щодо зеленої трансформації промисловості, зокрема у роботах таких авторів, як Ковальова Н. П., Стельмах Л. І., Струтинська І. В., Кучерявенко М. Ю. та ін. Проте більшість наявних досліджень зосереджена на загальній

ефективності технологій, тоді як аспект інтеграції нової технології і зокрема процесу превентивного управління якістю, в управлінсько-виробничу систему існуючого гірничо-збагачувального підприємства залишається недостатньо розробленим.

Мета роботи полягає в удосконаленні підходів до управління впровадженням нової металургійної технології (виробництва НВІ за технологією MIDREX) шляхом адаптації системи управління якістю, впровадження ключових параметрів технології та обладнання (КПТіО), як складової загальної системи управління якістю, а саме превентивного управління та управління ризиками.

Об'єкт дослідження — процес організації управління системою превентивного управління якістю нового металургійного виробництва в умовах гірничо-збагачувального підприємства.

Предмет дослідження — організаційно-методичні підходи до адаптації систем управління якістю у контексті впровадження виробництва НВІ, а саме Ключові параметри технології та обладнання, як елемент превентивного управління якістю.

Методи дослідження: системний аналіз, SWOT-аналіз, бенчмаркінг, порівняльне оцінювання, експертне опитування, інженерне моделювання параметрів виробництва.

Інформаційною базою роботи є дані Midrex Technologies, аналітика GMK Center, матеріали Metinvest Holding, стандарти ISO, галузеві звіти World Steel Association, дослідження IEA, а також нормативно-технічна документація та результати власного аналізу виробничих і управлінських показників ЦГОК.

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ПРЕВЕНТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЗАЛІЗА ПРЯМОГО ВІДНОВЛЕННЯ

## 1.1 Передумови переходу на «зелену» металургію

Сталеве виробництво є одним із найбільших джерел парникових газів у світі (7–9 % глобальних викидів CO<sub>2</sub>) [1]. Традиційний процес на доменних печах з коксом супроводжується величезними викидами: близько 1,8–2,2 т CO<sub>2</sub> на 1 т сталі [1]. Світові цілі кліматичного стримування вимагають різкого скорочення цих викидів. Міжнародні агенції (IEA) та промисловість прогнозують, що до 2030 року потрібно вдвічі скоротити CO<sub>2</sub>-викиди в сталевому секторі [1]. Нові технології на базі *прямого відновлення заліза (DRI)* із використанням природного газу або «зеленого» водню, а також електросталеплавильні печі (EAF) можуть знизити CO<sub>2</sub>-викиди вп'ятеро і більше [2]. Тому в Європі й інших регіонах дедалі активніше впроваджують виробництво заліза прямого відновлення (DRI) і гарячебрикетованого заліза (HBI) як складову декарбонізації металургії [1]. Сучасні проекти «зеленої» металургії – наприклад, Hybrit у Швеції чи H2 Green Steel – базуються саме на DRI/HBI-технологіях. Крім того, очікується, що попит на «зелений» метал у ЄС зростатиме: Світовий Альянс сталі (World Steel Association) і GMK Center прогнозують, що до 2030 року попит на сировину для DRI-сировинних проектів може сягнути сотень мільйонів тонн [2].

Фактором прискорення переходу є також нова європейська політика. Зокрема, з 2026 року у ЄС діятиме механізм вуглецевого коригування на кордоні (CBAM), що фактично вводить «вуглецеве мито» на сталі й інші товари з високим рівнем CO<sub>2</sub> [3]. Це означає: сталеві вироби, вироблені старою технологією на коксі й доменних печах, з високим вуглецевим слідом, будуть обкладатися додатковим митом при експорті до ЄС. Як зазначає операційний директор «METINVESTУ» О. Мироненко, вже зараз це викликає серйозне занепокоєння виробників: «CBAM – вуглецеве мито,

яке ЄС запроваджує на імпорт продукції з високим рівнем викидів CO<sub>2</sub>. Рівень мита та конкурентоспроможність продукції на ринку ЄС залежатиме від того, наскільки модернізовано виробництво» [4]. Відсутність доступу до європейських кредитів і грантів ще більше посилює ризик: «Українські виробники не мають доступу до фінансування на модернізацію, яке доступне європейським. Наразі немає жодних винятків для української продукції, отже СВМ матиме негативний вплив на економіку» [5]. Таким чином, на тлі світових кліматичних зобов'язань та нових торгових правил ЄС, питання переходу на безкоксіві технології стає нагальним не лише з екологічних, але й з чисто ринкових міркувань.

#### Україна і можливості «зеленої» металургії

Україна традиційно входить до 20 найбільших світових виробників сталі та чавуну [5]. Більшість наших комбінатів наразі працюють на вугіллі та коксі, що робить галузь енерго- та вуглецево-ємною. Проте Україна має кілька чинників, які роблять її перспективною у зеленому переході: по-перше, величезні запаси магнетитової руди – до 5 млрд тонн [5]. Магнетитова руда є ключовою сировиною для DRI, особливо якщо її збагачувати в окатки чи концентрат. Це дозволяє Україні потенційно стати одним з основних світових постачальників сировини для DRI- заводів (як власних, так і для зарубіжних споживачів). GMK Center оцінює, що українські підприємства могли б експортувати 20–25 млн тонн сировини для DRI за середньостроковий період [4], тоді як глобальний попит на DRI-сировину до 2030 року прогнозується в 180 млн тонн.

По-друге, у разі побудови DRI-заводів для внутрішнього споживання Україна зможе замінити традиційний виплавку чавуну з коксового горна та суттєво зменшити імпорт коксу або імпортованого металобрухту. По-третє, подальша інтеграція в ЄС вимагає наближення до європейських стандартів. Як сказав заступник міністра економіки Олексій Соболев, «металургія посідає одне з ключових місць у структурі економіки» і «цілі та

амбіції України залишаються конкурентними та узгоджуються з глобальними трендами. У нас є потенціал для забезпечення потреб ринку «зеленої» металургії відповідно до глобальних цілей декарбонізації» [4]. В рамках підготовки Плану «Ukraine Facility» вже обговорюються десятки проєктів «зеленої» металургії на суму понад \$7 млрд [4].

Внутрішній попит також стимулює перехід: через війну скоротився доступ до імпортного металобрухту, і галузь вже відчуває дефіцит вторинної сировини [6]. Це потребує переорієнтації на власне виробництво металу і використання альтернативних технологій. Наприклад, «МЕТІНВЕСТ» планує збудувати DRI-проєкти в Криворіжжі та кардинально скорочувати кількість доменних печей, замінюючи їх електродуговими печами. [6] Це дозволило б не тільки знизити CO<sub>2</sub>-викиди, а й використовувати наявні запаси металобрухту в Україні, не продаючи їх за кордон [6]. У спільному дослідженні [7] авторка також наголошує на важливості інтеграції DRI-технологій у структуру національних металургійних кластерів як інструменту декарбонізації та імпортозаміщення у післявоєнний період.

#### Екологічні та соціальні чинники

Соціальна відповідальність металургів і глобальні екологічні вимоги також стимулюють перехід. З одного боку, локальне забруднення від доменних цехів – пил, діоксини, важкі метали – негативно впливає на здоров'я населення навколишніх регіонів. З іншого – Україна як держава поступово імплементує європейське екологічне законодавство та прагне до «зеленого курсу». В умовах кліматичної кризи великі виробники стали звертати увагу на «вуглецевий слід» своєї продукції. Металургійні корпорації декларують політику сталого розвитку: наприклад, МЕТІНВЕСТ заявляє, що сполучає «екологічну безпеку, енергоефективність, технічний прогрес і добробут людей» [8] як основи своєї діяльності, а пріоритетом є «поступове зменшення забруднення за рахунок модернізації

виробництва» [8]. Компанії вкладають мільярди у екопроекти: METINVEST реалізував «найбільший екологічний проєкт в історії України» – реконструкцію кисневих установок на меткомбінатах і спорудження нових сучасних систем очищення газів і вод [6]. Але навіть такі заходи не дозволяють повністю вивести галузь на «зелений» рівень.

DRI/HBI-технології допомагають радикально скоротити викиди CO<sub>2</sub> і шкідливих домішок. За даними Midrex Technologies, використання природногазового DRI дає приблизно вдвічі менші викиди порівняно з доменною плавкою [9]. Використання HBI у шихті доменної печі зменшує потребу в коксі і може знизити CO<sub>2</sub>-викиди. У прес-релізі про співпрацю Metalloinvest із Midrex підкреслено: «HBI – це низьковуглецева сировина, яка для виробництва сталі в електропечах генерує до 50 % менше CO<sub>2</sub> (Score 1+2) порівняно з традиційним доменним методом»[9]. Крім того, технології DRI/HBI потенційно можна переводити на повністю водневе відновлення, що практично усуває CO<sub>2</sub>-викиди. Таким чином, «зелена» металургія задовольняє суспільні та екологічні очікування стейкхолдерів, допомагає зменшити вплив на довкілля і здоров'я населення, а також відповідає загальносвітовим пріоритетам кліматичної безпеки [8].

#### Технологічні і економічні чинники

DRI і HBI – це не лише еко-технології, а й стратегічні інструменти підвищення доданої вартості продукції. Перехід до безкоксової технології відкриває нові можливості для виробництва більш якісної та конкурентоспроможної продукції. Так, українські металурги вже до війни інвестували в розвиток технологічного прокату і нових сортів сталі, орієнтованих на експорт. За словами О. Мироненка, «за роки незалежності Україні вдалося перейти від сировинного експорту до експорту продукції з високою доданою вартістю. В Україні виробляється багато якісних продуктів із високим попитом як на експортних ринках, так і всередині країни» [10]. Наприклад, METINVEST нарощував випуск концентрату і

високоспоживаних окатків («товарного концентрату»), що мають вищу ціну за звичайну руду, і освоював випуск понад 100 нових видів продукції [10].

Також варто відзначити роль HBI як високоякісної сировини. На відміну від «наміченого» вуглицем чавуну, HBI – це практично чисте, високоспоживане залізо, яке дає вигоди при виробництві сталі в електропечах: воно стабільно згорає й підвищує вихід металу. Тому HBI сприймається як продукт «з високою доданою вартістю» порівняно зі звичайним чавуном або залізною рудою. Більше того, міжнародна практика показує, що на ринку вже зростає попит на «зелене» залізо. Наприклад, єврокомпанії та проєкти (Stegra, GravitHy, BlastrGreenSteel тощо) планують заміщати імпорт чавуну і руди HBI з низьким вуглецевим слідом [9]. Керівники компаній переконані: саме HBI у перспективі формуватиме нові «зелений ланцюг доданої вартості» у металургії. Як зауважує CEO GMK Center С. Зінченко, «постачання руди для DRI та заміщення поставок чавуну на поставки зеленого HBI дозволять Україні вбудуватися в європейські зелені ланцюжки доданої вартості» [5]. Це дасть змогу українському ГМК виробляти продукцію, яка користується попитом у ЄС і має вищу ціну на ринках. У власному дослідженні [11] також обґрунтовується актуальність цифрового аналізу макроекономічних факторів, які впливають на розвиток нових напрямів у металургії, зокрема «зеленої» трансформації національного ГМК.

Нарешті, економічним чинником є загальний світовий тренд на зростання попиту на DRI/HBI. Глобальне виробництво заліза прямого відновлення зростає – у 2023 р. воно досягло рекордного рівня 135,7 млн тонн (на 6,5 % більше ніж 2022-го) Тому й існуючі європейські компанії готують масштабні інвестиції у DRI-заводи, а нові гравці активно будують «зелені» металургійні проєкти. Приклад – плани Acciaierie d'Italia побудувати DRI-завод на Тарантському комбінаті [5]. Прогнози Midrex Technologies показують, що попит на HBI зростатиме у всіх регіонах: до 2030 року у найсуворішому сценарії HBI використовуватиметься у всіх

великих світових регіонах крім СНД і Південної Америки [12]; у ЄС його частка в шихті доменних печей може сягнути 10–15 % до 2040 р. (це десятки мільйонів тонн) [12]. Менеджери галузі підтверджують: «Наша технологія готова до водневого відновлення, і це правильний крок до «зеленої» металургії і вуглецевої нейтральності»[12]. Отже, поява попиту на НВІ з боку глобального ринку робить важливим забезпечення власних поставок цієї продукції.

#### Глобальні плани (станом на 2024 рік)

- ✓ Близько 100 нових DRI-проектів анонсовано у світі до 2030 року (за даними SteelWatch, IEA).
- ✓ Загальна потужність нових установок: понад 150 млн тонн/рік.
- ✓ Основна географія: ЄС, Індія, Близький Схід, США, Латинська Америка.

Ключові проекти планів реалізації переходу наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Ключові проекти планів для реалізації переходу до зеленої металургії (станом на 2024 рік)

Країна	Компанія	Тип установки	Потужність установки, (млн т/рік)	Введення в експлуатацію
Німеччина	Thyssenkrupp	H <sub>2</sub> -DRI	2,5	2026
Італія	Metinvest Adria	DRI-EAF	2,7	~2027
Індія	JSW Steel	DRI-EAF	5,0	2025–2027
Саудівська Аравія	Hadeed / Aramco	DRI-EAF	2,0	2026
США	Nucor, Cleveland Cliffs	HBI/DRI	1,5–2,0	2025
Швеція	Stegra (Boden Steel)	H <sub>2</sub> -DRI	2,0	2026
<b>Україна</b>	<b>МЕТІНВЕСТ</b>	<b>НВІ/DRI (2 лінії)</b>	<b>5,0</b>	<b>після війни</b>

Таблицю складено посилаючись на дані наведені в джерелі [12]

### Фактори активізації HBI/DRI -проектів

- ✓ Європейський зелений курс та зростаюча ціна CO<sub>2</sub>-квот стимулюють заміну доменних печей на DRI-EAF.
- ✓ Інвестиції в зелену енергетику - водень, відновлювальні джерела енергії (ВДЕ) роблять H<sub>2</sub>-DRI економічно досяжним.
- ✓ Підвищення попиту на “зелену сталь” з боку автомобільного, будівельного та пакувального секторів.

### Роль України

Україна має стратегічний потенціал постачальника DRI-сировини (окатків, концентрату) до ЄС, а також потенціал локалізації DRI-виробництва на ГЗК. Плани METINVEST [13], Ferrexpo та ArcelorMittal (післявоєнна фаза) можуть інтегрувати країну в європейський “зелений металургійний пояс”[14],[15].

У 2023-2024 роках світове виробництво заліза прямого відновлення (DRI) досягло рекордних рівнів, в 2023 році - 135,7 млн тонн. Основними виробниками є Індія (36%) та Іран (24,7%) [14]. У 2024 році обсяг виробництва зріс до 143,6 млн тонн. Технологія MIDREX залишається провідною з часткою понад 80% світового ринку DRI [14].

Перехід до безкоксого виробництва (DRI/HBI + EAF) — це сучасний світовий тренд, що базується на кліматичних й економічних викликах. «Традиційна» металургія більше не відповідає вимогам кліматичної безпеки і регіонального регулювання. Тому саме зараз формуються технічні, політичні та ринкові передумови для змін: сировинна база України, жорсткі екологічні цілі та зростання попиту на екологічно чистий метал роблять «зелений перехід» необхідним. Невихід на цю хвилю означає втрату перспективних ринків збуту та конкурентних переваг на міжнародній арені.

Інтеграція “від руди до сталі”. Щоб зберегти лідерство, METINVEST активно консолідує та оптимізує свій ланцюг. В 2024 році компанія об'єднала управління трьома своїми ГЗК у Кривому Розі, утворивши єдиний «Об'єднаний ГЗК» для підвищення ефективності та зниження витрат. Це рішення підсилює вертикальну інтеграцію: видобуток, збагачення та окатування координуються централізовано, як єдине виробництво [16]. Тепер комбінати діють “як одна велика команда” і єдиний технологічний комплекс [16]. Фактично, METINVEST створює у Кривому Розі повний «залізорудний хаб».

Виробництво окатків і якість сировини. METINVEST не лише видобуває руду, але й глибоко її переробляє: значна частина концентрату перетворюється на окатки, в тому числі високоякісні. За рахунок модернізації фабрик вдалося досягти вмісту заліза в окатках до 67,9% Fe [17], що відповідає вимогам DRI-технологій. Компанія має досвід виробництва як звичайних окатків для доменного переділу, так і DRI-сировини для бездоменного виробництва сталі. Наприклад, Центральний ГЗК ще у 2020 р. опанував випуск окатків марки Direct Reduction (DR-grade) з метою диверсифікації ринків збуту [18]. Це позиціонувало METINVEST як постачальника сировини для нових екологічних технологій у металургії.

**Таким чином,** передумови переходу на «зелену» металургію в Україні зумовлені як зовнішніми, так і внутрішніми чинниками. Зовнішні – це глобальна необхідність декарбонізації, нові екологічні стандарти і торговельні механізми ЄС (CBAM), що «змушують» виробників змінювати технології. Внутрішні – це наявність власних ресурсів (руди), стратегічне бажання інтегруватися в європейську економіку, конкурентні переваги в продуктах із вищою доданою вартістю та прагнення компаній забезпечити соціальну відповідальність. Поява та зростання проєктів DRI/HBI не є випадковістю: це загальносвітовий тренд і запорука збереження ринків збуту. Як показують дослідження та думки експертів, металургія

майбутнього – це безкоксіві технології, і хто не встигне перейти на них вчасно, ризикує втратити конкурентоспроможність та частку ринку [1].

1.2 Технологія виробництва заліза прямого відновлення (DRI): фізико-хімічні основи, сучасні процеси та технічні рішення

Залізо прямого відновлення (ЗПВ, англ. DRI — *Direct Reduced Iron*) є одним з ключових компонентів у переході до низьковуглецевої металургії. Це продукт, що утворюється внаслідок хімічного відновлення залізорудної сировини у твердому стані, без плавлення. Його основною характеристикою є високий вміст заліза (понад 90%) та пориста структура, яка забезпечує ефективну подальшу металургійну обробку в електропечах [19].

Загальна характеристика процесу прямого відновлення

Залізо прямого відновлення (англ. Direct Reduced Iron, DRI) отримують шляхом відновлення залізної руди у твердому стані при температурах 800–1100 °С, що нижче температури плавлення заліза (1538 °С) [20], схематично процеси зображено на рисунку 1.1. В основі процесу лежить реакція відновлення оксидів заліза газоподібними агентами — воднем (H<sub>2</sub>), карбон(II) оксидом (CO) або їхньою сумішшю, за формулами 1.1 та 1.2 [20]:



З термодинамічної точки зору, обидві реакції є екзотермічними та проходять із зменшенням вільної енергії Гіббса ( $\Delta G < 0$ ) у зазначеному температурному діапазоні, що забезпечує їх спонтанність. Водночас, кінетика реакцій значною мірою залежить від температури, тиску, пористості руди та складу відновлювального газу. Реакція з H<sub>2</sub> проходить

швидше, ніж з CO, що обумовлює підвищений інтерес до «зелених» технологій на базі водню [21].

Отримане залізо має пористу структуру (губчасте залізо), що обумовлює його високу реакційну здатність та придатність до брикетування (отримання HBI). Рівень металізації DRI зазвичай перевищує 92%.

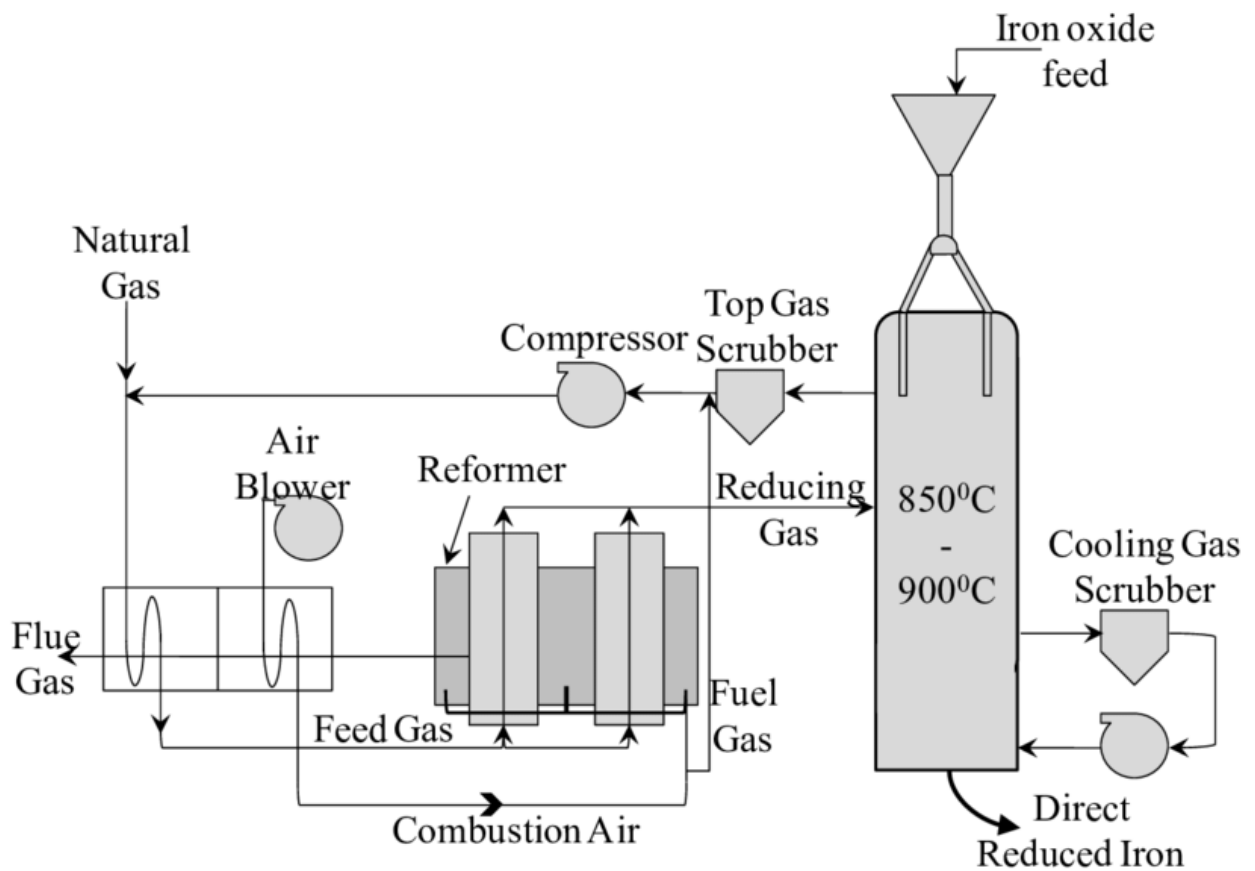


Рисунок 1.1 - Схема процесу прямого відновлення оксидів заліза ( $Fe_2O_3$ ) газоподібними відновниками. Схема наведена з джерел матеріалів [20], [22]

Основні технології DRI та загальне порівняння наведені нижче та в таблиці 1.2.

**MIDREX [23]**

- Найпоширеніша у світі технологія (~60% світового виробництва DRI)
- Реактор: вертикальна шахтна піч.
- Відновлювальний газ: реформований природний газ (CO + H<sub>2</sub>).
- Сировина: окатки або концентрат з магнетиту/гематиту.
- Продукт: DRI (HDRI або CDRI), який може бути брикетованим у HBI.

**ENERGIRON (Tenova + Danieli) [24]**

- Гнучка технологія з можливістю використання до 100% водню.
- Висока металізація, можливість рекуперації газу.

**HYBRIT (Швеція)[25]**

- Пілотна технологія повністю водневого відновлення.
- Перше промислове виробництво H<sub>2</sub>-DRI у 2021 році (SSAB).

**HYFOR (voestalpine) [26]**

- Пряма переробка рудного концентрату без окатування.
- Відновлення 100% зеленим воднем.

Таблиця 1.2 - Порівняльні характеристики технологій DRI

Технологія	Відновник	Піч	Сировина	Готовий продукт	Вміст Fe (%)	Потужність установки	Коментар
MIDREX	H <sub>2</sub> + природний газ	Шахтна	Окатки, концентрат	DRI, HBI	91–94	1,0–2,5 млн т/рік	Найпоширеніша у світі, ~80% DRI у 2023 році
ENERGIRON	H <sub>2</sub> + природний газ <sub>2</sub>	Шахтна	Окатки	DRI, HBI	91–93	0,6–2,0 млн т/рік	Гнучкість у регулюванні вмісту вуглецю
HYBRIT	H <sub>2</sub>	Шахтна	Окатки	DRI	~93	1,0 млн т/рік	Пілотний проєкт у Швеції з нульовими викидами CO <sub>2</sub>

Порівняльну таблицю складено автором на основі [23], [24], [25], [26].

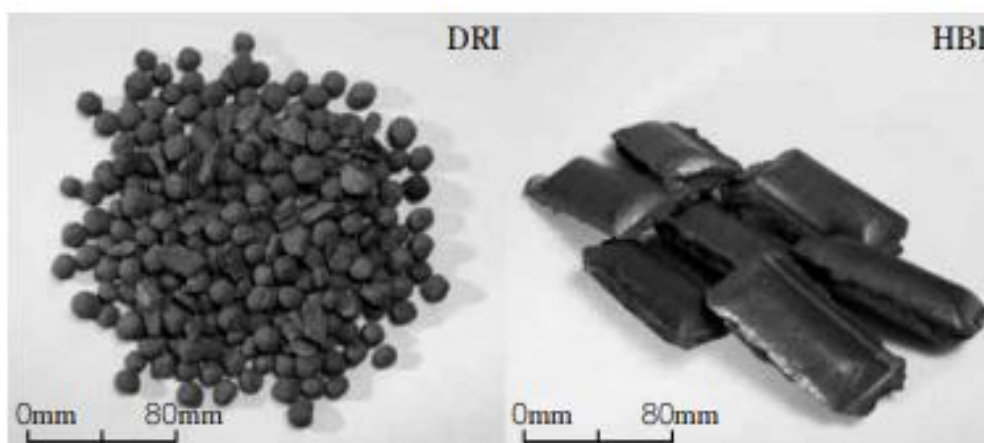
### Характеристики готового продукту DRI та HBI

В таблиці 1.3 наведені дані сформовані автором за матеріалами [23],[24],[25],[26].

Таблиця 1.3 – Характеристики готового продукту DRI та HBI

Показник	DRI	HBI
Вміст заліза (%)	91–94	90–93
Вміст вуглецю (%)	0.5–2.5	0.5–1.5
Щільність (г/см <sup>3</sup> )	2.4–2.6	~5.0
Металізація (%)	>92	>90
Спосіб використання	EAF, комбінований	EAF, експорт

DRI зазвичай використовується у електродугових печах (EAF), а HBI — як стабільна, транспортабельна форма з високою щільністю, зовнішній вигляд на рисунку 1.2.



**Рисунок 1.2** - Порівняння вигляду DRI та HBI. Джерело: [23]

Отже залізо прямого відновлення (DRI/HBI) є ключовим компонентом безкоксової, низьковуглецевої металургії. Технології

прямого відновлення дозволяють істотно знизити викиди CO<sub>2</sub> і забезпечують високу якість металу. Їх розвиток — обов'язкова умова для декарбонізації галузі та збереження конкурентоспроможності на глобальному ринку. Україна, маючи сировинну базу, доступ до газу та прагнення до «зеленого курсу», має всі передумови для впровадження сучасних DRI-технологій.

Під час вибору технології DRI враховується наявність сировини, екологічність рішень та розвиток попиту на продукцію

Таким чином порівнюючи технології виробництва заліза прямого відновлення, розширення продуктового портфелю Компанії для одержання додаткового прибутку шляхом продажу більш маржинального продукту (HBI замість DR окатків) та можливості технічної реалізації для проекту можливо обрати оптимальну технологію та кінцевий продукт.

### 1.3 Принципи управління якістю

Для виробництва прямих відновлених заліза, як і для будь-якої продукції або послуг, що надаються на ринку, стабільна якість продукції має критичне значення [27]: – DRI/HBI використовується як сировина для виплавки сталі в електричних печах, і від його чистоти та ступеня металізації залежить продуктивність та якість сталеплавильного процесу. Управління якістю на DRI/HBI-підприємстві базується на кількох ключових принципах

**Орієнтація на споживача.** Якість визначається вимогами подальших споживачів DRI/HBI – електросталеплавильних цехів і прокатних виробництв, які очікують високого вмісту заліза, мінімуму домішок та передбачуваної поведінки матеріалу в печі. Тому всі процеси – від закупівлі залізородних окатків до зберігання продукції – налаштовані так, щоб кінцевий продукт відповідав цим вимогам.

**Вбудована якість (quality at the source).** Якість забезпечується на кожному етапі технологічного ланцюжка, а не тільки контролем кінцевого

продукту. Це означає суворий відбір і підготовку сировини (окатків з високим вмістом Fe, однорідним гранулометричним складом), підтримання оптимальних параметрів у відновлювальній шахтній печі, а також дбайливе охолодження та брикетування DRI/HBI для збереження його властивостей. Принципи TQM передбачають залучення операторів та інженерів кожної ділянки до відповідальності за якість – наприклад, оператор печі сам контролює атмосферу відновлення і вносить корективи, щоб уникнути недовідновлення окатків або перегріву.

**Постійне покращення і превентивні дії.** Система якості має проактивно (превентивно) запобігати появі браку. На практиці це реалізується через аналіз причин відхилень (методики типу 5 Whys, Ishikawa), регулярні наради якості, впровадження пропозицій від персоналу щодо покращень (що перегукується з Kaizen). Навіть якщо DRI/HBI в цілому відповідає специфікаціям, прагнення до зменшення варіабельності (дух Six Sigma) і підвищення стабільності процесу залишається постійною ціллю.

**Стандарти якості.** Нове виробництво DRI/HBI має свою систему управління якістю відповідно до міжнародних стандартів. Базовим є ISO 9001:2015 – стандарт систем менеджменту якості, який задає вимоги до процесного підходу, документування, аналізу ризиків та постійного вдосконалення [28]. Провідні виробники сталі й заліза сертифікують свої системи за ISO 9001. Наприклад, найбільша металургійна компанія Саудівської Аравії Hadeed (Saudi Iron and Steel Co.) має сертифікат відповідності ISO 9001:2015 на виробництво довгомірного і листового прокату [28]. Аналогічно, Emirates Steel (OAE) запровадила інтегровану систему менеджменту, сертифіковану за ISO 9001 (якість), а також за стандартами екології ISO 14001 і охорони праці ISO 45001 [29]. Впровадження ISO 9001 на DRI-заводі означає, що всі ключові процеси – постачання сировини, виробництво DRI, лабораторний контроль,

відвантаження – будуть формально описані, підконтрольні керівництву, а ефективність цих процесів постійно аналізуватиметься для поліпшення.

Для підприємств, що працюють на глобальних ринках, можуть бути релевантними й галузеві стандарти. Наприклад, якщо залізо прямого відновлення постачається для подальшого виробництва автомобільного листа, то IATF 16949 (стандарт якості для автомобільної промисловості) може бути частиною вимог до системи якості. Автовиробники пред'являють підвищені вимоги до всієї постачальної мережі, тож великі металургійні корпорації проходять сертифікацію і за IATF 16949. Зокрема, деякі прокатні стани ArcelorMittal мають сертифікат IATF 16949 для постачання продукції автовиробникам [30]. Хоча сам DRI не є фінальним автомобільним компонентом, інтеграція DRI-виробництва у ланцюжок створення вартості для автоіндустрії може зумовити впровадження найсуворіших практик якості, передбачених IATF (процеси APQP – планування якості продукції, ретельне управління змінами, відстежуваність продукції, тощо) [31].

У компанії METINVEST одним із ефективних інструментів превентивного управління якістю є система ключових параметрів технології та обладнання (КПТіО) [32]. Вона інтегрована у систему менеджменту якості підприємств, в тому числі ГМК, як базовий елемент контролю стабільності технологічних процесів і мінімізації відхилень продукції від заданих характеристик.

Основні принципи та механізми впровадження КПТіО детально регламентовані у внутрішньому документі “Регламент управління якістю”, що діє на всіх виробничих майданчиках компанії [33].

КПТіО (ключові параметри технології та обладнання) — це визначені підприємством граничні значення параметрів процесу або стану обладнання, які мають критичний вплив на якість продукції, безпеку, екологічність та стабільність виробництва.

Інтеграція КПТІО в систему управління якістю продукції (СУЯ)

Відповідно до "Регламенту управління якістю", КПТІО:

- Визначаються на рівні цехів та погоджуються з Дирекцією з технології та якості;
- Мають чітке зонування параметрів: "зелена", "жовта", "червона" зона (допустимість, контроль, заборона);
- Фіксуються з прив'язкою до об'єкта виробництва (плавка, партія, зміна);
- Служать основою для оцінки відхилень, аудиту та коригувальних дій у межах СУЯ.

**Таким чином,** застосування превентивного управління якістю на новому виробництві НВІ дозволяє не лише мінімізувати відхилення на ранніх етапах процесу, а й інтегрувати якість у систему управління технологією. Подальше дослідження цього процесу вимагає обґрунтованого підходу до вибору методів аналізу та оцінки ефективності, що й зумовлює необхідність розгляду сучасних наукових методів дослідження, адаптованих до умов металургійного виробництва.

Методологія дослідження складається

- **Порівняльний метод:** передбачає зіставлення об'єктів або явищ для виявлення їх подібностей і відмінностей [34]. У контексті наукового аналізу порівняльний підхід дає змогу оцінити ефективність чи властивості різних предметів дослідження, визначити їх переваги та недоліки відносно один одного і зробити обґрунтовані висновки про найкращі альтернативи [35].
- **Системний аналіз:** метод, за якого предмет дослідження розглядається як цілісна система з взаємопов'язаними елементами. Дослідник аналізує структуру, взаємозв'язки та взаємодію компонентів системи, що дозволяє зрозуміти поведінку об'єкта в цілому [35].

Системний підхід забезпечує всебічне охоплення проблеми і допомагає врахувати вплив різних факторів на кінцевий результат.

- **Експертний метод:** полягає у залученні кваліфікованих фахівців та використанні їхнього досвіду для оцінювання явищ чи прогнозування рішень. Застосовується у формі опитувань, інтерв'ю чи експертних панелей, де незалежні експерти надають свої висновки щодо досліджуваної проблеми [36]. Це дозволяє отримати об'єктивну оцінку на основі знань практиків і галузевих фахівців.

- **Статистичний метод:** спирається на збір та аналіз кількісних даних. За допомогою статистичних інструментів проводиться обробка інформації, виявлення закономірностей, тенденцій, кореляцій. Цей метод підсилює обґрунтованість висновків за рахунок математично підтверджених результатів та перевірки гіпотез на основі вибірок даних [35].

- **Економічне обґрунтування:** метод оцінки доцільності чи ефективності рішень з економічної точки зору. Передбачає розрахунок витрат і вигод, аналіз рентабельності, періоду окупності, економічних ризиків. У наукових дослідженнях економічне обґрунтування допомагає перевірити, чи є запропонована технологія або проєкт фінансово доцільними та конкурентоспроможними [36].

- **SWOT-аналіз:** інструмент стратегічного аналізу, який використовується для визначення сильних (Strengths) і слабких (Weaknesses) сторін об'єкта, а також зовнішніх можливостей (Opportunities) і загроз (Threats). SWOT-аналіз дозволяє розробити стратегію дій, базовану на внутрішніх перевагах і недоліках організації чи технології, та максимально використати можливості, усуваючи зовнішні ризики [37]. Результатом SWOT є систематизована оцінка стану об'єкта дослідження з урахуванням внутрішніх і зовнішніх факторів.

- **Бенчмаркінг:** метод порівняльного аналізу, суть якого полягає у зіставленні показників або характеристик власного об'єкта з найкращими практиками чи аналогами (еталонами) в галузі [38]. Бенчмаркінг може охоплювати порівняння технологічних параметрів, продуктивності, витрат, ефективності тощо. Метою є виявлення відставань і визначення напрямів для вдосконалення через перейняття досвіду лідерів. SWOT-аналіз, до речі, часто застосовується як один із методичних інструментів у процесі бенчмаркінгу [39], що підкреслює взаємодоповнюваність цих методів.

## **Висновки**

У результаті аналізу було встановлено, що глобальна металургія зазнає активної трансформації у напрямку декарбонізації. Технології прямого відновлення заліза (DRI), зокрема MIDREX, а також подальше брикетування (HBI), визнані найбільш перспективними шляхами зниження викидів CO<sub>2</sub>. Компанії, як-от SSAB, ArcelorMittal, Metinvest і Ferrexpo, впроваджують нові рішення зі зменшення вуглецевого сліду.

Сучасна система управління якістю (СМЯ) базується на стандартах ISO 9001, ISO 14001 та ISO 45001, які мають синергетичний ефект у забезпеченні безперервного покращення. Методологічна база включає SWOT-аналіз, бенчмаркінг, принципи системного підходу та елементи стратегічного планування. Важливою складовою є фокус на превентивному управлінні якістю на ранніх етапах розробки виробництва.

## 2 АНАЛІЗ УМОВ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ MIDREX НА БАЗІ ЦГЗК

Аналіз сучасних тенденцій розвитку виробництва заліза прямого відновлення (DRI) та гарячебрикетованого заліза (HBI) свідчить, що глобальний перехід до безкокскових і низьковуглецевих технологій у металургії виступає ключовим чинником активізації інвестицій у ці напрями.

### 2.1 Плани будівництва DRI- заводів у світі та ЄС

На основі проведеного узагальнення проектних ініціатив світових лідерів галузі, нижче наведена інформація щодо основних тенденцій та планів із заміни доменних печей на установки DRI-EAF у провідних країнах Європи. Ці проєкти не лише засвідчують актуальність переходу до зеленої металургії, але й формують орієнтири для національного розвитку в цій сфері.

Очікується, що до 2030 року світове виробництво DRI зросте до 175 млн тонн. У Європі реалізуються та плануються до реалізації численні проєкти на заміну доменних печей на установки DRI-EAF, зокрема в Німеччині (Thyssenkrupp), Італії (Metinvest Adria), Швеції (Stegra) та Іспанії (ArcelorMittal) [40] згадані нижче.

#### ✓ Metinvest Adria (Італія)

Локація: Пьомбіно, Італія. Проєкт: Будівництво сучасного заводу з виробництва "зеленої" сталі на основі EAF та DRI. Потужність: 2,7 млн тонн гарячекатаного рулону на рік. Інвестиції: €2,5 млрд. Сировина: Постачання DRI з України [41].

#### ✓ Thyssenkrupp (Німеччина)

Локація: Дуйсбург, Німеччина. Проєкт: Будівництво установки DRI з використанням водню (tkH2Steel). Інвестиції: €2 млрд державного

фінансування та майже €1 млрд власних інвестицій. Статус: Будівництво розпочато, введення в експлуатацію заплановано на 2026 рік [42]

✓ ArcelorMittal

Плани: Інвестиції в "воднево-готові" установки DRI-EAF для заміни доменних печей у Європі. Статус: Проєкт відкладено через політичну, воєнну та ринкову невизначеність [43].

✓ Stegra (Швеція)

Проєкт: Будівництво комерційної установки H<sub>2</sub>-DRI у Бодені, Швеція. Статус: Будівництво триває, запуск заплановано на травень 2026 року [44].

### Потенціал України

Аналіз наявного потенціалу України у сфері виробництва окатків та концентрату дозволяє стверджувати про її стратегічну спроможність відігравати ключову роль у постачанні сировини для DRI-виробництва на європейському ринку. Зокрема, після детального розгляду заявлених проєктів METINBEST, Ferrexpo, ArcelorMittal та Black Iron, окреслюється перспектива інтеграції українських підприємств у ланцюг виробництва «зеленої» сталі.

Україна має вагомий потенціал як у виробництві окатків і концентрату – сировині для DRI, так і в реалізації власних DRI/HBI-проєктів:

- METINBEST планує будівництво двох модулів DRI/HBI в Україні (по 2,5 млн т/рік кожен), а також володіє потужностями з виробництва окатків і концентрату загальним обсягом до 26,5 млн т/рік [45] (**саме цей проєкт буде основою мого дослідження**)

- Ferrexpo адаптує виробництво під DRI окатки, орієнтуючи 20–25% потужностей на ці потреби. Компанія декларує курс на нульові викиди до 2050 року [46].

- ArcelorMittal Кривий Ріг планували до війни будівництво фабрики окатків потужністю 5 млн тонн [47], проект може бути відновлено після стабілізації ситуації [48].
- Black Iron (Канада, Кривий Ріг Шимановське родовище) має проєкт з видобутку високоякісного концентрату (4–8 млн тонн), що очікує інвестицій та припинення бойових дій [49]. В таблиці 2.1 наведено узагальнену інформацію щодо потенційних потужностей з виробництва сировини для DRI в Україні.

Таблиця 2.1 - Потенційні потужності з виробництва сировини для DRI в Україні, млн т

Компанія	Продукт	Потужності, млн т
МЕТИНВЕСТ	Окатки	7.5
МЕТИНВЕСТ	Концентрат 68-70%	19.3
Ferrexpo	Окатки	3,0-5,0
ArcelorMittal Kryvyi Rih	Окатки	5,0
Black Iron	Концентрат 68%	4,0-8,0
Південний ГЗК	Концентрат 68%	3,0

Таблицю 2.1 складено та узагальнено автором за матеріалами [45],[46],[47],[48],[49].

Інвестиції в DRI/HBI. Усвідомлюючи світові тенденції, МЕТИНВЕСТ робить стратегічну ставку на DRI. Компанія уже кілька років вивчає та розробляє проекти з будівництва установок прямого відновлення заліза [50]. Більше того, МЕТИНВЕСТ розглядає різні формати виходу на ринок HBI: від потенційного будівництва власного DRI-модуля в Україні до участі в проєктах за кордоном. Конкретний приклад – план спільно з італійським партнером Danieli побудувати новий металургійний завод у Італії (в м. Пйомбіно) з електропечю, під який українська сторона забезпечуватиме ланцюг постачання сировини [51]. Для цього *“розглядається можливість побудувати завод DRI/HBI в Україні”*, який постачав би брикетоване залізо на експорт [52]. Вартість інвестиції в італійський проєкт оцінюється в €2,5 млрд, а запланована потужність – 2,7 млн тонн сталі на рік [52]. Це

означає, що потреба в DRI-сировині для нього становитиме приблизно 1,5–2 млн тонн на рік – потенційно такий обсяг може забезпечити окремий модуль Midrex в Кривому Розі. METINVEST фактично прагне закріпити за собою роль інтегрованого постачальника: від видобутку залізної руди до виробництва “зеленого” напівфабрикату (HBI) і навіть до виплавки сталі (через партнерство в EAF-заводі).

Лідерство на ринку та синергія з партнерами. METINVEST, володіючи значними ресурсами руди і компетенціями, опинився на чолі трансформації галузі. Компанія вже зараз експортує залізорудну продукцію десяткам клієнтів по світу, а освоївши виробництво HBI – зможе вийти на новий, більш маржинальний ринок. Важливо, що METINVEST кооперується з іншими гравцями: наприклад, Ferrexpo та ArcelorMittal Україна також зацікавлені у розвитку DRI-напрямку [52]. Об’єднавши зусилля, українські виробники можуть створити кластер з виробництва та експорту HBI, здатний конкурувати з традиційними постачальниками (росія, країни Перської затоки, Венесуела). При цьому держава відіграє не останню роль – сприяння у розвитку «зеленої» енергетики та зближення з європейським ринком (механізми фінансування, СВAM тощо) тільки зміцнить позиції лідерів галузі [52].

Резюмуючи, приклад METINVESTу демонструє, як вертикально інтегрована компанія може створити і нарощувати ланцюг доданої вартості у традиційній сировинній сфері, відповідаючи на нові виклики. Від видобутку руди – до виробництва високотехнологічного HBI – кожна ланка контролюється і вдосконалюється, що забезпечує конкурентні переваги. Завдяки цьому METINVEST готовий стати одним із рушіїв «зеленої» металургійної революції в Україні та зайняти нішу провідного постачальника DRI/HBI в Європі [52].

У перспективі Україна здатна постачати 20–25 млн тонн сировини для DRI-виробництва, що може покривати близько 14% очікуваного глобального попиту в найближчі 10 років.

## 2.2 Обґрунтування вибору SWOT-аналізу та бенчмаркінгу для дослідження

У цьому дослідженні, для вибору технології переробки окатків Центрального ГЗК (ЦГЗК) у залізо прямого відновлення (DRI), як ключові методи були обрані SWOT-аналіз та бенчмаркінг. Такий вибір зумовлений специфікою поставлених завдань і дає можливість комплексно оцінити варіанти технологій:

- **SWOT-аналіз:** використовується для всебічної оцінки технології прямого відновлення MIDREX, яка розглядається як кандидат для впровадження. За допомогою SWOT проведено ідентифікацію внутрішніх сильних та слабких сторін даного процесу (наприклад, технологічні переваги, вимоги до сировини, обмеження) і зовнішніх факторів – можливостей та загроз (ринкові умови, екологічні вимоги, потенційні ризики постачання сировини тощо). Такий аналіз висвітлює, наскільки добре технологія MIDREX відповідає умовам та потребам підприємства, і допомагає врахувати чинники, що можуть впливати на успішність її впровадження.

- **Бенчмаркінг:** застосовується для порівняння технології MIDREX з альтернативними технологіями прямого відновлення (зокрема, ENERGIRON, HYBRIT, HYL III та інші). Метою бенчмаркінгу є визначення, як MIDREX виглядає на тлі аналогів за ключовими показниками – такими, як енергоефективність, витрати палива, викиди CO<sub>2</sub>, вимоги до сировини, ступінь освоєності технології та економічні показники. Через зіставлення характеристик та показників різних процесів прямого відновлення, дослідження виявляє їх конкурентні переваги й недоліки. Це надає

об'єктивну основу для обґрунтування вибору оптимальної технології, оскільки рішення спирається на фактичні дані і найкращі галузеві практики.

Застосування саме цих методів є доцільним, оскільки SWOT-аналіз і бенчмаркінг у поєднанні дозволяють спочатку оцінити внутрішній потенціал і зовнішні умови для кожного варіанту, а відтак безпосередньо порівняти альтернативи між собою. Такий підхід забезпечує глибину аналізу (через SWOT) та широту охоплення (через бенчмаркінгове порівняння), що особливо важливо при виборі технології, від якої буде залежати ефективність виробництва DRI.

Бенчмаркінг доступних технологій наведений в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Бенчмаркінг технологій HYBRIT, ENERGIRON та MIDREX

Параметр	HYBRIT	ENERGIRON	MIDREX
Відновник	100% H <sub>2</sub> (водень)	Газ (природний газ/синтез-газ)	Газ (природний газ; є напрацювання для H <sub>2</sub> )
Сировина	Високоякісна залізна руда (DR-пелети, високий вміст Fe)	DR- і BF-окатки, грудкова руда	DR- і BF-окатки, грудкова руда
Викиди CO <sub>2</sub> (кг/кг сталі)	≈0 (практично 5 кг/т через електроди ЕПП)	≈1,1–1,2 (подібно до інших NG-DR)	≈1,1–1,2 (при NG)
Стадія впровадження	Пілот/демонстрація (пілотний завод Luleå 2018–24)	Комерційний (з 1998–2000-х; приклади: Ternium (Мексика), Suez (Єгипет), Nucor (США))	Комерційний (понад 50 років, ~100 установок у 20+ країнах)
Приклади/референси	Пілот Luleå; планується демозавод Гелліваре	Ternium DR-4M (3,2 млн т/рік, Мексика), заводи в Єгипті та США	Tosyali (Алжир), Jindal (Оман) тощо; багато реалізованих проєктів у Європі, Азії та Америці

Бенчмаркінг виконано автором за інформацією наведеною в джерелах [53],[54],[55],[56],[57],[58].

Детальніший аналіз екологічної ефективності сталеплавильних технологій, зокрема порівняння HYBRIT, MIDREX та ENERGIRON у контексті викидів CO<sub>2</sub> та ресурсоспоживання, наведено у спільному дослідженні [59].

## SWOT-аналіз процесу MIDREX для виробництва НВІ

### SWOT-АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ MIDREX ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА НВІ

<p><b>Strengths</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• оптимально відповідає хімічному складу українських окатків ЦГЗК (Fe ≈ 65%) [60], які близькі до стандартних DR-grade (≥67% Fe) і значно чистіші за агломерат</li> <li>• висока гнучкість сировини: вона може використовувати різні типи окатків та грудкову руду без істотного зниження продуктивності</li> <li>• низький вуглецевий слід</li> <li>• перевірена технологія з понад 50-річним досвідом комерційної експлуатації</li> </ul>	<div style="display: flex; flex-wrap: wrap; justify-content: center; align-items: center;"> <div style="background-color: #e0f2f1; padding: 10px; margin: 5px;">S</div> <div style="background-color: #e0f2f1; padding: 10px; margin: 5px;">W</div> <div style="background-color: #e0f2f1; padding: 10px; margin: 5px;">O</div> <div style="background-color: #e0f2f1; padding: 10px; margin: 5px;">T</div> </div>	<p><b>Weaknesses</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• залежить від природного газу як відновника, тож хоча викиди CO<sub>2</sub> і нижчі за доменний, вони все одно ненульові</li> <li>• значних капіталовкладень і складного проектування</li> <li>• існують нові технології з потенційно ще кращими показниками (наприклад, повністю водневі методи), які в майбутньому можуть стати серйозними конкурентами</li> </ul>
<p><b>Opportunities</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Едекарбонізаційна політика ЄС і зростаючий попит на «зелену» сталь</li> <li>• Наявність власної сировинної бази (окатки ЦГЗК) зменшує ризики залежності від імпорту, даючи перевагу при фінансуванні проекту</li> </ul>		<p><b>Threats</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• розвиток альтернативних технологій з нульовими викидами</li> <li>• волатильність цін на енергоносії (газ) та геополітична нестабільність</li> </ul>

Рисунок 2.1 - SWOT-аналіз процесу MIDREX для виробництва НВІ

Розроблено автором на основі обробки джерел [53],[54],[55],[56],[57],[58].

**Сильні сторони:** Процес MIDREX оптимально відповідає хімічному складу українських окатків ЦГЗК (Fe ≈ 65%) [60], які близькі до стандартних DR-grade (≥67% Fe) і значно чистіші за агломерат. MIDREX-установки розраховані на DR-пелети, але успішно працюють і з нижчими марками – blast-furnace (BF) grade (~65% Fe) та навіть грудковою рудою [55]. Завдяки цьому технологія показує високу гнучкість сировини: вона може використовувати різні типи окатків та грудкову руду без істотного зниження продуктивності [55]. Іншим ключовим плюсом є низький вуглецевий слід.

Установка MIDREX на природному газі у парі з електродуговою піччю генерує лише  $\sim 1,1\text{--}1,2$  кг  $\text{CO}_2$  на 1 кг сталі [61] – найнижчий серед комерційних маршрутів виплавки сталі з руди. Це на 40–60% менше, ніж у традиційному доменному циклі [61]. Застосування систем уловлювання  $\text{CO}_2$  може ще знизити викиди до приблизно третини рівня BF/BOF [61]. Нарешті, MIDREX – перевірена технологія з понад 50-річним досвідом комерційної експлуатації [57]. По всьому світу працює майже 100 установок MIDREX у більш ніж 20 країнах [57] (близько 80% світового виробництва HBI). Це забезпечує великий операційний досвід, наявність підготовленого персоналу та доведену надійність обладнання.

**Слабкі сторони:** Процес MIDREX (напрямок MIDREX NG™) поки що залежить від природного газу як відновника, тож хоча викиди  $\text{CO}_2$  і нижчі за доменний, вони все одно ненульові. Коливання цін і постачання газу можуть вплинути на економіку виробництва. Побудова MIDREX-заводу вимагає значних капіталовкладень і складного проектування, що може підвищити первинні витрати. Крім того, для досягнення максимального ККД бажано використовувати високоякісні DR-пелети (67% Fe); перехід на більш бідну сировину може знизити вихід металу. І нарешті, хоч MIDREX має екологічні переваги, існують нові технології з потенційно ще кращими показниками (наприклад, повністю водневі методи), які в майбутньому можуть стати серйозними конкурентами.

**Можливості:** Декарбонізаційна політика ЄС і зростаючий попит на «зелену» сталь створюють сприятливі умови для впровадження MIDREX, який має менший вуглецевий слід. Існуючі MIDREX-заводи можна модернізувати під використання низьковуглецевих відновників (напр., MIDREX  $\text{H}_2$ ™), що додатково знизить викиди [61]. Наявність власної сировинної бази (окатки ЦГЗК) зменшує ризики залежності від імпорту, даючи перевагу при фінансуванні проекту. Також є можливості державної та міжнародної підтримки проєктів сталеливарення з низькими викидами,

що може покращити економічну ефективність впровадження MIDREX в Україні.

**Загрози:** Одна з головних загроз – розвиток альтернативних технологій з нульовими викидами. Наприклад, технологія HYBRIT (SSAB-LKAB-Vattenfall) пройшла пілотний етап (2018–2024) і готується до демонстрації, а промислове освоєння заплановано на наступне десятиліття [56]. Якщо повністю «зелені» маршрути стануть комерційно вигідними, це може зменшити попит на MIDREX. Іншим фактором є волатильність цін на енергоносії (газ) та геополітична нестабільність – у контексті війни перебої з газом можуть ускладнити роботу установки. Також конкуренція на світовому ринку металу з боку виробників «зеленої» сталі і вживання альтернативних технологій (наприклад, більше використання брухту або інших процесів прямого відновлення) можуть знизити привабливість нового MIDREX-виробництва.

**Отже** проведене порівняння ключових промислових технологій прямого відновлення дозволяє зробити висновок про перевагу шахтних печей, зокрема технології MIDREX, яка наразі займає провідне місце у світовому виробництві DRI. Її гнучкість, масштабованість та можливість переходу на водень роблять цю технологію пріоритетною для подальшого дослідження та впровадження в Україні на виробничому майданчику в Кривому Розі з урахуванням локальних техніко-економічних та екологічних умов.

### 2.3 Принцип роботи шахтної печі MIDREX

#### **Зональний поділ і протитечія газ–твердий матеріал.**

Шахтна піч процесу MIDREX – це вертикальний реактор шахтного типу, де окатки залізної руди відновлюються гарячим відновним газом у режимі протитечії. Конструктивно піч поділяється на **верхню частину (зону нагріву та відновлення)** та **нижню частину (зону охолодження)** [62]. Залізородні окатки завантажуються зверху через газощільний

живильник (шлюзовий затвор) та утворюють *рухоме нерухоме* (щільне) загрузне ложе. Вони опускаються вниз **під дією сили тяжіння** зі швидкістю  $\sim 30$  мм/хв, яку контролюють випускними механізмами на дні печі [62]. Однорідне опускання матеріалу забезпечують конструктивні рішення – рівномірний розподіл шихти та газу, спеціальні вставки, що запобігають утворенню «містків» і каналів [63].

**Подання відновлювального газу.** Гарячий відновлювальний газ (багатий воднем  $H_2$  і оксидом вуглецю  $CO$   $\sim 95\%$  сумарно) вводиться через кільцевий колектор (bustle-пояс) у середню частину шахти – на межі зон нагріву/відновлення [62]. Типова температура газу на вході – **850–930 °C**, тиск – **0,1–0,3 МПа** (близько 1–3 атм надлишкових) [62]. Газ проходить крізь зернистий шар окатків **знизу вгору**, тобто протитечійно до руху матеріалу. Вгорі печі газ, що відпрацював (топовий газ), відбирається через газовідвідний патрубок; його температура близько **400–450 °C** [62]. У печі підтримується **помірний надлишковий тиск** (близько +0,1 МПа), щоби уникнути підсосу повітря [63]. Робоча температура в зоні відновлення сягає  **$\sim 950$  °C** [63] – за цих умов відновлення заліза відбувається інтенсивно, але без плавлення (процес твердофазний). При контакті з гарячим газом окатки спершу прогріваються та дегідратуються (видаляється волога), а далі в основній **зоні відновлення** відбувається хімічне відновлення  $Fe_2O_3 \rightarrow Fe$  (реакції з  $CO$  і  $H_2$ ) з виділенням побічних продуктів ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ) [63].

**Час перебування та повнота відновлення.** Окатки проводять у печі кілька годин: типовий *час перебування* матеріалу в зоні відновлення становить **5–6 годин** [63]. За цей період оксид заліза майже повністю перетворюється на металізоване залізо (ступінь металізації  $\sim 92\%$ ) [63]. При необхідності частина відновного газу може подаватися на різні рівні печі (наприклад, додаткові фурми перехідної зони) для оптимізації температурного профілю та карбонізації DRI. На виході з печі (дно шахти) отримують або гаряче відновлене залізо (HDRI  $\sim 700$  °C), або охолоджене

(CDRI  $\sim 50$  °C) залежно від режиму роботи. В процесі MIDREX передбачено можливість одночасного випуску продукції в різних формах – **гарячого брикетування HBI, гарячого HDRI чи холодного DRI** – за потреби [63]. Для виробництва HBI зазвичай DRI випускають гарячим і спрямовують безпосередньо на прес-брикетувальник, оминаючи внутрішнє охолодження.

**Перехідна та охолоджувальна зони.** Нижче основної зони відновлення розташована **перехідна зона** (зона вирівнювання температури та завершення реакцій) і далі – **зона охолодження** у нижній частині шахти. Якщо піч працює в режимі холодного розвантаження, то відновлені окатки (DRI) охолоджуються прямо всередині шахти шляхом продування їх **охолоджувальним газом** протитечією знизу вверх [62]. Охолоджувальний газ циркулює у замкненому контурі окремо від відновлювального: його подають у нижню частину печі при температурі  $< 40$  °C і тиску  $\sim 0,1-0,3$  МПа [62]. Проходячи вгору через шар DRI, цей газ нагрівається (до  $\sim 450$  °C) і охолоджує залізні гранули до  $\sim 50$  °C [62]. Охолоджувальний газ містить певну частку  $\text{CH}_4$  для контрольованої карбонізації DRI під час охолодження. Після виходу з шахти охолоджувальний газ очищується від пилу і знову охолоджується (в газовому охолоджувачі/скрубєрі) до  $\sim 35$  °C, осушується та нагнітається компресором назад у низ шахти [62]. Таким чином, шахтна піч MIDREX забезпечує три основні стадії процесу – **нагрівання/відновлення заліза та карбонізацію** у верхніх двох третинах висоти, а також **охолодження (за необхідності)** в нижній частині [62]. Весь процес відбувається безперервно і керовано, з чітким поділом зон по висоті шахти.

#### ✓ **Параметри вхідної сировини (окатки ЦГЗК, ОГЗК)**

**Розмір та гранулометрія.** В якості сировини використовується **окатки прямого відновлення (DR-окатки)** виробництва Центрального ГЗК (МЕТІНВЕСТ). Вони представляють собою міцні залізородні гранули

правильної форми діаметром близько **10–16 мм**. Більша частина фракції (~85%) знаходиться в інтервалі **10–14 мм** [64], дрібніших <6 мм майже немає (відсіюються на стадії підготовки шихти). Допустимі відхилення за розміром мінімізовані, оскільки однорідна гранулометрія забезпечує рівномірний рух та проникність газу в шахті. Вологість окатків – мінімальна (як правило, < **2 %** після випалу), адже вони піддаються термообробці в процесі виробництва та охолоджуються насухо. Перед подачею в піч окатки можуть зберігатися під відкритим небом, тому нормативна волога не перевищує ~3–4 % (як правило, значно нижча).

**Хімічний склад.** DR-окатки мають підвищений вміст заліза та знижений вміст домішок. Окатки ЦГЗК характеризуються загальним вмістом заліза близько **65–66 % Fe** [64]. Вміст кремнезему та глинозему (кислих оксидів) сумарно становить ~**5,4 %** ( $\text{SiO}_2 \approx 5,2 \%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 0,2\text{--}0,3 \%$ ) [64], що досить низько; основність окатка ~**0,1–0,12** (практично без флюсу). Домішки сірки та фосфору мінімальні: S ~**0,01 %**, P < 0,02 % [64]. Такий хімічний склад відповідає вимогам до сировини для прямого відновлення – **високий вміст Fe ( $\geq 66 \%$ ) та низький рівень шкідливих домішок** [64]. (Для порівняння, окатки доменного призначення мають Fe ~62–64 % і більше кремнезему). Низький вміст кремнезему/глинозему (< 3–4 % сумарно) є важливим, оскільки вся шлакова частина окатку залишається в продукті DRI [55]. Надлишок домішок у DRI небажаний, бо при плавці HBI в електропечі потребуватиме додаткової енергії та збільшить витрату вуглецевих добавок для шлакоутворення [55]. Таким чином, окатки ЦГЗК з підвищеним Fe (~65–67 %) є придатними для технології MIDREX [17], а за потреби сировина може додатково збагачуватися (Концентрат ЦГЗК нині доводиться до 68-69% Fe) [17].

**Механічна міцність.** Окатки для відновлення повинні мати високу міцність на стиск і удар, щоб не руйнуватися під час транспортування та у шахтній печі. DR-окатки ЦГЗК є *міцними та витривалими*: **холодна міцність на стиск** перевищує **250 кг/окаток** (мінімум ~150 даН,

рекомендовано >250 даН) [68]. **Троммельна міцність (твердоть)** також дуже висока: при випробуванні в барабані не менше **95 %** матеріалу залишається цілим (фракція >6,3 мм) [55], дрібних фракцій (<0,5 мм) утворюється не більш ніж кілька відсотків. Це відповідає вимогам MIDREX до *DR-grade* окатків – **TI >94 %**, **AI (<0,5 мм) <5 %**, відсутність крихких окатків [68].

**TI (Tumbler Index)** — це індекс барабанної міцності окатків, який показує, яка частка матеріалу залишається неушкодженою після механічного обертання в спеціальному барабані. **Суть тесту:** окатки поміщають у барабан, який обертається певну кількість разів (наприклад, 200 обертів), і далі оцінюється, яка частка залишилася крупною фракцією (зазвичай >6,3 мм).

**AI (Abrasion Index)** — це **індекс стирання окатків**, який показує, скільки дрібних фракцій утворюється внаслідок тертя між окатками під час транспортування та обробки. **Суть показника:** Вимірюється частка дрібних частинок, що мають розмір менше 0,5 мм, після тесту в обертовому барабані. AI <5 % означає, що не більше 5 % маси окатків перетворюється на дрібний пил.

Висока міцність запобігає утворенню надлишкових пилу й дрібняку, що може викликати *зависання* шару або винесення пилу газами. На практиці, якщо міцність сировини недостатня, це призводить до накопичення дрібних фракцій в печі та збільшення пилу у топовому газі [66], що ускладнює роботу очисних систем. Однак окатки ЦГЗК мають достатню якість – під час пусконаладження НВІ-модуля на Cliffs Toledo, де застосовувалися аналогічні окатки, відхилення по міцності були в межах допустимого [66]. Таким чином, сировина забезпечує стабільну роботу печі: однорідні за розміром і складом окатки з високою міцністю гарантують рівномірне відновлення та високу питому продуктивність шахтної печі.

### ✓ **Енергетичні характеристики процесу**

**Витрати відновлювального газу (природний газ).** Процес MIDREX традиційно працює на природному газі, який служить і сировиною для отримання  $H_2/CO$ , і паливом для підігріву. Специфічна витрата природного газу на 1 тонну DRI/HBI становить приблизно **9,5–10,5 ГДж/т** (нижча теплота згоряння) [67]. Це еквівалентно **~270–300  $nm^3$  природного газу на тонну** продукту (точне значення залежить від складу газу). Сучасні енергоефективні модулі MIDREX досягають навіть **~9,6 ГДж/т** [67] за рахунок рекуперації тепла, що відповідає нижній межі **~260  $nm^3/т$** . Для виробництва **2,5 млн т/рік** HBI при повному навантаженні споживання природного газу складе в середньому порядок **750 млн  $nm^3/рік$** . Частина газу безпосередньо витрачається як паливо (підігрів реформера, пальники) – **~20–30 %** від загалу, решта перетворюється на відновлювальний газ. В процесі діє замкнений цикл: **топовий газ** після печі (містить **~40 %  $CO_2 + H_2O$** ) компримується, змішується з свіжим природним газом і пропускається через реформер, де при **~900 °C** на Ni-катализаторі метан реагує з  $CO_2/H_2O$  до  **$H_2 + CO$**  [62]. Отриманий відновлювальний газ (**~90 %  $H_2+CO$** ) знов нагрівається до **850–900 °C** і подається в піч [62]. Таким чином, процес оптимізований на мінімум витрат газу шляхом рециркуляції. Теоретично для відновлення 1 т Fe потрібен **~2,4 Гкал (10 ГДж)** енергії, що й відповідає показникам MIDREX [67].

**Перехід на водень.** У перспективі можлива робота на *чистому водні* (MIDREX  $H_2$ ). В цьому разі замість реформера передбачено постачання готового водню (з електролізерів або “з-за паркану”). Споживання водню очікується на рівні **600–650  $nm^3$  на 1 т DRI** [68], що приблизно відповідає **54–58 кг  $H_2/т$** . Для модуля 2,5 млн т/рік це означає потребу в **~140–160 тис.  $nm^3/год$   $H_2$** . Енергетично це надзвичайно масштабний запит: наприклад, 2,0 млн т/рік установці потрібен електролізер потужністю **~800 МВт** [68], а для 2,5 млн т – близько **1000 МВт**. Поки що такі обсяги “зеленого” водню недоступні, тому реальні проекти комбінують природний

газ і водень. Технологічно ж MIDREX вже зараз використовує газ з високою часткою  $H_2$  (60–80 %  $H_2$  у відновному газі після реформера) [68]. Перехід на 100 %  $H_2$  з точки зору теплового балансу означає відсутність внутрішнього джерела  $CO_2$  (реформер перетворюється на газовий підігрівач) [68]. Це *знижує калориметричну теплотворність* газу, але реакції відновлення воднем потребують трохи більше тепла (частина реакцій ендотермічна) [63]. Загалом сумарні енерговитрати на 1 т DRI при переході на водень залишаються близько 10 ГДж/т, але перекладаються з хімічної енергії метану на електроенергію для виробництва  $H_2$ .

**Електроспоживання.** Робота установки супроводжується споживанням електроенергії, головним чином на приводи компресорів та насосів. Для великомодульної шахтної печі (потужністю 2+ млн т) середнє **електроспоживання становить ~80–100 кВт·год на тонну DRI** [69]. Звітні дані Midrex показують, що кращі показники досягають **~82–84 кВт·год/т** (наприклад, модуль ArcelorMittal Hamburg працював з такою питомою витратою) [69]. Збільшення продуктивності дещо покращує цей показник за рахунок економії масштабу (компресори працюють ближче до оптимального режиму). Основні споживачі електрики: **циркуляційний газовий компресор** топового газу (нагнітає ~150–200 тис.  $nm^3$ /год газу), **компресор охолоджувального газу**, приводи **дугтєвих вентиляторів реформера**, насосне обладнання системи охолодження, а також **пресибрикетувальники**. На установці HBI частка електрики дещо вища через роботу гідравлічних пресів (6–8 пресів, кожен ~1,5–2 МВт). Втім, у питомих цифрах 80–100 кВт·год/т це вже враховано. Для річного випуску 2,5 млн т електроспоживання оцінюється **~200–250 млн кВт·год/рік**. Використання гарячого DRI (HDR) на сталеплавильному переділі може зменшувати загальне енергоспоживання сталі на ~15–20 % (економія електрики в дуговій печі), але на самому виробництві DRI це не впливає [69].

**Питоме споживання та собівартість.** Загальні питомі енерговитрати на тонну HBI можна резюмувати: природний газ **~2,4 Гкал/т**

(або еквівалент у водні), електроенергія  $\sim 90$  кВт·год/т, допоміжні матеріали – незначні (кисень чи пар для реформера, вода для охолодження – розглянуто нижче). В перерахунку на умовне паливо це відповідає  $\sim 2,6$  Гкал/т. Викиди  $\text{CO}_2$  при традиційному газовому варіанті  $\sim 0,7\text{--}0,9$  т  $\text{CO}_2$ /т сталі (у електропечі з HBI) [67], що в  $\sim 2\text{--}3$  рази нижче, ніж для доменного циклу. Саме тому планований модуль у Кривому Розі розглядається як крок до «зеленої» металургії. Орієнтовні витрати умовного палива на 1 т HBI – близько 280 кг н.е., а електрики – 0,08 МВт·год. З урахуванням українських цін 2025 р. це становить приблизно 160–200 дол./т змінних витрат на енергоносії. Втім, проект має можливість поступового переходу на водень, що в перспективі знизить вуглецевий слід продукції майже до нуля (але економічно доцільно при наявності дешевого «зеленого»  $\text{H}_2$ ).

#### ✓ Технічні характеристики печі та обладнання

**Продуктивність і розміри.** Проектований модуль MIDREX для Кривого Рогу – це установка найбільшої стандартної потужності на сьогодні: **2,5 млн тонн HBI на рік**. Подібні модулі вперше введені в експлуатацію у 2018–2019 рр. (Tosyali, AQS Алжир) і зарекомендували себе як надійні [70]. Шахтна піч такого агрегату має **внутрішній діаметр  $\sim 7,5$  м** [71] і висоту шахти порядку кількох десятків метрів. Це **найбільший діаметр шахтної печі** серед діючих у світі модулів прямого відновлення [71]. Збільшений реактор дозволяє досягти продуктивності  $\sim 300$  тонн DRI на годину (при роботі  $\sim 8000$  год/рік). Практичний рекорд становить  $\sim 7700$  т DRI на добу [70], що було досягнуто на аналогічній печі Tosyali у 2019 р. Піч має товсті сталеві кожухи та **вогнетривке футерування** всередині. У зоні відновлення застосовані високоглиноземисті або інші спеціальні вогнетриви, виконані тонкостінними, щоб збільшити корисний об'єм і зменшити опір газу [63]. Конструкція шахти виключає потребу у водяному

оохолодженні корпусу (навіть для розвантажувальної воронки), що важливо для надійності [63]. Верхня частина шахти оснащена газошільною завантажувальною голівкою з двома послідовними шлюзами для окатків, а нижня – випускним пристроєм (шлюзовий затвор або поворотний плитовий живильник) для дозованого випуску продукту DRI/HBI.

#### ✓ Основне технологічне обладнання

Модуль прямого відновлення містить декілька ключових вузлів і систем:

- **Система підготовки шихти:** Включає бункери сирих окатків (добовий запас), стрічкові живильники та *ситовий комплекс* для видалення дріб'язку/окатишів неправильної фракції ( $> 45$  мм,  $< 6$  мм) [63]. Після грохочення окатки через ваговий живильник подаються у завантажувальний пристрій шахти. Завантаження здійснюється через шлюзову камеру, яка чергує заповнення окатками і продування інертним газом для газошільності. На верхівці печі встановлено розподільчий лоток, що обертається і рівномірно розподіляє окатки по перетину шахти, формуючи однорідне загрузне ложе.

- **Шахтна піч:** Вертикальний циліндричний реактор діаметром  $\sim 7,5$  м, футерований вогнетривами. Вогнетриви для шахтної печі виготовляють із глиноземистих і магнезіальних матеріалів у верхній та середній зонах, з вуглецевих і графітовмісних у зоні відновлення, а також із шпінелей ( $MgAl_2O_4$ ) у нижній частині для стійкості до термоударів та хімічної дії газів. Складається з зон, описаних вище: відновлення (верхні  $\sim 2/3$  висоти) та охолодження (нижня  $\sim 1/3$ ). Посеред висоти шахти розташований **кільцевий газорозподільчий пояс (бустер)** з подвійним рядом фурм для впуску відновлювального газу [63]. Фурми розподіляють газ рівномірно по колу, що забезпечує однорідний потік газу крізь весь переріз печі. Додаткові фурми можуть бути встановлені трохи нижче (у перехідній зоні) для введення вуглеводнів з метою карбонізації (опція –

**впуск природного газу в перехідну зону).** Нижче, під шахтою, знаходиться конусоподібна розвантажувальна воронка, через яку DRI надходить до випускного механізму.

- **Система генерації відновлювального газу:** Серце процесу – **реформер природного газу.** Він являє собою окрему піч (або блок труб), всередині якої у **20–24 трубах** з каталізатором (Ni) відбувається реакція парового риформінгу метану:  $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$  (та ін.) [62]. Реформер підігрівається спалюванням частини природного газу; температура на виході ~900–950 °С. Сира газова суміш для реформера складається з природного газу (~30 %) і рециклованого відпрацьованого (топового) газу (~70 %, попередньо очищеного від пилу та охолодженого) [62]. Ця суміш проходить через каталізаторні труби, де при ~0,2 МПа утворюється відновлювальний газ (~55 %  $\text{H}_2$ , ~36 %  $\text{CO}$ , ~8 %  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ , ~1 %  $\text{CH}_4$ ). Після реформера газ підігрівається (або у тому ж реформері, або окремим нагрівачем) до робочої температури ~850–900 °С і спрямовується в шахту.

- **Система циркуляції та очищення газу:** Включає **топовий газовий скруббер** – апарат для очищення газу, що виходить з вершини шахти. Топовий газ з температурою ~400 °С спочатку проходить через пиловловлювачі (циклонні або вентурі-скруббер), де відділяється значна частка пилу (окатишевого дрібняку, окалини). Далі газ охолоджується і промивається у мокрому скруббері до ~40 °С, при цьому з нього видаляються залишковий пил і водяна пара [62]. Очищений газ (містить ~30–40 %  $\text{CO}_2$ , ~15 %  $\text{H}_2\text{O}$ , решта  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ ) засмоктується **рецикловим компресором** і стискається до ~0,3 МПа для подачі у реформер [62]. Таким чином, формується замкнений газовий цикл. Частина топового газу може відводитися як пального (зайвий  $\text{CO}_2$  і  $\text{N}_2$  не потрібні в процесі) – зазвичай ~30 % газу спалюють в пальниках реформера або відводять на ТЕС. Також у цю систему входять **теплообмінники (рекуператори)** для утилізації тепла газів (наприклад, нагрівання повітря чи технологічного газу), що підвищує загальну ефективність.

- **Система охолодження DRI:** Складається з **контурів циркуляції охолоджувального газу** та/або обладнання для зовнішнього охолодження. При холодному випуску DRI використовується внутрішнє охолодження в шахті: для цього встановлено окремий **охолоджувальний газовий компресор, охолоджувач/скруббер охолоджувального газу** та труби подачі газу в низ шахти [62]. Охолоджувальний газ – це частково топовий газ, змішаний з невеликою кількістю природного газу (для карбонізації). Він циркулює по замкненому циклу: від шахти (450 °C) через **газовий охолоджувач** (де охолоджується водою до ~35 °C) і **осушувач** – назад у компресор, і далі в шахту [62]. Така схема використовується, якщо випускати холодний продукт (CDRI). У разі гарячого брикетування (HBI) ця система працює в мінімальному режимі, адже продукт виходить гарячим. Натомість застосовується **зовнішній охолоджувач HBI** (див. наступний розділ). Важливо, що усі газові тракти оснащені запірною-регулюючою арматурою, запобіжними клапанами і датчиками контролю, аби забезпечити безпечну експлуатацію (детальніше опис – в розділі автоматизації).

- **Брикетувальна та продуктова дільниця:** Для виробництва HBI передбачено окремий вузол – **преси для брикетування**. Гарячий DRI (~700 °C) з шахти направляється через бункер-буфер до машини гарячого брикетування. Зазвичай встановлюється кілька (6–8) гідравлічних валкових пресів діаметром валків ~1 м [66]. Вони стискають пористий HDRI під тиском ~200 МПа, формуючи щільні циліндричні брикети – HBI (типовий розмір ~30 × 50 × 110 мм, густина ~5 г/см<sup>3</sup>). Від пресів брикети вивантажуються на конвеєри повільного охолодження (детально описано в наступному розділі). Після охолодження проводиться **сортування і аспірація**: брикети просіюються на грохотах для видалення дрібних фрагментів (які повертають у процес, переробляючи в брикети з дрібняку), і скеровуються на склад. Зберігання HBI може здійснюватися у критих бункерах або на відкритому складі (HBI хімічно стабільний за умови

низької вологості). Для транспортування готового НВІ з майданчика передбачені конвеєри до пункту відвантаження - в нашому випадку до залізничних вагонів.

**Допоміжне обладнання.** Інші вузли комплексу включають: систему подачі технологічного **кисню** (для пальників реформера, а також для можливого вдування в охолоджувальний контур з метою пасивації продукту), систему подачі **азоту або CO<sub>2</sub>** (для газового ущільнення живильників при завантаженні/розвантаженні – т.зв. *sealing gas* [62], а також для інертного середовища при аварійних ситуаціях), **водооборотний цикл** (насоси, градирні, теплообмінники для охолодження різних потоків – газів, гідравліки пресів, і т.д.), компресорне господарство (повітря для пневмосистем, інструментів), систему **заспокоєння та утилізації пилу** (аспіраційні фільтри, бункери для пилу від скрубєрів). Також є власна **енергогосподарська** інфраструктура: підстанції, газорозподільний пункт, факельна система для аварійного спалювання газу.

Зведемо основні параметри печі та обладнання 2,5 млн т/рік модуля MIDREX:

- **Шахтна піч:** діаметр ~7,5 м; робочий об'єм ~300 м<sup>3</sup>; футеровка – високоалюмінатні вогнетриви; розрахунковий тиск в печі ~0,2 бар надлишковий; два пояси фурм для газу; продуктивність до ~320 т/год [71].
- **Реформер газу:** ~21 труб з никелевим каталізатором; температура виходу 920 °С; споживання природного газу ~280 нм<sup>3</sup>/т.
- **Компресори:** recycle-компресор продуктивністю ~180 тис. нм<sup>3</sup>/год (топовий газ → реформер) + охолоджувальний компресор ~100 тис. нм<sup>3</sup>/год (контур охолодження) [62]; обидва турбокомпресори з електроприводом ~10 МВт кожен.

- **Преси НВІ:** 7 шт (за проектом Primetals для 2 млн т/рік – 7 пресів [72], для 2,5 млн т очікується 8 пресів); тип – ротаційні валкові, зусилля ~1500 т/прес; виробництво – Koppers або аналог.
- **Охолоджуючі конвеєри:** 2 шт плоско-ланцюгових конвеєрів Аумунд довжиною ~72 м кожен [73]; охолодження шляхом розпилення води; температура НВІ: 800 → 100 °С на виході [73].
- **Витрати води:** охолодження НВІ – ~0,15 м³/т; інші потреби (охолоджувач газу, випаровування) – ~0,2 м³/т; передбачено замкнутий цикл з градирнями (у т.ч. морська вода для НВІ-конвеєрів) [72].
- **Допустима сировина:** окатки DR-grade, Fe ≥ 66 %, <5 % SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [64], міцність >250 кг; частка грудкового руди – до 20% (опціонально) [63].
- **Продукт:** НВІ щільністю ~5 г/см³, металізація 92–94 %, вміст вуглецю 1–2 %. Температура брикету після охолодження < 100 °С (зберігання при < 65 °С). Механічні властивості НВІ: міцність на стиск ~> 700 кг/брикет, **RI** (індекс відновлюваності) ~> 85 %.
- **Основне обладнання:** шахта; реформер; топовий скруббер; компресори (топовий, охолоджувальний); теплообмінники рекуперації; бункери окатків; прес-блок НВІ; охолоджуючі конвеєри; системи газопідготовки, водопостачання, електропостачання, КВПіА.

Отже, технологічна схема модуля MIDREX включає всі перелічені елементи, які спільно забезпечують безперервний процес виробництва НВІ з продуктивністю 2,5 млн т/рік. На рис. 2.2 наведено спрощену схему установки прямого відновлення (шахтна піч, риформер, газові контури),

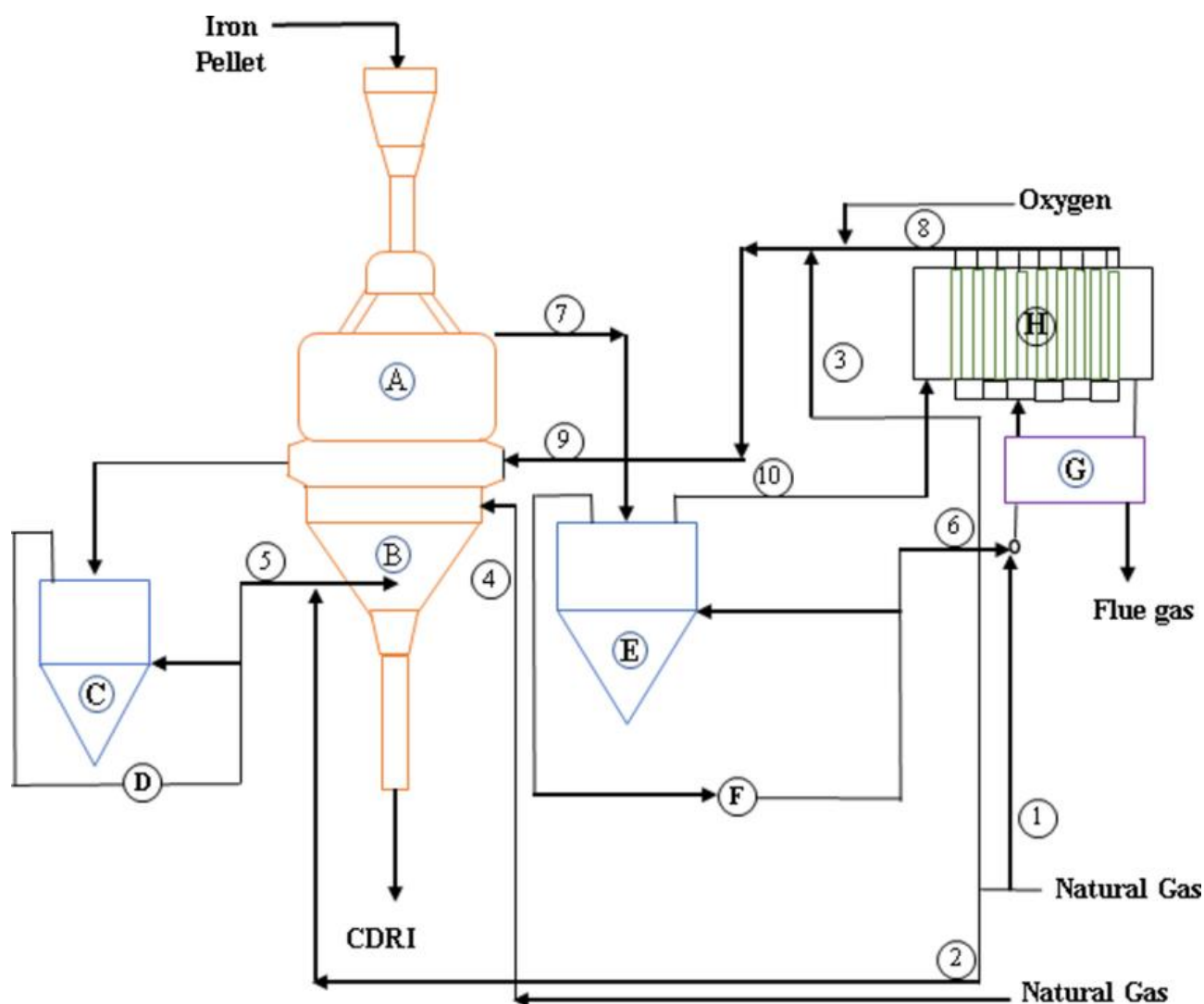


Рисунок 2.2 - Схема основних агрегатів установки MIDREX-NG

A- Шахтна піч (зона відновлення); B- Шахтна піч (зона охолодження); C- Скрубер охолоджуючого газу; D- Компресор охолоджуючого газу; E- Скрубер верхнього газу; F- Компресор процесного газу; G- Рекуператор H- Реформер; 1- Природний газ до реформера; 2- Природний газ до охолоджуючого газу; 3-Природний газ до кільцевого газу (Bustle gas); 4- Природний газ до перехідної зони; 5- Потік охолоджуючого газу; 6- Процесний газ; 7- Верхній газ; 8- Газ реформера; 9- Кільцевий газ (Bustle gas); 10- Верхній газ для палива

Схему приведено автором на основі даних з джерел [73]

✓ Система охолодження та безпечне поводження з НВІ

**Гаряче брикетування і необхідність охолодження.** У технології НВІ відновлене залізо випускається з шахти при високій температурі ( $\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), тому на виході з пресів брикети мають температуру близьку до початкової ( $\approx 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). **Гарячі брикети заліза дуже реакційно здатні** – на повітрі вони можуть окиснюватися з виділенням значної кількості тепла. Тому необхідно негайно та контрольовано охолодити НВІ до безпечної температури ( $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) перед подальшим транспортуванням чи зберіганням [74]. Охолодження повинно бути поступовим, щоб запобігти розвитку внутрішніх тріщин у брикетах через термічний удар – надто швидке гасіння водою може призвести до *розтріскування* і утворення дрібняку. З іншого боку, надто повільне охолодження на повітрі неприпустиме через інтенсивне окиснення Fe (реакція екзотермічна, може викликати саморозігрівання маси брикетів).

**Конвеєрне охолодження з розпиленням води.** На більшості сучасних НВІ- заводів, в тому числі запланованому МЕТІНВЕСТ, застосовується система **повільного конвеєрного охолодження**. Після пресів брикети рівномірно подаються на **пластинчасті охолоджуючі конвеєри** (два паралельні конвеєрні лінії довжиною  $\sim 70$  м кожна). На них організовано **шар водяного туману** – дрібнодисперсні форсунки розпилюють воду на поверхню рухомих брикетів [75]. Вода інтенсивно випаровується, відбираючи тепло у НВІ; при цьому **брикети охолоджуються плавно з  $\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$**  [75]. Важливо, що конвеєри рухаються повільно, забезпечуючи достатній час охолодження («slow cooling» – повний шлях  $\sim 70$  м триває кілька хвилин). За цей час кожен брикет встигає охолонути до безпечної температури. **Повільне охолодження** підвищує якість НВІ – брикети виходять міцнішими і з мінімальною кількістю тріщин [74]. Магальді та Аумунд – виробники такого обладнання – відзначають, що після їхнього “м’якого” охолодження цілісність брикетів зберігається краще, менше утворюється дрібних уламків при подальшому обігу [74].

**Інертне середовище та попередження окиснення.** Суттєва особливість сучасних НВІ-конвеєрів – **герметична конструкція і інертна атмосфера** усередині кожуха. Конвеєр закритого типу, а в його корпус подається інертний газ (зазвичай азот або  $\text{CO}_2$ ) [74]. Це створює безкисневі умови навколо розпечених брикетів і **запобігає їх повторному окисненню** під час охолодження [74]. Дана міра критично важлива для безпеки: без інертного середовища НВІ при  $\sim 500\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$  на повітрі може окиснюватися до  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  з виділенням великого тепла, що загрожує пожежею. Інертний азот виключає таку реакцію. До того ж, відсутність кисню унеможлиблює займання водню, що може виділятися при контакті гарячого заліза з вологою. Таким чином, герметичний конвеєр з азотною продувкою гарантує **відсутність реокиснення і втрат металу** при транспортуванні НВІ всередині охолоджувача [74]. Конструкція конвеєра (наприклад, система Escobelt®) також захищає рухомі частини від контакту з брудною парогазовою сумішшю – вузли приводу ізолювані від зони охолодження, що підвищує надійність у агресивних умовах [74].

**Регулювання температури і витрати охолоджувальних агентів.** Система охолодження оснащена датчиками температури брикетів на різних ділянках конвеєра та на виході. На основі їх показів автоматично регулюється подача води (інтенсивність розпилення) і витрата інертного газу. Якщо брикети охолоджуються занадто швидко (забагато води) – система може зменшити подачу, аби уникнути термошоку. Якщо температура на виході перевищує заданий поріг (наприклад,  $100\text{ }^\circ\text{C}$ ) – інтенсивність зрошення підвищується. Типова витрата води на охолодження складає  **$\sim 0,1\text{--}0,2\text{ м}^3$  на 1 т НВІ**, залежно від продуктивності лінії. Для всього модуля 2,5 млн т/р це близько 250–500 тис.  $\text{м}^3$  води на рік. На практиці використовується оборотна вода: на майданчику встановлюється **система водяного охолодження замкнутого циклу** (насоси, теплообмінники, градирні). Наприклад, в проекті voestalpine Texas, який використовувався для порівняння передбачена спеціальна

схема з використанням морської води в якості охолоджувача для НВІ-конвеєрів [72]. Це дозволяє економити прісну воду: морська вода циркулює через охолодні секції і скидати частково нагрітою назад в затоку (так було зроблено в Техасі). В умовах Кривого Рогу запланований замкнений випаровувальний цикл з градирнями, з певним підживленням сирію водою для компенсації випарування.

**Фінішна обробка і безпека продукту.** Коли НВІ виходить з охолоджувача ( $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), він транспортується далі конвеєрами до складу. На цій стадії інертний газ вже не потрібен – при температурі  $< 80\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$  швидкість окиснення заліза в повітрі незначна. Втім, на деяких установках додатково впроваджується процес *пасивації НВІ*: так зване “**оксидне покриття**” брикетів [72]. Суть його – контрольоване окиснення поверхні залізних брикетів для створення тонкої захисної плівки магнетиту  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , яка запобігає подальшій корозії. Це може здійснюватися зволоженням повітрям або розпиленням дуже дрібною водяною суспензією на вже охолоджені ( $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) брикети. У результаті реакції на поверхні утворюється кілька відсотків залізної окалини, що **знижує реакційну активність НВІ** при тривалому зберіганні чи перевезенні. Даний метод підвищує безпеку транспортування – пасивовані НВІ ще менш схильні до самонагрівання. В будь-якому разі, міжнародні правила перевезення НВІ (код ІМО) вимагають завантажувати брикети охолодженими **нижче  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$**  і з вологістю  $< 0,3\%$ . Запропонований процес це забезпечує – автоматизована система не випустить продукт, доки він не досягне безпечної температури.

**Схема охолодження НВІ.** Брикети з пресів надходять на два паралельні конвеєри, де розпилюється вода (міститься випарна камера під азотом). Після  $\sim 70$  м ходу брикети залишають конвеєр вже холодними ( $\sim 80\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) і прямують далі стрічковим транспортером через грохоти на склад. Вода, що випарувалася в охолоджувачах, відводиться у вигляді пари (через конденсатор) або скидається як тепла вода (в залежності від

системи). Інертний газ (азот) циркулює: подається в початок конвеєра і відсмоктується з іншого кінця, очищується від водяної пари (осушується) та знову використовується. Така схема дозволяє ефективно, економно та безпечно охолоджувати великий потік НВІ, зберігаючи якість продукту.

✓ **Система управління процесом.**

Модуль MIDREX оснащується сучасною **системою керування технологічним процесом (DCS/SCADA)**, що забезпечує автоматичне регулювання і контроль всіх вузлів. На центральному пульті оператори в реальному часі спостерігають за основними параметрами: температурами в зонах печі, тиском газу в шахті і трубопроводах, витратами газу, води, електричними навантаженнями обладнання тощо. Більшість регулювань – автоматичні по заданих рецептах. Наприклад, підтримується стабільна температура газу перед шахтою (~900 °С) шляхом керування пальниками реформера; витрата газу в печі регулюється згідно з продуктивністю; рівень матеріалу в шахті контролюється по різниці тисків або радарними датчиками, і підтримується через сигнал на завантажувальні затвори. **Температурні датчики (термопари)** встановлені у: верхній частині шахти (топовий газ), в області бюста (газ до печі), в нижній зоні (охолоджувальний газ), на виході з пресів НВІ, на охолоджуючих конвеєрах (кілька точок), у газових каналах після реформера, на вході і виході газових скрубєрів тощо. **Манометри/датчики тиску** відслідковують: тиск у шахті, тиск перед фурмами, перепад тиску на шарі (для контролю стану шару окатків), тиск в трубопроводах реформера, компресорів, інертного газу, ущільнюючого газу. **Витратоміри** встановлені на всіх ключових потоках: витрата природного газу, кисню до реформера, водню (якщо домішується), оборотного газу, охолоджувального газу, води для охолодження (через форсунки), азоту на інертне середовище, повітря на пальники тощо. **Рівнеміри** використовуються в бункерах окатків і продукту, а також для контролю рівня води у ємностях (скрубєри, бак випарного охолодження). **Газоаналізатори** безперервно вимірюють склад газу: наприклад, %CO,

CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> у топовому газі (для оптимізації режиму реформінгу), вміст O<sub>2</sub> (для безпеки – має бути 0 в процесі), вміст H<sub>2</sub>% у відновному газі (щоб контролювати ступінь реформінгу), вміст CO<sub>2</sub> у випускному газі (індикатор ступеня конверсії). Також аналізатори H<sub>2</sub>/CO можуть бути на виході охолоджуючого газу – для контролю карбонізації DRI.

**SCADA/PLC контроль і регулювання.** Система управляється за допомогою промислових контролерів (зазвичай використовують на Активаї Siemens чи Rockwell) з резервуванням. Інтерфейс SCADA в операторській дозволяє задавати уставки і отримувати тривожні сигналізації. Наприклад, якщо *перепад тиску на шарі* зростає (ознака можливої кірки або закладу матеріалу), система тривожить операторів і може зменшити подачу окатків. Якщо *температура в певній зоні* виходить за межі (скажімо, перегрів у шахті >1000 °C), автоматика скоригує витрату газу чи ввімкне аварійне зрошення. Безпека забезпечується багаторівневими блокуваннями: при відхиленнях тиску газу, падінні полум'я в реформері, зупинці компресора – спрацьовує автоматичне аварійне розвантаження печі (зупинка подачі окатків, інертне продування і т.п.). Система має також *Аварійну захистову систему (ESD)*, яка в критичних випадках (наприклад, раптове знеструмлення) продуває шахту інертним газом і запобігає вибухонебезпечним ситуаціям. Всі ключові клапани і приводи дубльовані, є резервні дизель-насоси на випадок зникнення електрики (для забезпечення охолодження пресів та ін.).

**Цифрові технології і Industry 4.0.** Новітні установки MIDREX інтегруються в концепцію «цифрового виробництва». Зокрема, впроваджена платформа **MidrexConnect™** – хмарний сервіс збору і аналізу даних роботи обладнання [76]. Всі датчики та процесові показники в реальному часі передаються в єдину базу даних, доступну як персоналу Активу, так і інженерам Midrex. Це дозволяє здійснювати **віддалений моніторинг** і підтримку: експерти Midrex можуть аналізувати тренди, давати рекомендації щодо оптимізації режимів або обслуговування. На

основі великих даних експлуатації будується **цифровий двійник** процесу – математична модель шахтної печі та допоміжних систем, що оновлюється в реальному часі. Такий *digital twin* здатен прогнозувати поведінку процесу при різних сценаріях, виявляти відхилення до того, як вони стануть критичними. Наприклад, модель може передбачити тенденцію зниження металізації чи росту вмісту FeO в DRI та рекомендувати корекцію температури або співвідношення H<sub>2</sub>/CO в газі. Це підвищує гнучкість і стабільність роботи. **Предиктивна діагностика обладнання** – ще один елемент Industry 4.0 на цьому модулі. Вібраційні датчики на компресорах, пресах, привідних двигунах передають дані в систему, де спеціальні алгоритми (або ШІ) аналізують їх і прогнозують необхідність ремонту. Таким чином, обслуговування переходить на проактивний режим – обслуговування за станом, що знижує ризик незапланованих простоїв.

**Інтеграція в виробничу екосистему.** HBI-модуль буде пов'язаний з іншими підрозділами (збагачення залізної руди, сталеплавильний переділ) через загальнозаводську систему управління виробництвом (MES). Це дозволяє оптимізувати логістику: наприклад, **смарт-планування** подачі окатків з ЦГЗК, контроль запасів в бункерах в режимі онлайн, планування відвантажень HBI за графіком. Дані по якості продукту (хімсклад, металізація) автоматично передаються до споживачів (якщо HBI експортується – сертифікати формуються на основі даних лабораторії, прив'язаних до партій в MES). Також, враховуючи стратегічний курс METINVESTу, установка матиме систему **екологічного моніторингу** – онлайн-вимірювання викидів (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) і інтеграцію цих даних у корпоративну систему звітності ESG.

На завершення, варто підкреслити, що ступінь автоматизації даного HBI-комплексу – доволі високий. Людський фактор зведено до мінімуму: операторам більше відведена роль наглядачів та диспетчерів, а рутинні регулювання здійснює автоматика. Сучасні цифрові рішення (віддалена

аналітика, моделі процесу) додають прозорості процесу і дозволяють досягти оптимальних показників продуктивності, якості та безпеки. MIDREX, будучи лідером у сфері прямого відновлення, активно впроваджує такі інновації, тож Криворізький проект стане одним з флагманів **Industry 4.0 в металургії** України [76].

#### 2.4 Превентивне управління якістю

Для забезпечення вищенаведених переваг необхідна **система управління, зорієнтована на ключові параметри технології і обладнання (КПТіО)**. На кожному етапі виробництва НВІ контролюють критичні показники: на стадії збагачення і обпалення – хімічний склад і міцність окатишів; в реакторі відновлення – температуру і склад відновлювального газу, час перебування пелет; на пресах гарячого брикетування – температуру, тиск і швидкість ущільнення брикету. Стандартизована система (наприклад, з дотриманням ISO 9001) гарантує, що ці показники постійно відповідають технологічним нормативам.

Практика підтверджує, що такий підхід дає стабільний результат. Наприклад, при виконанні гарантійних випробувань новітнього заводу Voestalpine (Corpus Christi, Texas) усі критичні параметри контролювалися відповідно до специфікацій. Було виміряно продуктивність НВІ, фізико-хімічні характеристики брикетів, споживання газу й електроенергії, якість води та викиди – і завод досяг 100 % гарантованих показників [77]. Це свідчить про те, що технологічна база та процеси добре налагоджені.

Порівняння існуючих параметрів та параметрів, запропонованих як необхідні для подальшої переробки на НВІ наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняння існуючих параметрів та параметрів, запропонованих як необхідні для подальшої переробки на НВІ

Параметр	Поточні окатки ЦГОК	Рекомендації для НВІ
Fe (загальний), %	~67,5	67–68
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	≈ 2–3 (оцінно)	≤ 3
FeO, %	≈ 1–2 (оцінно)	≤ 1 (для високої металізації)
Пористість, %	≈ 15–20 (характ. ВФ-пелетам)	25–30 (для кращої пропускнуої здатності газу)
Холодна міцність стисну, кгс	~300 (≈2900 Н)	≥ 250
Гаряча міцність, % (>6,3 мм)	~90	≥ 90–95

Порівняння складено автором на основі даних [62],[78],[79].

Стабільна технологічна платформа НВІ також дозволяє гнучко управляти ринками та цінами. Оскільки постачальник завжди видає передбачуваний за якістю і кількістю продукт, він може вільно змінювати частку реалізації на різних ринках або регулювати ціну відповідно до умов попиту. Наприклад, один і той же завод може переорієнтуватися між внутрішніми потребами й експортом, маючи незалежний механізм контролю всіх критичних параметрів. **Таким чином, система КПТіО забезпечує і передбачуваність якості, і можливість стратегічного управління поставками та ціноутворенням.**

Таким чином, впровадження превентивного підходу до управління якістю на основі визначення та контролю ключових параметрів технології й обладнання (КПТіО) є незмінною складовою формування більш широкої інтегрованої системи менеджменту, що поєднує вимоги стандартів ISO 9001, ISO 14001 та ISO 45001 і забезпечує сталу якість продукції, екологічну безпеку та охорону праці на всіх етапах виробничого циклу.

### Інтегрований підхід до систем менеджменту (ICM)

Цей підхід поєднує вимоги ISO 9001, 14001 та 45001, що знижує дублювання процедур і скорочує операційні витрати, схематично подано на рисунку 2.3.

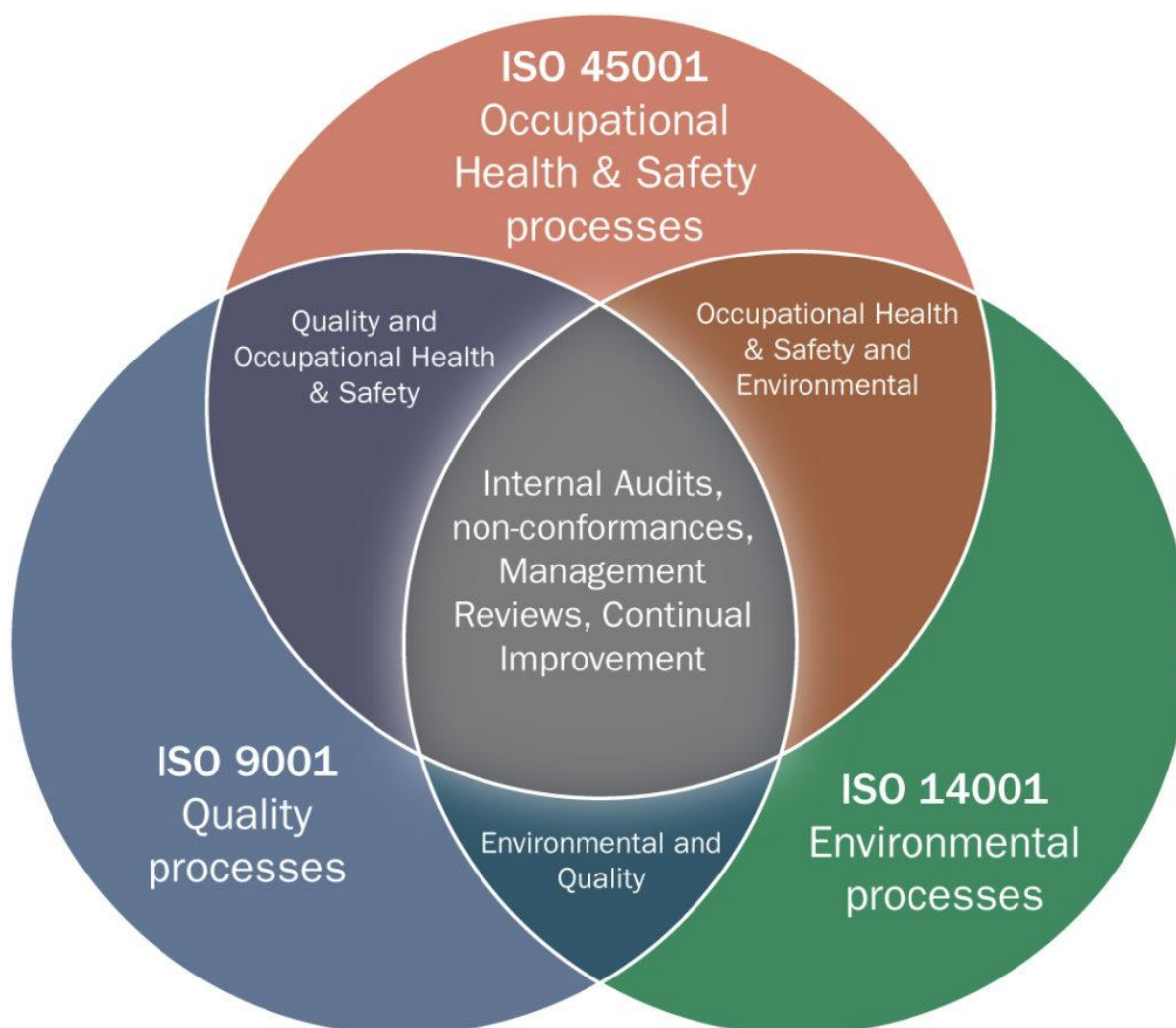


Рисунок 2.3 - Інтегрована система менеджменту (ISO 9001 + ISO 14001 + ISO 45001) з перекриттям сфер якості, охорони праці та екології

Схему наведено автором за інформацією [80].

За практикою МЕТІНБЕСТу, станом на кінець 2023 р. у групі сертифіковано 14 підприємств за ISO 9001 (якості) [81], 16 – за ISO 14001 (екології) [81] і 16 – за ISO 45001 (охорони праці) [18]. Це свідчить про масштаб робіт із впровадження та підтримки СМЯ в групі. Максимальна автоматизація контролю процесів (SCADA/PLC/MES) знижує ймовірність

людських помилок, однак потребує витрат на технічний супровід відповідних систем.

### **Витрати на впровадження та підтримку СМЯ**

Первинне навчання персоналу. Навчальні курси для менеджерів, внутрішніх аудиторів та операторів СМЯ – необхідна частина впровадження. Так, МЕТІНВЕСТ у 2023 р. навчав ~3,500 співробітників із якості [81]; для НВІ-заводу обсяг буде меншим, але значущим. Припустимо, буде навчено ~200–300 осіб (керівники і служби якості, IT-спеціалісти, оператори). Вартість професійних тренінгів (кілька днів) може сягати ~\$150–500 на людину, тобто загальна сума може становити декілька десятків тисяч доларів.

Внутрішній аудит СМЯ. Для підтвердження відповідності стандартам необхідно проводити внутрішні аудити щорічно. Вартість залежить від залучення викладачів або зовнішніх фахівців. Типові оцінки — ~\$10–20 тис. на перший аудит і ~\$8–15 тис. на рік для наступних перевірок [82]. За три роки (десять-двадцять аудитів) загальні витрати можуть скласти \$30–45 тис.

Зовнішній аудит/сертифікація. Первинний сертифікаційний аудит (стадії 1+2) проводить акредитований орган – його вартість теж близько \$10–20 тис. [82]. Щорічні наглядові аудити (два рази на три роки) вимагають ~\$8–15 тис. на рік [82]. Наприклад, для компанії з ~100–200 співробітниками оцінюють повну сертифікацію ISO 9001 у \$11–13 тис [83], а ISO 14001 – у \$12–15 тис [84] (за весь 3-річний цикл). Для великого заводу витрати будуть вищими пропорційно розміру. У підсумку, три роки сертифікації всіх трьох стандартів можуть коштувати кілька десятків тисяч доларів.

Управління документацією. Стандарти ISO вимагають значного обсягу регламентуючих документів (політики, процедури, журнали тощо). Створення та підтримка такої документації потребує додаткових витрат

робочого часу персоналу. Дослідження показують, що впровадження ISO 14001 тягне за собою значні трудовитрати на ведення документів [84]. Додатково можуть знадобитися ліцензії на софт документ-менеджмент або електронний реєстр. Орієнтовні витрати на систему документообігу – \$10–20 тис. за трирічний період.

Технічна підтримка АСУ ТП (SCADA/PLC/MES). Автоматизація процесів вимагає постійного супроводу: оновлення програмного забезпечення, сервісне обслуговування контролерів, заміна комплектуючих. За галузевими даними, типові витрати на супровід промислової автоматизації складають невелику частку CAPEX (порядку 2–5% щорічно). В грошовому вираженні це може бути ~\$10–20 тис. на рік, тобто \$30–60 тис. за три роки.

На основі цих оцінок автором було складено зведену таблицю 2.4:

Таблиця 2.4 – Зведена таблиця витрат на впровадження СМЯ на виробництві НВІ

Стаття витрат	Орієнтовна сума (USD, 3 роки)
Первинне навчання (~150 осіб)	\$15 000–\$25 000
Внутрішні аудити (3 роки)	~\$30 000–\$45 000
Зовнішня первина сертифікація (1+2 стадія) + супровід – <b>одноразово при інтеграції в ЦГЗК</b>	~\$15 000–\$25 000
Надзорна сертифікація <b>2 рази на цикл, загальна для ЦГЗК</b>	~\$30 000–\$50 000
Документообіг (програмне забезпечення, папір)	~\$1 000–\$2 000
Підтримка АСУ ТП (ліцензії, сервіс)	~\$30 000–\$60 000
Всього витрат на СМЯ (3 роки)	~\$120 000–\$257 000

#### **Порівняння витрат із можливими втратами**

Загальні витрати на СМЯ за 3-річний цикл становить близько 260 тис. доларів. Натомість наслідки неякісного управління можуть бути набагато більшими. За оцінками ASQ, витрати на брак та інші проблеми якості часто складають 15–20% виручки [85]. Для НВІ-заводу з виручкою ~\$1 млрд/рік (2 млн т × ~\$500/т) навіть 1% виручки – це ~\$10 млн. Галузеві дані

свідчать, що серйозні відхилення якості НВІ можуть коштувати близько \$3–5 на тонну (приблизно \$6–10 млн за 2 млн т за рік). Отже, можливі втрати від браку, рекламацій і зниження довіри споживачів наведені в таблиці 2.5 і можуть сягати \$6–30 млн за три роки (1–3% виручки).

Таблиця 2.5 - Порівняльна таблиця витрат/втрат на впровадження СМЯ

Категорія	Сума (USD, 3 роки)
Витрати на СМЯ	~\$120 000–\$257 000
Втрати без ефективного СМЯ	~\$6 000 000–\$30 000 000

Як видно, найгірший сценарій втрат у разі відсутності СМЯ (десятки мільйонів доларів) у десятки-сотні разів перевищує витрати на реалізацію і підтримку СМЯ. Навіть верхня оцінка витрат на впровадження – менш ніж 0,1% річної виручки – є мізерною порівняно з масштабними збитками. Таким чином, економічне виправдання інвестицій у СМЯ очевидне: запобігання рекламаціям і підвищення якості окупиться уникненням великих фінансових та репутаційних ризиків [85].

**Отже**, вдосконалена інтегрована СМЯ на новому НВІ-проекті ЦГОК із високим рівнем автоматизації контролю обіцяє збільшити продуктивність і надійність виробництва. Наведені розрахунки (з урахуванням практик METINVESTу) [81] показують, що співвідношення «витрати – запобігання втратам» є більш ніж виправданим. Інвестиції в навчання, сертифікацію та підтримку СМЯ повністю компенсуються зменшенням позапланових витрат і підвищенням іміджу підприємства та Групи на ринку.

2.5 Економічна доцільність впровадження нового виробництва НВІ MIDREX у Кривому Розі з урахуванням приросту доданої вартості

Створення в Україні нового виробництва НВІ за технологією MIDREX має ґрунтуватися не лише на екологічних аргументах, а й на чітких

економічних передумовах, особливо з урахуванням запровадження в Європейському Союзі механізму прикордонного вуглецевого коригування (СВАМ). У цьому контексті доцільним є аналіз стратегічних факторів, що впливають на доцільність реалізації проєкту, економічних наслідків дії СВАМ та перспектив конкурентоспроможності українського НВІ на світовому ринку. При цьому створення доданої вартості в межах українського виробничого ланцюга, поряд із податковими надходженнями, виступає одним із ключових економічних мотивів такого індустріального переходу.

### Ланцюг створення доданої вартості: від концентрату до НВІ

Графік, що ілюструє ланцюг створення доданої вартості: від залізного концентрату до гарячебрикетованого заліза (НВІ). Видно, що основне зростання ціни відбувається на етапі виробництва ЗПВ — ключовий етап для економічного ефекту в безкоксівій металургії.

Ланцюг створення вартості: Концентрат → окатки → DRI → НВІ → споживач EAF (зростання ціни з ~\$100 до ~\$400/т)

Формування ланцюга доданої вартості: приклад циклу «руда – окатки – DRI/НВІ» у Кривому Розі наведено на рисунку 2.4 та таблиці 2.6.

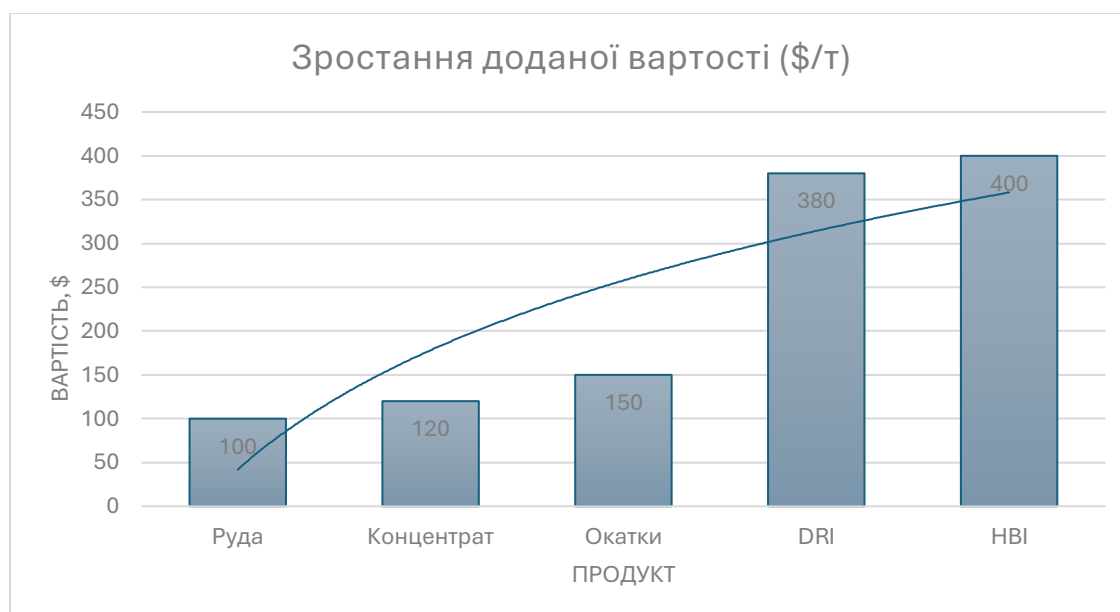


Рисунок 2.4 - Ланцюг створення доданої вартості

Розроблено автором на основі аналізу даних наведених в джерелах [18], [23], [63]

#### 1) Сировина: Залізний концентрат

Вміст заліза: ~65–68%, Отримується шляхом збагачення залізної руди (магнітна сепарація, флотація), Основні виробники: Ferrexpo, METINVEST., Цінність: базова, низька додана вартість, **Ціна: ~\$80–120/т** (залежно від ринку та якості).

#### 2) Окатки (Pellets)

Вміст заліза: 63–68%, форма — сферичні тіла діаметром ~10–15 мм, Виробляються із концентрату з додаванням в'язучих (бентоніт, вапняк), обпалюються в печах при ~1300–1350°C., Види: *Бласт-фурнес окатки* (для доменних печей), *DRI-грейд окатки* — з високим Fe та низьким вмістом домішок, Додана вартість: +20–30% до концентрату, **Ціна: ~\$120–150/т.**

#### 3) DRI/ЗПВ (Залізо прямого відновлення)

Вміст Fe: ~90–94%, низький вміст домішок, форма — пориста гранула, Отримується шляхом відновлення окатків природним газом (H<sub>2</sub>/CO) без плавлення в реакторах типу MIDREX/HYL., Продукт із високою доданою вартістю, який є альтернативою чавуну, Застосовується в електропечах (EAF) для виплавки сталі, Додана вартість: +80–120% до вартості окатків, **Ціна: ~\$250–380/т** (залежно від вмісту Fe та вуглецю, регіону, ринку).

#### 4) ГБЖ (HBI — Hot Briquetted Iron)

Компресоване DRI для зменшення реактивності, кращої логістики, Має ті ж властивості, що й DRI, але стабільніший для транспортування., Логістична перевага: не окиснюється та не самозаймається, тому може експортуватися на далекі відстані (ЄС, Азія), **Ціна: ~\$300–400/т.**, Додана вартість: +15–20% до DRI.

Таблиця 2.6 - Зведена таблиця доданої вартості

Етап	Сировина	Продукт	Орієнтовна ціна (\$/т)	Зростання вартості (%)
1. Концентрат	Руда	Концентрат	80–120	—
2. Окатки	Концентрат	Окатки	120–150	+30%
3. DRI/ЗПВ	Окатки	ЗПВ	250–380	<b>+90–120%</b>
4. ГБЖ (HBI)	ЗПВ	ГБЖ	300–400	+15–20%

Розроблено автором на основі аналізу даних наведених в джерелах [18], [23], [63]]

Найбільший стрибок доданої вартості відбувається на етапі прямого відновлення заліза.

Стратегічно важливо, що нове HBI-виробництво планується локалізувати в Кривому Розі, поруч із базою сировини. Завдяки цьому забезпечується безперебійне постачання окатків на відновлення без додаткових витрат на далеку логістику. Криворізькі ГЗК зможуть прямо подавати DR-окатки на установку, мінімізуючи час і витрати транспортування. Таке сусідство є значною перевагою над конкурентами, які часто змушені імпортувати окатки за тисячі кілометрів. Таким чином, увесь цикл – від шахти до отримання HBI – замкнено в одному регіоні, що створює ефект «кластера». Окрім економії на транспортуванні, кластеризація дозволяє ефективно використовувати інфраструктуру (енергомережі, газопостачання, залізницю) та спільно вирішувати екологічні питання. Все це підвищує конкурентоспроможність продукції на світових ринках.

#### Ринки збуту DRI/HBI: Україна та міжнародні споживачі

Внутрішні споживачі. Частина продукції DRI/HBI, виробленої в Україні, може споживатися всередині країни, насамперед на електросталеплавильних підприємствах. Сьогодні частка електродугових печей (EAF) в українській металургії поки що невелика, адже основні

заводи традиційно працювали за доменним циклом. Проте тренд декарбонізації стимулює появу нових EAF-потужностей. Наприклад, Група METINVEST після втрати мартенівських і конвертерних потужностей в Маріуполі планує будувати сучасний електросталеплавильний комплекс (завод із EAF) у співпраці з Danieli [5]. Очікується, що такий майбутній металургійний завод в Італії споживатиме DRI як основну сировину замість чавуну. В Україні ж потенційними споживачами можуть стати, з одного боку, існуючі підприємства, що працюють на брехті (наприклад, електросталеплавильний завод «Інтерпайп Сталь» у Дніпрі), а з іншого – можливі нові EAF-міні-заводи, які можуть з'явитися в процесі післявоєнної відбудови та модернізації галузі. DRI/HBI може частково заміщувати брехт, якість і кількість якого обмежені. Таким чином, розвиток внутрішнього ринку електрометалургії в Україні йтиме пліч-о-пліч із розвитком виробництва заліза прямого відновлення.

Зовнішні ринки. Основний стратегічний потенціал українського DRI/HBI – це експорт, особливо на тлі глобального переходу до «зеленої» металургії. *Європейський Союз* розглядається як ключовий ринок збуту. Попит на DRI/HBI в Європі стрімко зростає, оскільки тамтешні сталевиробники декарбонізують виробництво: впроваджують DRI-печі замість домен і стикаються з дефіцитом металургійної сировини з низьким вуглецевим слідом [5]. Європа традиційно залежить від брехту, але високоякісного брехту не вистачає, і його ціна зростає [5]. Тому європейці все більше орієнтуються на альтернативні метали – такі як HBI, DRI та навіть чавун – для зарядки електродугових печей. Україна ж завдяки близькості, наявності сировини та компетенцій має унікальну можливість стати постачальником цих товарів до ЄС [5]. Аналітики GMK Center прогнозують, що вже в середньостроковій перспективі Україна може постачати 20–25 млн тонн сировини для DRI на рік, інтегруючись у нові «зелені» ланцюги доданої вартості Європи [5]. При цьому йдеться як про поставки окатків для європейських DRI-проектів, так і про прямі поставки

українського HBI. Як зазначає Станіслав Зінченко (CEO GMK Center), заміщення експорту українського чавуну на постачання «зеленого» HBI до ЄС дозволить Україні стати частиною європейських зелених ланцюгів вартості, але для цього українським компаніям потрібен доступ до інвестиційних ресурсів ЄС [5]. Існує вже конкретний приклад співпраці: METINVEST та італійська Danieli планують побудувати в Італії металургійний завод з EAF, сировину для якого (DR-окатки або HBI) постачатимуть із Кривого Рогу [5]. Це підкреслює роль України як бази для забезпечення європейської «зеленої» металургії напівфабрикатами нового покоління.

Окрім ЄС, перспективними залишаються інші зовнішні ринки. Туреччина – один із найбільших світових виробників сталі в електропечах – традиційно імпортує значні обсяги брухту, проте все активніше дивиться в бік імпорту чавуну та HBI для диверсифікації шихти. За даними галузевої статистики, у 2023–2024 рр. турецькі металурги закуповували HBI/DRI за ціною близько \$320–330/т, що було конкурентним відносно брухту [86]. Українське HBI може зацікавити турецький ринок за умови налагодження стабільних поставок через порти Чорного моря. Близький Схід та Північна Африка – регіони, де історично розвинене виробництво DRI (наприклад, в Ірані, Катарі, ОАЕ) і деякі країни мають надлишок DRI/HBI для експорту. Конкуренція там висока, але водночас країни Перської затоки розширюють EAF-потужності і потенційно можуть імпортувати окатки або HBI при дефіциті власної сировини. Україна вже має досвід експорту окатків до регіону MENA, тож у майбутньому може запропонувати і готове HBI. Що стосується Азії, то Китай – найбільший виробник сталі – наразі обмежено цікавиться імпортом DRI/HBI через орієнтацію на доменний цикл та внутрішній чавун [86]. Однак інші азійські країни зі зростаючим EAF-сектором (Індія, Південно-Східна Азія) можуть стати покупцями. Зокрема, Індія анонсує десятки мільйонів тонн нових DRI-проектів до 2030 року, а це сприятиме глобальному попиту на окатки й HBI [5]. Таким чином,

географія збуту українського DRI/HBI може бути досить широкою, але найбільш ємним і прибутковим ринком у наступні десятиліття залишатиметься Європа через її курс на «зелену» сталь.

### **Гнучкість HBI/DRI як інструмент управління ланцюгом створення вартості**

HBI (гаряче брикетоване залізо) – це спресована форма непрямо відновленого заліза (DRI) з **однорідними хімічними та фізичними властивостями**. Його виробляють спеціально для перевезення на великі відстані та подальшого плавлення у різних печах (EAF, IF чи BF), а хімічний склад продукту сертифікується виробником за вимогами ISO [87]. HBI виготовляється без плавлення (без нагрівання до рідкого стану), тому майже не містить домішок від коксового палива, вапняку чи металобрухту. Залежно від характеристики вихідної руди вміст небажаних елементів (сірки, фосфору, міді, хрому, нікелю тощо) в HBI залишається дуже низьким [87]. У результаті сталеплавильник отримує високочистий відновлений залізний метал зі стабільними властивостями, що створює суттєву **додану вартість** порівняно з нерегулярними партіями ломового металу чи чавуну.

Ключовими перевагами HBI як високододаного продукту є (перелічені умовно):

- **Чистота та сталість складу:** HBI не містить домішок коксу чи шлаку, властивих чавунам, тому дає сталі вищої якості [87].
- **Покращена рентабельність:** використання HBI дає змогу отримувати стабільні за якістю сталі, які неможливо виробляти тільки зі старих сортів брухту, або навпаки – застосовувати дешевший лом при зниженні частки домішок HBI [87].
- **Операційна гнучкість:** HBI сумісний з усіма режимами плавки – може подаватися у IF чи EAF безперервним чи пакетним способом [87]. Він

сприяє утворенню пінистого шлаку і захищає футеровку печей, сумісний з технологіями впорскування палива й кисню [87].

- **Експлуатаційні переваги:** висока щільність ( $\sim 5,0 \text{ г/см}^3$ ) дозволяє швидко проникати крізь шар шлаку; НВІ на 100 разів стійкіший до повторного окиснення та на 75 % менше адсорбує вологи порівняно з холодним DRI [87]. Менше утворює пилу та дрібняку при зберіганні і транспортуванні, його розміри й форма (типово 50–140×40–100×20–50 мм, маса 0,2–13 кг) сумісні зі стандартним обладнанням для перевалок [87].

- **Стратегічна перевага для маржинальних продуктів:** використання НВІ завдяки зниженому вмісту шкідливих домішок дозволяє потім отримати додаткову додану вартість на етапі виробництва металопродукції за рахунок виробництва більш маржинальних марок сталей (IF-steels для автовиробництва, нержавіючих та жароміцних сталей). Типові фізико-хімічні характеристики НВІ наведені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 - Типові фізико-хімічні характеристики НВІ

Параметр	Типові значення НВІ
Загальний Fe (%)	90–94 %
Металевий Fe (%)	83–88 %
Вміст С (%)	0,8–2,0 % (за потреби регулюється)
S (%)	0,003–0,03 %
Розмір брикету (мм)	50–140 × 40–100 × 20–50
Маса брикету (кг)	0,2–13
Щільність ( $\text{кг/м}^3$ )	2500–3300

Таблиця складена автором на основі джерел [87].

### Орієнтація на кінцевого споживача

НВІ – це не «масовий» стандартний продукт, а **продукт що конфігурує** під конкретні замовлення. Компанії-виробники закладають можливість підстроювати основні параметри (вміст Fe, С, форма й розмір

брикетів тощо) залежно від потреб клієнтів. Наприклад, сучасні технології MIDREX (зокрема система MIDREX ACT) дозволяють **незалежно змінювати вміст вуглецю** у DRI/HBI в широкому діапазоні – від близько 0,5 % до 4,5 %midrex.com. Це дає змогу постачати HBI з підвищеним вмістом С для споживачів, яким потрібні більш енергетично насичені матеріали. Виробник сертифікує стабільність хімічного складу та фізичних властивостей продукту: складу HBI (Fe, C, SiO<sub>2</sub>, S, P тощо) та розміри брикетів, які відповідають вимогам клієнтів [87].

При цьому формуються **довгострокові контракти** з кінцевими споживачами, що закріплюють налаштування продукту. Міжнародний досвід свідчить, що постачальники HBI активно укладають такі угоди. Зокрема, Metalloinvest (Лебединський ГЗК) підписав контракт із італійською Ferriere Nord (Pittini Group) на регулярні поставки HBI і відзначає, що довгострокові контракти є «важливим фактором забезпечення стабільного попиту на продукцію високої доданої вартості» [88]. Подібні угоди нещодавно уклали і інші виробники: наприклад, австрійський концерн Voestalpine підписав 4-річний контракт на постачання ~240 тис. т/рік HBI американській сталеливарній компанії Big River Steel [89]. Цей підхід гарантує споживачам стабільне постачання «під замовлення» високоякісного вихідного металу, а виробнику – надійне планування обсягів продажів.

### **Логістичні переваги HBI**

HBI поєднує технологічні характеристики, які суттєво полегшують його логістику. Перш за все, гаряче брикетування зводить до мінімуму реакцію з повітрям: як зазначають дослідники, перехід від порошкоподібного чи холодного DRI до HBI «дозволяє транспортувати HBI на великі відстані і зберігати під відкритим небом протягом тривалого часу» [90]. Іншими словами, HBI майже не іржавіє і не руйнується від вологості. Це критично важливо для експорту у віддалені регіони.

Крім того, HBI майже не утворює пилу та дрібного шламу при навантаженні і розвантаженні. Як показано вище, HBI у 100 разів стійкіший до окиснення і на 75 % менше адсорбує вологу порівняно з холодним DRI [87]. Його розмір і форма (циліндричні брикети діаметром ~50–80 мм і довжиною ~100 мм) сумісні з існуючими конвеєрами, підйомниками та рукавними стрічками, що знижує додаткові витрати на перевантаження [87]. Усе це робить HBI привабливим експортним товаром: брикети можна вантажити у великовантажні судна і доставляти у віддалені порти з мінімальними втратами.

Загалом, **логістичні переваги HBI** такі:

- *Перевезення на великі відстані:* висока стійкість HBI до повторного окиснення і водоутворення забезпечує можливість тривалого зберігання на відкритому повітрі і перевезення міжконтинентальними маршрутами [90].
- *Мінімальні втрати при транспортуванні:* HBI утворює значно менше дрібняку та пилу (відповідно менше втрат продукції) [87].
- *Сумісність з існуючою технікою:* стандартні розміри і щільність брикетів дозволяють використовувати звичайне устаткування складського та транспортного господарства (стрічкові конвеєри, рукавні системи) без модернізації.
- *Експортна привабливість:* однорідна якість та сертифікований склад продукту полегшують логістичні процедури (митні, сертифікаційні), на відміну від нерегулярної партії ломів.

## 2.6 Аналіз наявної організаційної структури ЦГОК

Центральний гірничо-збагачувальний комбінат (ЦГЗК, м. Кривий Ріг) наразі має у штаті кілька тисяч працівників. За офіційними даними, середня чисельність персоналу ЦГЗК у 2023 році складала ≈3823 осіб. Об'єднаний гірничо-збагачувальний комбінат (ОГЗК) — до якого входять

ключові гірничо-збагачувальні комбінати Кривбасу, що інтегровані в структуру Групи METINVEST — налічує понад 13 000 співробітників . Таким чином, з існуючих структур групи є значний кадровий резерв, який можна залучити до нового проєкту.

MIDREX-заводи зазвичай мають високий рівень надійності й довготривалий пусковий період з підготовкою персоналу. Середній рівень автоматизації передбачає, що значна частина процесу контролюватиметься системами АСУТП, але потрібні оператори-наглядачі, інженери та обслуговуючий персонал. До 2030 року планується поступово впроваджувати нові технології (наприклад, часткове використання водню), але загальна чисельність працівників при цьому не зросте кардинально: натомість передбачається внутрішня оптимізація та перепідготовка кадрів (або перенавчання для нових функцій) без звільнень. Досвід інших проєктів показує, що навіть із впровадженням автоматизації штат НВІ-заводу залишається на рівні десятків-сотень осіб [91].

### **Діюча організаційна структура ЦГЗК**

ПрАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат» (ЦГЗК) має досить складну внутрішню структуру, що відображає повний технологічний цикл – від видобутку руди до виготовлення окатишів. Так, станом на кінець 2021 року комбінат налічував 21 структурний підрозділ, серед яких основними виробничими цехами є два кар'єри (кар'єр №1 «Велика Глеюватка» та кар'єр №3 «Петровське»), шахта ім. Орджонікідзе, дробильна і збагачувальна фабрики, фабрика огрудкування, управління залізничного транспорту та два гірничотранспортні цехи [92]. Загалом у ЦГЗК працює кілька тисяч осіб – за даними 2021 року середньооблікова чисельність штатного персоналу становила близько 4335 осіб [92].

Управління комбінатом здійснюється дирекціями за функціональним призначенням. Згідно зі звітністю, до структури апарату управління ЦГЗК

входять, зокрема, дирекція з виробництва та планування, дирекція з технології та якості, дирекція з інжинірингу, дирекція капітального будівництва і ремонту, фінансова дирекція, дирекція з аналізу та управління ризиками, дирекція з охорони праці та екології, дирекція з персоналу й соціальних питань, дирекція із закупівель, дирекція операційних поліпшень, а також служба ІТ, відділ логістики, канцелярія тощо [92]. Також звертає на себе увагу, що керівні функції комбінату підпорядковані вищим управлінським структурам об'єднаної компанії (об'єднаний ГЗК METINBESTу), тож такі позиції, як директор з інжинірингу, директор із якості чи директор з виробництва, фактично інтегровані у систему управління всіма гірничо-збагачувальними комбінатами групи.

#### Висновки.

Порівняльний аналіз технологій (MIDREX, ENERGIRON, HYBRIT) продемонстрував, що MIDREX є оптимальним рішенням для впровадження на ЦГЗК/ОГЗК завдяки гнучкості, масштабованості, високій якості продукції (DRI/HBI) та можливості переходу до водневого відновлення. Зроблено висновок, що власне виробництво DRI/HBI дозволить уникнути ризиків постачання, зменшити експортну залежність та забезпечити внутрішній попит.

На основі SWOT-аналізу визначено сильні сторони (наявна ресурсна база, досвід виробництва окатків), слабкі (брак водневої інфраструктури), можливості (зростання попиту на HBI в ЄС) та загрози (регуляторні обмеження, конкуренція з Азії).

Запропоновано модель інтеграції нового виробництва у структуру ЦГЗК, яка враховує потребу в 600+ висококваліфікованих фахівцях, адаптацію логістики та синхронізацію з існуючими процесами.

### 3 ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО СУЧАСНИХ УПРАВЛІНСЬКИХ ПІДХОДІВ НА НОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ ПРЯМОВІДНОВЛЕНОГО ЗАЛІЗА (DRI/НВІ) ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ MIDREX

#### 3.1 Чому Кривий Ріг

##### Переваги локалізації повного циклу в межах Кривого Рогу

Зосередження всіх етапів виробничого ланцюга в одному промисловому регіоні дає суттєві стратегічні переваги. Мінімізація транспортних витрат і ризиків: сировина (руда, концентрат, окатки) і проміжна продукція переміщуються між підприємствами на невеликі відстані в межах Кривого Рогу. Це скорочує витрати на перевезення залізничі чи автотранспортом, знижує втрати при перевалках, а головне – усуває залежність від морської логістики та портових зборів на внутрішніх етапах. Як зазначено у звітах METINVESTу, усі залізородні активи групи розташовані в Кривому Розі, маючи прямий доступ до розвиненої залізничної інфраструктури для відвантажень по світу [93]. Близьке сусідство зменшує логістичні ризики та забезпечує гарантоване постачання сировини для наступних переділів на десятиріччя вперед [93].

Ефект кластеру та синергія: коли гірничі підприємства, окатишеві фабрики та металургійні (DRI) установки розташовані поруч, вони можуть спільно використовувати інфраструктуру [7], енергетичні потужності і навіть побічні продукти виробництва. В Кривому Розі вже сформована промислова екосистема: є власні генеруючі потужності, підстанції, водопостачання, ремонтні бази, навчальні центри для кадрів тощо. Новий DRI-завод зможе використовувати цю інфраструктуру, що знижує капітальні витрати на його будівництво. Окрім того, підприємства кластеру можуть оперативно обмінюватися інформацією та найкращими практиками, спільно планувати виробничі програми – усе це підвищує гнучкість і продуктивність. METINVEST наголошує, що підхід «єдиного великого майданчика» значно збільшує ефективність процесів і створює

нові «синергетичні зв'язки» між підприємствами [93]. Це недосяжно, якщо різні стадії ланцюга розділені сотнями кілометрів.

Економія на масштабі та витратах: інтегрований регіональний ланцюг дозволяє економити завдяки ефекту масштабу. Наприклад, великі обсяги внутрішніх перевезень сировини можуть обслуговуватися власним парком вагонів чи конвеєрними лініями, що дешевше за сторонні послуги. Централізація управління (як у випадку «консолідованого ГЗК» МЕТІНВЕСТу) скорочує дублювання функцій і адміністративні витрати [16]. Спільне планування виробництва концентрату, окатків і DRI дає змогу оптимально завантажувати потужності: якщо десь тимчасовий профіцит концентрату – його можна спрямувати на додатковий випуск окатків або накопичити, і навпаки [94]. Так згладжуються коливання, і весь ланцюг працює більш ритмічно.

**Отже**, локалізація всього ланцюга доданої вартості «залізна руда – окатки – DRI/HBI – сталь» у межах одного регіону забезпечує конкурентні переваги: від економічних (нижча собівартість через скорочення витрат і втрат) до стратегічних (контроль над повним циклом, стійкість до зовнішніх шоків) та екологічних. Саме ці фактори роблять проект створення такого кластеру в Кривому Розі надзвичайно актуальним і виправданим.

### 3.2 Пропозиції в СМЯ

**Метою даного дослідження** є, з одного боку, адаптація наявних КПТіО (що використовуються на ЦГОК) до нових умов виробництва заліза прямого відновлення (HBI) з використанням окатків, а з іншого боку — розробка нових КПТіО, специфічних для технології MIDREX, яка передбачає високотемпературні газові процеси, складні умови роботи з відновниками та потребу в суворому дотриманні металізаційних характеристик.

Особливе значення та новизна даного підходу полягає в тому, що про управління цими показниками потрібно опікуватися саме на етапі проєктування. При цьому досягається:

- ✓ попереднє визначення точок контролю,
- ✓ встановлення критичних та цільових значень параметрів,
- ✓ автоматизоване підключення до SCADA/IIoT систем
- ✓ дозволяє забезпечити високу якість готового продукту вже з моменту пуску об'єкта, знизити ризики браку, зменшити втрати сировини та енергоносіїв, а також оптимізувати витрати на технологічне обслуговування. Візуалізація інтегрованого підходу систем сім'ї ISO наведено на рисунку 3.1.

У цьому розділі проаналізовано актуальні КПТіО, що застосовуються на ЦГОК для виробництва окатків, визначено критичні зони, які потребують адаптації до нових умов виробництва НВІ, а також запропоновано систему нових параметрів, які будуть ключовими для забезпечення якості продукції на виробництві MIDREX у Кривому Розі. Пропозиції наведені у порівняльній таблиці параметрів технології та обладнання для виробництва НВІ (MIDREX) з окатків ЦГЗК.

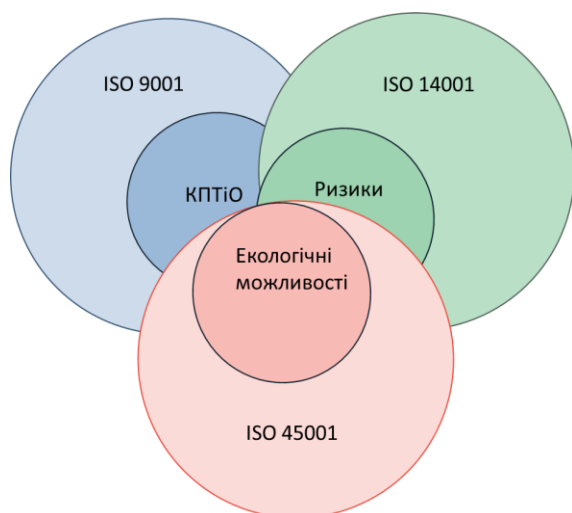


Рисунок 3.1 – Візуалізація інтегрованого підходу систем і підсистем ISO в новий проєкт. Складено автором роботи.

Таблиця 3.1 - Основні показники діючих окатишів ЦГЗК та рекомендації під виробництво НВІ.

Назва параметра	На ОГЗК	Для MIDREX	Вплив на якість НВІ	Одиниця	Контроль (процес/агрегат)
1	2	3	4	5	6
<b>Вміст заліза в окатках (масова частка Fe)</b>	Так ( $\approx 65\%$ Fe у окатках)	<b>Адаптація</b> (підвищити до $\sim 67\%$ Fe)	Визначає максимальну металізацію DRI та обсяг шлаку: вищий Fe $\rightarrow$ менше домішок ( $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) підвищує вихід заліза та щільність продукту		Збагачення руди (магнітна сепарація, флотація) для видалення кремнезему; контроль хім. складу шихти
<b>Вміст кремнезему (<math>\text{SiO}_2</math>)</b>	Так ( $\approx 5-6\%$ $\text{SiO}_2$ )	<b>Адаптація</b> (знижити до $\sim 2-3\%$ )	Високий $\text{SiO}_2$ (шлакоутворюючий компонент) знижує частку Fe, обмежує ступінь металізації DRI та збільшує кількість шлаку у сталеплавильному процесі	%	Збагачення руди (магнітна сепарація, флотація) для видалення кремнезему; контроль хім. складу шихти
<b>Вміст глинозему (<math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>)</b>	Так (низький, $\sim 0,2-0,3\%$ )	<b>Без змін</b> (вже низький)	Підвищений $\text{Al}_2\text{O}_3$ – кисла домішка – знижує відновлюваність окатка та збільшує шлак; нинішній низький рівень $\text{Al}_2\text{O}_3$ ЦГЗК є прийнятним для MIDREX	%	Збагачення руди; контроль мінералогії концентрату (видалення глинистих домішок)
<b>Вміст сірки (S)</b>	Так ( $< 0,01\%$ S)	<b>Без змін</b> (дотримувати $\leq 0,01\%$ )	Висока S шкодить: $> 0,01\%$ в окатках може отруювати каталізатор риформера та потребує десульфурзації окатки ЦГЗК вже містять $< 0,01\%$ S, що відповідає вимогам MIDREX	%	Контроль концентрату (глибоке збагачення) та випалу окатків (видалення сірки); аналітичний контроль хімскладу

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
<b>Вміст фосфору (P)</b>	Так (звичайно низький)	<b>Адаптація</b> (мінімізувати)	Підвищений P переходить у DRI і далі в сталь; вимагає посиленого шлакоутворення для видалення, що веде до втрат Fe. Низький P у сировині забезпечує якісніше DRI без домішок	%	Контроль сировини (руди з низьким P); змішування руд; хімічний контроль концентрату
<b>Розмір окатків (гранулометричний склад)</b>	Так (переважно 10–14 мм, >85%)	<b>Адаптація</b> (звужити фракцію, <5% дрібн.)	Однорідний розмір забезпечує рівномірне відновлення та газопроникність шару. Надто великі або дрібні окатки погіршують циркуляцію газу, викликають каналізацію та неоднорідну металізацію DRI	мм	Пелетизація: дискові (барабанні) гранулятори і двопалубні грохоти для відбору потрібної фракції; контроль ситовим аналізом
<b>Вміст дрібних фракцій (&lt;5 мм)</b>	Так (є невеликий % при відвантаженні)	<b>Адаптація</b> (мінімізувати <5%)	Дрібні частки і пил при завантаженні в піч збільшують втрати Fe з пилом та забивають газові тракти; контроль дрібняку підвищує вихід HBI та зменшує утворення пилу в установці	% (масова або % штук)	Просіювання продукту перед подачею в шахтну піч; аспірація і уловлювання пилу (скрубери топового газу)
<b>Міцність окатків (холодна) – міцність на стиск, дробимість (TI)</b>	Так (підвищена після модернізації)	<b>Адаптація</b> (максимально підвищити)	Висока міцність окатків → менше утворення дрібних фракцій при транспортуванні та завантаженні. Це підвищує вихід DRI та зменшує пил. Середня міцність DRI-гранул становить лише 25–35% від вихідної окатки, тому вихідна міцність має бути максимальною	МПа (або Н/окаток); % >6,3 мм після барабанного тесту (TI)	Додавання сполучника (бентоніту/органічн.); випал в печі (температура й час для спікання часток); тумблерні випробування для контролю TI/Al

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
<b>Відновлюваність окатків (Reactibility)</b>	Частково (для доменних окатків не критична)	<b>Адаптація</b> (підвищити)	Швидкість і ступінь відновлення окатку впливають на металізацію та продуктивність MIDREX. Погана відновлюваність (щільна структура, багато домішок) → неповна металізація і вищі витрати газу. Оптимальні окатки мають пористу структуру для легкого проникнення газу	% металу після стандартного тесту (RI)	Контроль мікроструктури окатків через режим випалу (формування пористої структури); лабораторні тести відновлення (наприклад ISO 11257)
<b>Руйнування при відновленні (RDI) – міцність окатка при нагріві</b>	Ні (не нормується для БФ)	<b>Новий</b> (критично мінімізувати)	Відображає стійкість окатку до розтріскування в умовах відновлення при 500–600 °С. Низький RDI (міцний окаток) запобігає утворенню дрібних фракцій у шахтній печі, що зменшує пил і втрати заліза. Високий RDI (схильність до розсипання) призводить до засмічення шару, втрат продуктивності й виходу DRI	% <3 мм після тесту (чим менше – тим краще)	Оптимізація мінералогії окатку (повне окиснення FeO→Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , мінімум напружень всередині зерен); поступовий нагрів окатків. Лабораторний тест RDI (ISO 11257) для контролю
<b>Схильність до утворення кластерів (злипання)</b>	Ні	<b>Новий</b>	Охарактеризує тенденцію окатків склеюватись між собою під час відновлення. Висока схильність → утворення «кластерів» окатків, нерівномірний газорозподіл, аварійні ситуації (зависання матеріалу). Зниження злипання дозволяє підвищити температуру і продуктивність печі без ризику налипань	Бал або % злиплих окатків (стикінг-індекс)	Хімічний склад окатку (домішки CaO, MgO знижують злипання; нанесення антипригарного покриття; тестування у лабораторному відновному апараті (стикінг-тест)

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
<b>Наявність покриття окатків (антизлипальне)</b>	Ні (нова технологія)	<b>Новий</b> (впроваджено для DRI)	Спеціальне покриття (наприклад, тонкий шар вапняку або інших речовин) запобігає злипанню окатків під час відновлення. Покриті окатки дозволяють досягати більш високої температури та швидкості реакції без утворення кластерів, підвищуючи вихід придатного DRI	-	Установка для коутингу окатків (додатковий барабан/конвеєр для обробки окатків сумішшю вапна тощо перед подачею в піч) контроль рівномірності покриття
<b>Температура брикетування DRI</b>	Ні (нова технологія)	<b>Новий 650-700 °C</b>	Занадто низька температура приводить до поганого злипання частинок, - слабкий брикет. Оптимальна температура забезпечує спікання частинок в щільний моноліт	°C	Контроль температури на виході з відновного реактора перед брикетуванням; моніторинг та регулювання нагрівачів
<b>Тиск при брикетуванні</b>	Ні (нова технологія)	<b>Новий 100-150 мПа</b>	Недостатній тиск – недостатня щільність та міцність брикету. Високий тиск забезпечує механічну стабільність і транспортабельність HBI	МПа	Прес для брикетування: налаштування і моніторинг гідравлічних систем; контроль манометрів
<b>Час утримання під тиском</b>	Ні (нова технологія)	<b>Новий 1-3 сек</b>	Недостатній час- брикет не формується належним чином. Оптимальний час утримання під тиском забезпечує однорідність і механічну міцність	с	Таймер системи гідропреса; програмоване управління тиском

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
<b>Швидкість охолодження брикетів</b>	Ні (нова технологія)	<b>Новий Контроль оване повільне охолодження до 100°C</b>	Різке охолодження – термічні напруження і мікротріщини. Повільне охолодження зберігає структурну цілісність та міцність НВІ	°C	Система контрольованого охолодження (конвеєрне охолодження, охолоджувальні тунелі); термодатчики для моніторингу температури

Таблиця складена за власними розробками та інформацією наведеною в наступних джерелах [63],[95],[96]

У таблиці наведено зведення з основних параметрів окатків та процесу прямого відновлення заліза (DRI) за технологією MIDREX, з використанням тих самих окатків ЦГЗК, як сировини. В таблиці зазначено, чи контролюється параметр наразі на ЦГЗК, чи потребує він адаптації або є новим для процесу MIDREX, його вплив на якість DRI (металізація, міцність продукту, утворення пилу тощо), одиницю виміру та відповідальний процес або агрегат, який здійснює контроль

### **Спільні параметри для обох процесів vs. нові/змінені.**

Більшість наведених параметрів є спільними для виробництва окатків на ЦГЗК і для процесу MIDREX, адже якісні окатки потрібні як для доменного, так і для прямого відновлення. До таких спільних параметрів належать хімічний склад (вміст Fe, домішок SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S, P тощо), фізична міцність окатків (холодна міцність, дробимість), гранулометрія (розмір окатків). Ці параметри вже контролюються на ЦГЗК при виробництві окатків для доменних печей. Водночас, вимоги MIDREX до них більш жорсткі, тому необхідна адаптація: підвищення вмісту Fe до рівня DR-grade (≈67% Fe) та максимальне очищення концентрату від кремнезему (зниження SiO<sub>2</sub> з ~5% до <3%) [63], підтримання дуже низьких рівнів S і P (≤0,01% S, P якомога нижче) [63], забезпечення однорідного розміру окатків і мінімуму дрібняку (щоб уникнути каналів в шахтній печі та втрат заліза з пилом). Параметри міцності окатків, такі як тумблерний індекс і міцність на стиск, є спільними вимогами: на ЦГЗК після модернізації досягнуто підвищення міцності окатків, що позитивно впливає і на пряме відновлення (менше утворення пилу) [63].

Низка параметрів є новими або критично важливими саме для процесу MIDREX, хоча раніше не були в центрі уваги при виробництві окатків для доменної печі. Зокрема, це відновлюваність окатків, їхня поведінка при відновленні – здатність не руйнуватися (низький RDI) та не злипатися (низький стикинг-індекс) в умовах шахтної печі. У доменній печі ці аспекти не такі критичні (окатки там переходять у розплав, а

надлишковий ганг виходить зі шлаком)midrex.commidrex.com. Натомість у установці прямого відновлення відсутнє плавлення шлаку, окатки відновлюються у твердому стані, тому будь-яке руйнування чи злипання окатків безпосередньо зменшує вихід DRI та може викликати аварійні зупинки. Для вирішення цих питань ЦГЗК вперше в Україні впровадив технологію коутингу окатків – нанесення спеціального покриття, що запобігає їх агломерації (злипанню) під час відновлення. Таким чином, параметр наявності покриття і пов'язані з ним тести на злипання є новими для окатків, призначених для MIDREX. Також більшого значення набувають лабораторні випробування відновлюваності (RI) та міцності при відновленні (RDI) – для оцінки, наскільки окаток підходить саме для шахтного відновлення. Раніше на ЦГЗК такі тести проводилися обмежено, але для DR-процесу вони необхідні для забезпечення стабільної роботи установки.

Параметри для модернізації окаткового виробництва під MIDREX. При переорієнтації окатків ЦГЗК на пряме відновлення слід врахувати такі ключові параметри і заходи модернізації:

- Хімічна якість концентрату. Необхідно забезпечити максимально високий вміст Fe в концентраті ( $\approx 70\%$  Fe) і, відповідно, в окатках ( $\geq 66\text{--}67\%$  Fe) [63]. Для цього впроваджується глибоке збагачення руди (тонке подрібнення, магнітна сепарація, флотація) та нові фільтри для зневоднення концентрату (наприклад, керамічні фільтри) – щоб отримати більш чистий концентрат з мінімумом кремнезему та інших домішок. Вміст  $\text{SiO}_2$  в окатках слід знизити до  $\sim 2\%$  (у окатках для доменної печі було  $\sim 5\%$ ) шляхом видалення кварцових домішок. Також контролюється вміст  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CaO, MgO,  $\text{TiO}_2$  – сума кислотних домішок у DR-окатках має бути мінімальною ( $\leq 3\text{--}4\%$ ). Особливу увагу приділити сірці та фосфору: сировина з підвищеним P може потребувати виключення або змішування, адже P і S не видаляються при DR-відновленні і потрапляють у стальmidrex.com (на відміну від доменної печі, де сірка частково вигорає,

а фосфор переходить у шлак). На щастя, концентрати ЦГЗК вже вирізняються низькою сіркою (<0,01%) – цей рівень треба зберегти, аби не було потреби у газовій десульфурації.

- Розмір і міцність окатків. Слід забезпечити вузьку фракцію окатків, оптимальну для шахтної печі: більшість окатків в діапазоні ~9–12 мм (дуже однорідний розмір). Для цього на ЦГЗК вже встановлено нові грохоти (двоповерхові), що дозволяють відсівати як дрібні, так і завеликі окатки, формуючи продукт із високою однорідністю за розміром. Це покращує газопроникність в реакторі MIDREX і рівномірність відновлення. Також важливо мінімізувати утворення дрібних окатків і пилу при транспортуванні: міцність окатків після випалу має бути максимальною (міцність на стиск, тумблерний індекс). ЦГЗК модернізував печі випалювання та рецептуру шихти (додавання бентоніту) для підвищення міцності окатків – нові «преміальні» окатки мають підвищену твердість. Для DR-окатків це особливо важливо, адже крихкі окатки перетворюються на дрібняк ще до повного відновлення, що знижує вихід DRI. Необхідно контролювати показники міцності: дробимість (T<sub>I</sub>, %, після барабанної проби) повинна бути високою (≥95%), індекс стирання (A<sub>I</sub>, % порошку) – низьким (≤5%). Це досягається оптимізацією вологості шихти при грануляції, достатнім дозуванням сполучника та правильним температурним режимом випалу окатків.

- Поводження окатків при відновленні. Модернізація окатків для MIDREX включає врахування їх поведінки в шахтній печі. Потрібно забезпечити низьку схильність до розтріскування при відновленні – окатки не повинні інтенсивно руйнуватися, коли залізна руда переходить в метал заліза. Для цього важливо мати повністю окиснені окатки (мінімізувати залишковий FeO, що при відновленні може викликати пухкість і розрив зерна), а також оптимальний вміст зв'язуючих фаз (наприклад, невеликі добавки MgO можуть зменшувати утворення тріщин). Лабораторні випробування (ISO 11257) повинні підтвердити низький RDI окатків. Другий

критичний аспект – злипання окатків. Через високий вміст водню в відновному газі MIDREX і відсутність шлаку окатки можуть спікатися між собою при високих температурах [midrex.com](http://midrex.com). Щоб усунути цю проблему, ЦГЗК вже випробував нанесення на окатки захисного покриття (коутинг) – суміші спеціальних дрібнодисперсних речовин (ймовірно, вапняку та інших компонентів). Покриття створює бар'єр між окатками і запобігає їх склеюванню під час відновлення. Перші партії окатків з ЦГЗК із таким покриттям вже відправлено споживачам, і випробування показали ефективний захист від агломерації окатків, кращий за конкурентні аналоги. Надалі ця технологія буде впроваджена на постійній основі для всіх DR-окатків. Також на стадії подачі окатків в реактор можна передбачити систему зволоження або пилопригнічення, щоб зняти статичний пил і запобігти його займанню (холодне DRI є пожежонебезпечним при контакті з вологою, тому ці аспекти теж контролюються, хоча більше стосуються вже готового DRI).

Підсумовуючи, для успішної модернізації виробництва окатків ЦГЗК під технологію MIDREX необхідно забезпечити високоякісні DR-окатки – з високим вмістом заліза і мінімумом домішок, міцні, однорідні за розміром, та стійкі в умовах відновлення. Досягнення цих показників реальне завдяки проведеним інвестиціям: підвищенню якості концентрату до 70,5% Fe, встановленню сучасного обладнання (нові фільтри, грохоти, системи покриття) та впровадженню інновацій (коутинг окатків) на ЦГЗК. Це дозволить використовувати окатки українського виробництва у установках MIDREX з високою ефективністю, отримуючи DRI з високим ступенем металізації (~94–95%) і міцністю, без зайвих втрат на пил і шлак, що є важливим кроком до “зеленої” металургії та конкурентності продукції METINVEST на світовому ринку [5].

Інтеграція КРТІО як структурованої системи параметрів технології та обладнання є визначальною умовою підвищення якості, зниження браку та декарбонізації процесів у металургії. Для Групи METINVEST це — не

лише частина внутрішньої політики, а й відповідь на виклики СВМ, зеленого переходу та міжнародних стандартів екологічної відповідальності. Використання КПТІО забезпечує зв'язок між технологічною дисципліною, якістю продукції та стратегічною конкурентоспроможністю підприємств

### **Оптимізація параметрів існуючих окатків для НВІ**

Центральний ГЗК зараз виготовляє окатки з масовою часткою заліза  $\approx 67,5\%$ . Для процесу прямого відновлення (DRI/HBI) необхідні «DR-пелети» із вмістом Fe  $\geq 67\%$  та мінімальним вмістом домішок (кислих оксидів SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> тощо). Для цього пропонується зменшити споживання бентоніту (який додає SiO<sub>2</sub>) і частково перейти на органічні зв'язуючі (що знижує введення небажаної кремнеземної домішки та підвищує вміст заліза в окатках). Вміст FeO у пелетах слід утримувати на низькому рівні (орієнтовно  $\leq 1-2\%$ ), щоб забезпечити високу металізацію. Також треба збільшити пористість пелет (до  $\approx 25-30\%$ ), оскільки більш пористі пелети краще пропускають відновлювальний газ та швидше редукуються. Механічна міцність окатишів має бути достатньою: наприклад, холодна міцність стиску  $\geq 250$  кгс ( $\geq \sim 2450$  Н) і залишок на ситі ( $> 6,3$  мм після 200 обертів)  $\geq 90-95\%$ .

Зміни у технології виробництва (дозування зв'язуючих, температури випалу, режим охолодження) мають бути спрямовані на досягнення цих показників. Враховуючи рекомендації MIDREX, сумарний вміст шкідливих оксидів у пелетах слід обмежити 3–4 %, а інші домішки (S, P) залишити на мінімально можливому рівні.

### **КПТІО для процесу НВІ на установці Midrex**

Для устаткування Midrex (CO/H<sub>2</sub>) ключові параметри процесу та їх контроль обов'язково повинні включати:

- **Температура:** газ у зоні відновлення подається нагрітим до  $\sim 850\text{--}930\text{ }^\circ\text{C}$  [62], а вихідний продукт (DRI) має температуру  $\geq 650\text{ }^\circ\text{C}$  перед пресуванням у HBI [97]
- **Тиск:** робочий тиск газу на вході в шахту зазвичай  $0,1\text{--}0,3\text{ МПа}$  [62], що полегшує герметизацію системи заряджання/розвантаження.
- **Газова атмосфера:** звичайне співвідношення  $\text{H}_2:\text{CO} \approx 1,5\text{--}1,7$  ( $\approx 55\text{--}70\%$   $\text{H}_2$  за об'ємом) [98] Склад газу підтримується чистим ( $\text{H}_2+\text{CO} > 90\%$ ), для чого використовується топ-газова рециркуляція з риформером.

**Контроль та управління цими технологічними параметрами повинні бути закладені на стадії проектування, тоді показники якості готового продукту будуть гарантовано знаходитись у заданих діапазонах, що зменшить випадки випуску продукції, яка не відповідає заявленим характеристикам:**

- **Ступінь металізації:** цільова металізація DRI/HBI  $\approx 92\text{--}96\%$  (т.т.  $> 90\%$  металевого Fe). Висока металізація зменшує енергоспоживання у подальшому виплавлянні.
- **Вміст вуглецю:** у HBI зазвичай  $1\text{--}3\%$  C, регульований шляхом інжекції метану чи природного газу у холодний газ (при охолодженні DRI) для карбонізації. Занадто велика C% погіршує час від завантаження до випуску металу, тому її балансують під потреби електросталеплавильного агрегату.
- **Структура HBI:** брикети мають стандартний розмір  $\sim 30 \times 50 \times 110\text{ мм}$  і густину  $\geq 5\text{ г/см}^3$ . HBI без добавок (binder-free), форма – «подушки». Стабільна внутрішня структура досягається докомпресуванням гарячого DRI.
- **Індекси міцності:** фізичну міцність HBI перевіряють ударними та абразійними тестами. Наприклад, застосовують ISO 15967: після 200

обертів барабану  $\geq 90$  % фрагментів залишаються більшими 6,3 мм (tumble index). Виконуються також нестандартизовані тести на падіння (drop test) та стиск (cold crush), щоб гарантувати мінімальне руйнування при зберіганні й транспортуванні.

**Загалом**, вище перелічені параметри печі MIDREX та пресу повинні стабільно підтримуватися системою автоматичного контролю (SCADA), щоб забезпечити задану температуру, склад газу, час перебування і ступінь відновлення, що напряду впливає на якість кінцевого НВІ.

Вище було наведено основні пропозиції для кваліфікаційної роботи але превентивне управління не можна розглядати окремо від загальної системи менеджменту якості і її основних принципів.

### 3.3 Системи контролю якості

На DRI-виробництві якість контролюється на **різних стадіях процесу** за допомогою як лабораторних, так і автоматичних засобів:

- Вхідний контроль сировини. Залізородні окатки перевіряються на хімічний склад (масова частка Fe<sub>заг.</sub>, FeO, домішки SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, сірка, фосфор), міцність, пористість і гранулометрію.

**На цьому етапі пропонується об'єднати два контролю, вхідний, який зараз існує на ОГОК з вхідним контролем сировини, який передбачається для нового виробництва і залишити один вид контролю на етапі виробництва окатків. Обґрунтуванням місця контролю буде слугувати можливість реалізації окатків третім особам (не на виробництво НВІ). При прийнятті принципового рішення про переробки всіх окатків на НВІ місце контролю можна буде перемістити на дільницю вхідної сировини за принципом «контроль у споживача»**

Паливо (природний газ) контролюється на вміст метану, водню, домішок, а за використання водню – на його чистоту. Від якості сировини залежить стабільність процесу, тому постачальники відбираються ретельно, а матеріали, що не відповідають специфікаціям, не допускаються в процес.

- *Оперативний контроль процесу.* Сучасні DRI-модулі оснащені системами автоматизації, що безперервно моніторять ключові параметри: температуру та тиск газу у верхній і нижній частинах відновлювальної шахти, склад відновлюючого газу ( $\%H_2$ ,  $\%CO$ ,  $\%CO_2$ ,  $\%CH_4$ ), витрату газу, температуру продукту на виході, швидкість подачі окатків, температуру реформера та стан каталізатора. Ці показники впливають на ступінь металізації і вміст вуглецю в DRI, тому підтримуються у заданих межах системою керування (DCS/SCADA) з мінімальними коливаннями. Наприклад, **типові цільові показники DRI** на газових установках – металізація близько **94%  $Fe_{met}$** , вміст вуглецю **~2%**, температура гарячого DRI **~430 °C** [99] – можуть бути досягнуті шляхом точного регулювання співвідношення газів та теплового режиму. В ході роботи операційний персонал і автоматична система контролю аналізують тренди параметрів; при відхиленні від норми негайно вживаються коригувальні дії (зміна температури печі, корекція складу газу, тощо) для запобігання випуску некондиційного DRI.

- *Вихідний контроль продукції.* Готовий продукт DRI (або HBI – брикети гарячого прямого відновлення) проходить регулярне тестування. В лабораторії вимірюють **ступінь металізації** ( $\%$  металічного Fe), **вміст вуглецю**, **хімічні домішки** (решта оксидів, сірка, фосфор), а також **фізичні властивості** – міцність на стиск (особливо для HBI), абразивність, вміст дрібняку (fines). Багато сучасних заводів оснащені автоматизованими пробовідбірниками і аналітичним обладнанням, що дає змогу отримати ці дані швидко. За необхідності (наприклад, якщо

результати аналізу показали зниження металізації) партія продукції може бути затримана від відвантаження, а процес – відкоригований. Також контролюється відсутність **реокислення** DRI під час охолодження та зберігання: для цього часто використовують інертний газ або швидке брикетування, а проби перевіряють на приріст вмісту FeO.

Для ефективного функціонування системи якості важливі документовані процедури і підготовлений персонал. Стандарти ISO вимагають вести документацію (інструкції, журнали контролю, специфікації) та проводити внутрішні аудити – перевірки того, як дотримуються встановлені процедури. При впровадженні інтегрованої системи менеджменту: від якості продукції до охорони довкілля і безпеки, з постійним моніторингом показників та наглядом з боку зовнішніх сертифікаційних органів є можливість керівництву бачити повну картину ефективності процесів і якості, а також вчасно приймати рішення про покращення або коригування. Кінцева мета управління якістю на DRI-виробництві – випускати продукт стабільно високої якості, що задовольняє вимоги споживачів і перевершує їх очікування, мінімізуючи при цьому витрати на брак і переробку. Як показує досвід галузі, холістичні програми якості (TQM, Lean Six Sigma) і сучасні технології контролю дають змогу сталеливарним компаніям досягти цієї мети.

### **Екологічні аспекти та управління якістю**

Переходячи на випуск HBI, підприємство враховує вплив на навколишнє середовище. Впровадження удосконалень (рециркуляція топ-газу, рекуперація тепла тощо) підвищує енергоефективність: наприклад, у другому поколінні MIDREX використання теплообміну збільшує ККД установки приблизно на 6,3 % [62]. Крім того, введення Європейського механізму карбонового коригування (CBAM) призведе до оподаткування CO<sub>2</sub>-вмісту імпортованої сталі з 2026 р. (заміна безкоштовних квот) [100].

Це означає, що зменшення вуглецевого сліду продукції стає економічно вигідним.

Таким чином, до системи управління якістю слід включити показники енергоспоживання та викидів: такі як: вимірювання витрат палива і газів у печі, контроль ступеня відновлення (вплив на втрати у циркуляційному (топовому) газі), оптимізацію концентрації  $O_2$  у топовому газі. Раціональне управління технологією забезпечить зниження питомих витрат  $CO_2$  та енергії при збереженні необхідних якісних показників продукту.

### 3.4 Пропозиції в технології

#### **Цифрова трансформація управління DRI-виробництвом**

Управління сучасним металургійним виробництвом неможливе без використання цифрових технологій. **Industry 4.0** та концепція «розумного заводу» (Smart Factory) відкривають нові можливості для підвищення ефективності, гнучкості і стійкості DRI-виробництва. Схема Smart Factory наведена на рисунку 3.1. Цифрова трансформація управління включає впровадження Індустріального Інтернету речей (IIoT), сучасних систем автоматизації (SCADA/DCS), аналітики великих даних, технології цифрового двійника, предиктивного (прогнозного) обслуговування та інтегрованих ІТ-систем управління підприємством (ERP/MES).

Для управління **DRI/НВІ-виробництвом** пропонується **встановлення обладнання:**

- **Сенсори та IIoT.** На DRI-установці датчики відслідковують температуру зон печі, тиск і витрату газів, вібрації компресорів, рівні завантаження бункерів, склад газу, стан електродвигунів тощо. **Інтеграція ІoT з традиційною SCADA** дозволяє звести ці дані на єдину платформу і застосувати до них розширену аналітику та машинне навчання [101]. Зрештою, це дає змогу операторам і інженерам отримувати *діагностичні*

та *прогнозні* інсайти в реальному часі – від раннього виявлення відхилень до прогнозування необхідності обслуговування обладнання.

- **Advanced Analytics та штучний інтелект.** Одним із інструментів є платформа **MidrexConnect** з сервісом Remote Professional Services – інженери Midrex у режимі онлайн підключаються до даних заводу і можуть в реальному часі оцінювати всі аспекти роботи, **оптимізуючи якість продукту, продуктивність процесу і надійність обладнання** [102].

- **Предиктивне обслуговування обладнання.** DRI-модуль містить критично важливе обладнання – **реформер з тисячами труб, шахтна піч, компресори, насоси, теплообмінники** тощо. Їхня надійність визначає безперервність виробництва, тому обслуговування поступово переходить від реактивного (“полагодити після поломки”) та планово-профілактичного (заміна за графіком) до **прогнозного**. Предиктивне обслуговування ґрунтується на аналізі даних сенсорів: система відстежує тренди вібрацій, температури підшипників, тиску, хімічного складу тощо, і за допомогою алгоритмів **Machine Learning** виявляє ранні ознаки зносу або наближення відмови вузлів. Як зазначає **Schneider Electric**, використання **просунутих аналітичних моделей для предиктивного обслуговування** дозволяє виявляти потенційні проблеми ще до того, як вони приведуть до незапланованого простою, та пропонувати рекомендації щодо їх усунення.

На практиці це виглядатиме так: система сигналізує, що певна труба реформера демонструє аномальне зниження теплопровідності – це може вказувати на погіршення каталізатора чи коксові відкладення. Обслуговуюча бригада планує заміну каталізатора саме в цей проблемний реактор під час найближчого зупинкового ремонту, **уникаючи аварійної ситуації**. Завдяки подібним системам **Midrex Remote Professional Services (RPS)** на основі платформи MidrexConnect

здійснює **дистанційний моніторинг “здоров’я” всього заводу** і може виявляти відхилення в роботі агрегатів до того, як вони переростуть у серйозні проблеми [103].

- **Інтеграція ІТ-систем (ERP/MES) та “розумний” ланцюг постачання.** Lean-підхід, як згадувалося, прагне мінімізувати запаси та втрати. Для НВІ виробництва це особливо важливо: окатки, газ, готовий продукт повинні переміщатися без зайвих затримок. Досягти цього допомагає інтеграція систем управління виробництвом з системами управління бізнесом. **ERP-система** (Enterprise Resource Planning) об’єднує дані виробництва з даними закупівель, збуту, логістики та фінансів. **MES-система** (Manufacturing Execution System) керує безпосередньо операціями на рівні цеху – від випуску виробничих нарядів до відстеження кожної партії продукції в реальному часі. У комплексі ERP+MES дозволяють забезпечити прозорість всього ланцюга поставок і оперативно реагувати на зміни попиту чи постачання. Згідно з аналізом World Steel Association, для впровадження по-справжньому ощадливого виробництва сталі необхідно уникнути ефекту батога в ланцюгу постачання – тобто запізнитої й нерівномірної реакції на зміну попиту; це потребує повної видимості даних у ланцюжку та об’єднання систем JIT, ERP/MRP в гібридні рішення [104]. Іншими словами, DRI-виробництво повинно бути не ізольованим островом, а цифрово пов’язаним з постачальниками сировини (**отримувати керований прогноз якості** і часу поставки продукту), з отримувачами продукції і навіть з кінцевими замовниками сталі (розуміти довгостроковий попит).

Таким чином, **цифровізація DRI-виробництва** за технологією MIDREX – не данина моді, а обов’язкова умова успішної реалізації проекту в сучасних умовах. Впровадження Industry 4.0-рішень дає змогу досягти одразу кількох цілей: **зменшити витрати** (за рахунок оптимізації енергоспоживання, прогнозного ТО і скорочення простоїв), **підвищити**

**якість** (через точний контроль параметрів і аналіз великих даних про процес), **підвищити безпеку** (віддалений моніторинг небезпечних ділянок, як-от реформер, дозволяє знизити ризики для людей) та **гнучкість** (швидке переналаштування під іншу сировину чи зміну продуктивності завдяки цифровим моделям і AI). Зрештою, цифрова трансформація стає інструментом досягнення стратегічних цілей підприємства – таких як **декарбонізація виробництва**. Перехід на DRI вже сам по собі скорочує вуглецевий слід сталеливарні, а цифрові технології допомагають ще більше підвищити **енергоефективність і знизити CO<sub>2</sub>-викиди** (наприклад, цифровий двійник і AI можуть оптимізувати електроспоживання печей та процес виробництва водню) [105]. Новітні DRI-заводи, що будуються у світі (включаючи згаданий проект METINBEST в Італії), закладаються одразу з урахуванням цих цифрових рішень, аби забезпечити їх **конкурентоспроможність і стійкість у довгостроковій перспективі**.

Схематично інформаційні компоненти «розумного» заводу/фабрики наведено на рисунку 3.2.

# Інформаційні компоненти «розумної фабрики»

інтеграція даних IoT, аналітики, віртуалізації та інших технологій у промисловості 4.0

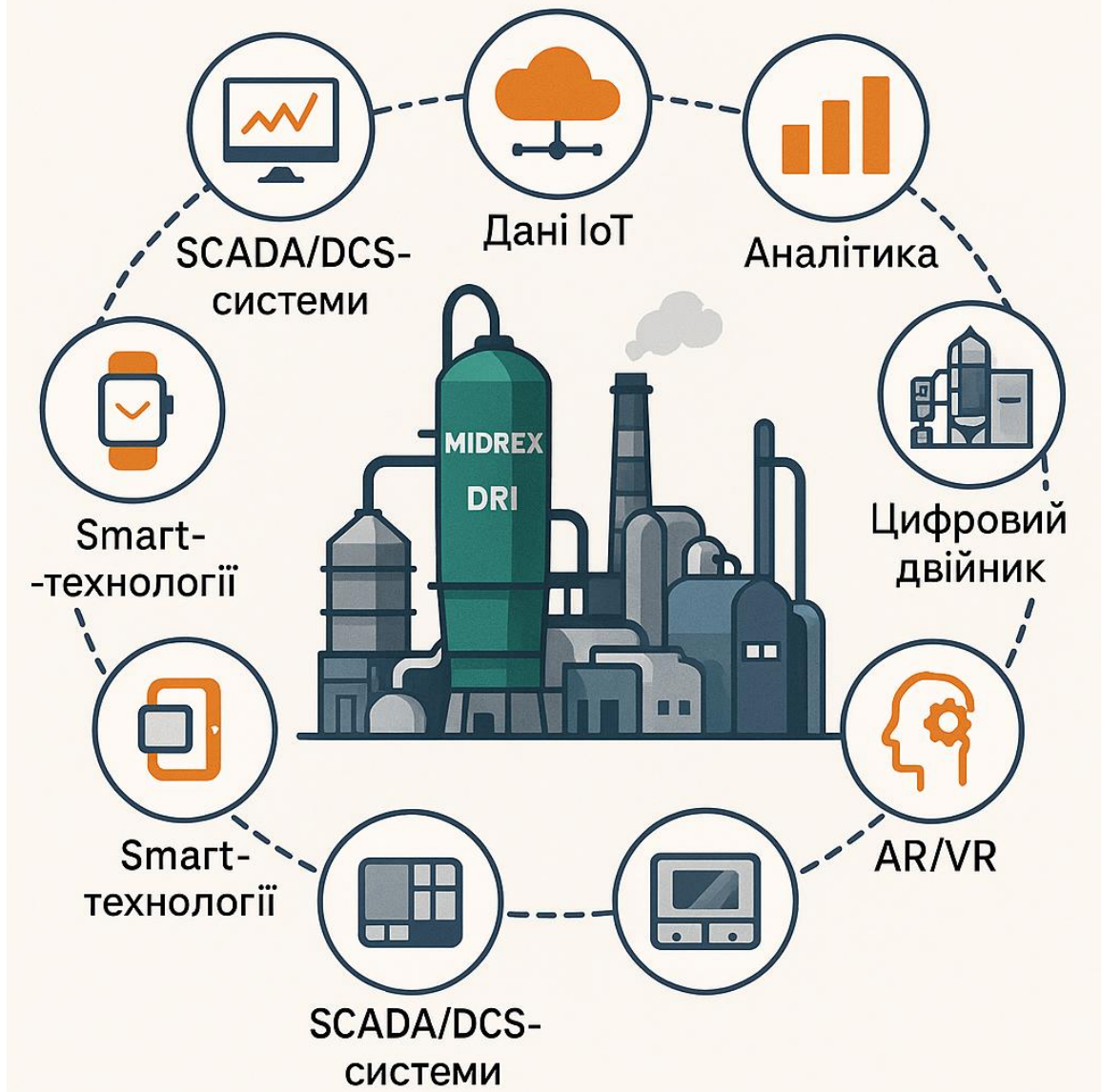


Рисунок 3.2 - Інформаційні компоненти «розумної фабрики» – інтеграція даних IoT, аналітики, віртуалізації та інших технологій у промисловості 4.0

Розроблено автором за допомогою ШІ на основі даних [102],[103],[104].

## **Використання IIoT: сенсори, підключення, дані в реальному часі**

У DRI-модулі за технологією MIDREX встановлено сотні або навіть тисячі датчиків та пристроїв IIoT, які безперервно відстежують параметри процесу в реальному часі. До ключових типів сенсорів належать:

**Температурні датчики** (в шахтній печі по висоті, на виході газу, в реформері) – контролюють температурний режим відновлення руди.

**Датчики тиску і витрати газу** – вимірюють тиск відновлювального газу в різних зонах печі та витрати газу/повітря, забезпечуючи стабільність процесу.

**Газові аналізатори** – онлайн-аналіз складу газу (вміст  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  тощо) для регулювання хімії відновлення.

**Рівнеміри та вагові датчики** – контролюють рівень та подачу залізородних окатків, слідкують за завантаженням печі.

**Вібраційні та температурні сенсори обладнання** – встановлені на компресорах, насосах, редукторах і вентиляторах для контролю стану обладнання (виявлення перегріву, незбалансованості, початку зносу тощо).

**Датчики водяного охолодження** – контроль витрати та температури води, щоб запобігти перегріву апаратів (наприклад, швидке виявлення витоків охолоджуючої води через прецизійні витратоміри).

Ці пристрої необхідно підключити до промислової мережі підприємства, наприклад, через протоколи OPC UA, промисловий Ethernet або по бездротових каналах мережі **5G**, для зв'язку з датчиками і забезпечення гнучкого розгортання IIoT [106]. Бездротові передавачі (Wi-Fi/5G) зменшують залежність від кабельних підключень, що знижує витрати на монтаж і вирішує проблеми з пошкодженням проводки в

гарячому цеху [107]. Дані від всіх сенсорів збираються в режимі онлайн і передаються до центральних систем управління.

### **SCADA/DCS-системи: архітектура, контроль процесу, взаємодія з оператором**

**SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)** та **DCS (Distributed Control System)** – це нервова система DRI-заводу, що забезпечує автоматизацію і нагляд за процесом відновлення заліза. Архітектура типового MIDREX-комплексу включає: датчики і виконавчі механізми на польовому рівні, контролери DCS/PLC на рівні управління процесом та SCADA-сервери і робочі станції оператора на верхньому рівні. Всі ключові параметри технології контролюються в автоматичному режимі, з можливістю втручання оператора через HMI (людино-машинний інтерфейс). Система керування **регулює температуру, тиск і витрати газу в печі та реформері**, швидкість подачі окатків, склад газової суміші, а також координує роботу допоміжних систем (нагрівач газу, охолодження продукту, системи очищення газу). Для безпечної роботи інтегрована також система аварійного захисту (SIS), яка при критичних відхиленнях автоматично виконує аварійні блокування (відсічення газу, продувка, зупинка подачі сировини тощо).

Особливо важливо, що процес прямого відновлення – це складний хіміко-технологічний процес, ближчий до хімічного виробництва, ніж до доменної печі. Тому сучасний DRI-завод потребує високопродуктивної інтегрованої системи керування і безпеки (ICSS), здатної підтримувати оптимальні режими та швидко реагувати на зміни [107]. Розподілена система управління (DCS) виконує тисячі регуляторів і логічних алгоритмів, гарантуючи стабільність температурного профілю по висоті шахтної печі, правильне співвідношення газів у суміші, потрібну швидкість відновлення окатків та контроль ступеня металізації продукту. **SCADA-система** надає операторам зручний огляд процесу: графічні мнемосхеми

відображають поточні параметри (температури, тиски, склад газу, рівні), сигнальні індикатори показують стан обладнання (насоси, компресори, клапани), а система сигналізації привертає увагу до будь-яких аварійних ситуацій. Оператори будуть мати можливість задавати уставки, перемикати режими та підтверджувати квитування тривоги через інтерфейс SCADA. Взаємодія «людина-машина» ретельно опрацьована: дані архівуються, будується тренди параметрів, що допомагає персоналу аналізувати динаміку процесу і приймати обґрунтовані рішення.

Цифрова інфраструктура MIDREX також підтримує **віддалений моніторинг і підтримку в режимі реального часу**, щоб разом з місцевими фахівцями оптимізувати показники процесу [108]. Такий **Remote Support** через інтернет буде дозволяти експертам оперативно аналізувати роботу печі, реформера, систем очистки і т.д., і рекомендувати коригування для підвищення продуктивності чи усунення неполадок. Таким чином, сучасна SCADA/DCS забезпечує не лише **локальний автоматичний контроль** параметрів відновлення, а й прозорість даних для всіх рівнів – від оператора на пульті до віддалених експертів і керівництва, що приймає стратегічні рішення.

**Smart-технології: носимі пристрої, мобільні додатки, цифрова охорона праці, система звітності**

Цей напрям об'єднує різноманітні **смарт-рішення для персоналу і управління**, що роблять роботу на виробництві більш безпечною, зручною та прозорою. Запропоноване впровадження smart-технологій на DRI-виробництві охоплює такі компоненти:

- **Носимі пристрої (wearables).** працівники можуть бути оснащені спеціальними датчиками та електронними пристроями, які вони носять на собі. До них належать **«розумні» каски** з вбудованими сенсорами положення, температури та газоаналізаторами повітря;

**фітнес-браслети/датчики здоров'я**, що моніторять пульс, температуру тіла, рівень фізичного навантаження; **персональні газоаналізатори** для виявлення CO чи H<sub>2</sub>S поблизу працівника. Усі ці wearables підключені до єдиної системи і **в реальному часі передають дані про стан працівника та середовища**. Якщо, наприклад, датчик фіксує, що у працівника піднімається пульс і температура тіла через спеку, система негайно сповістить про ризик теплового удару керівника зміни, і вживатимуться заходи (перерва, охолодження) [109]. Аналогічно, каска з газовим сенсором може подати сигнал тривоги, якщо в повітрі з'явився чадний газ, попереджаючи носія про небезпеку. Таким чином, носимі пристрої **персоніфікують безпеку** – кожен працівник має електронного «сторожа», який стежить за його станом і оточенням та допомагає запобігти нещасним випадкам.

- **Мобільні додатки і портативні девайси.** Керівники та інженери отримують доступ до даних та управлінських функцій через смартфони і планшети. Спеціалізовані мобільні додатки підключені до корпоративних систем (SCADA, MES, ERP) і надають можливості **віддаленого моніторингу**: відповіді на питання «Що зараз відбувається в цеху?» можна отримати, просто відкривши застосунок. Наприклад, начальник виробництва може у будь-який момент перевірити з телефону поточну продуктивність DRI-модуля, температуру в печі або статус роботи реформера. При виникненні аварійної сигналізації система надсилає push-сповіщення відповідальним особам, щоб вони швидко відреагували, навіть якщо не знаходяться біля комп'ютера. Мобільні додатки також спрощують **логістику завдань та обслуговування**: електронні наряди-допуски, чек-листи огляду обладнання, маршрути обходів – усе це може виконуватися на планшеті і одразу потрапляти в центральну базу даних. Таким чином, зникає паперова тяганина, а керівництво у режимі реального часу бачить, які роботи вже виконані, а які – в процесі.

- **Цифрова охорона праці та безпека.** Усі описані вище сенсори й пристрої утворюють розумну систему **EHS (Environment, Health & Safety)**. Вона в реальному часі відстежує переміщення та стан людей на виробництві, а також параметри довкілля (температуру, наявність небезпечних газів, рівень шуму тощо). Якщо людина наближається до небезпечної зони, система може подати **попереджувальний сигнал** (на її носимий пристрій або на диспетчерський пульт) – наприклад, про перевищення гранично допустимого рівня випромінювання або якщо в цю зону не видано дозвіл на роботи. Зараз вже на підприємствах METINVEST запроваджуються рішення для **відстеження місцеположення працівників у режимі онлайн** на території, що підвищує їхню безпеку [17]. У разі інциденту це дозволяє миттєво визначити, хто знаходився поблизу, та швидко провести евакуацію чи медичну допомогу. Цифрова система охорони праці також автоматично фіксує **випадки порушень і подій**: наприклад, якщо спрацював аварійний вимикач або датчик газу – відхилення фіксується в базі, відповідальні отримують повідомлення і запускається розслідування. За допомогою AI такі системи можуть **прогнозувати ризики** – на основі дрібних сигналів (наприклад, регулярних перевищень допустимої температури в окремій зоні) аналізується ймовірність аварії і завчасно пропонуються превентивні заходи.

- **Цифрова система звітності і підтримки рішень.** Інтеграція всіх даних – від датчиків IIoT до результатів лабораторних аналізів та показників ERP – дозволяє створити єдине **інформаційне середовище** для менеджменту заводу. У режимі *dashboard*-панелей керівники будуть бачити ключові показники ефективності (KPI) виробництва: випуск продукції за зміну, витрати газу на тонну DRI, відсоток простою обладнання, кількість інцидентів з безпеки тощо. Ці панелі автоматично формуються з достовірних даних і оновлюються в реальному часі, що економить час на підготовку паперових звітів. Керівництво може

«провалюватись» (drill down) в дані, переходячи від загальних цифр до деталей – наприклад, побачити, яка саме причина викликала зниження продуктивності вчора о 15:00 (система покаже: аварійна зупинка компресора, тривав ремонт 1 годину). Цифрова система звітності також буде допомагати в **прийнятті рішень**: на основі накопиченої статистики будується прогноз виконання виробничого плану, оцінюються альтернативні сценарії (наприклад, як вплине на річний випуск впровадження другого модуля DRI). Дані з системи можна легко експортувати для підготовки презентацій, графіків і звітів для акціонерів чи регуляторів. В цілому, цифрова прозорість процесів робить управління виробництвом більш науково обґрунтованим – рішення спираються на актуальну інформацію, а не інтуїцію.

### 3.5 Формування команди та організаційна структура інтегрованого підрозділу

У проєкті інтегрованого підприємства до існуючого ЦГЗК додається нове виробництво за технологією MIDREX, яке опрацьовує концентрат комбінату з метою випуску DRI/HBI. Чисельність персоналу цього нового виробництва передбачається на рівні 150–160 осіб. Частина фахівців доцільно залучити з інших підприємств METINVEST, які мають досвід у доменному чи сталеплавильному виробництві, та провести їх перенавчання під новий процес. Структура управління повинна включити керівника виробництва (відповідає за загальну координацію), начальників ключових відділів – виробничого, технічного (обслуговування обладнання), відділу якості, структура при цьому матиме наступні основні особливості:

**Головне управління** – на рівні об'єднаного ГЗК (OGOK), тобто генеральний директор та вищі директори (з виробництва, інжинірингу, якості тощо) залишаються спільними для ЦГЗК і нового підрозділу. Формально Midrex-цех розглядається як окремий виробничий підрозділ у

складі ПРАТ «ЦГЗК», підпорядкований дирекції з виробництва та планування Активу.

**Підрозділи виробництва Midrex та кількість персоналу (приблизно):**

✓ Цех виробництва НВІ –  $\approx 80$  осіб (машиністи агрегатів, оператори, майстри);

✓ Ремонтно-механічний цех –  $\approx 30$  осіб (слюсарі, токарі, фрезерувальники для обслуговування обладнання);

✓ Автоматично-електричний цех –  $\approx 15$  осіб (електромонтери, автоматики, релейники для обслуговування систем керування й електрообладнання);

✓ Лабораторія контролю якості та технологічний відділ –  $\approx 5$  осіб (інженери-технологи, лаборанти);

✓ Відділ внутрішньозаводської логістики –  $\approx 5$  осіб (водії, оператори конвеєрів для пересування сировини та готової продукції);

✓ Служба охорони праці та екології –  $\approx 5$  осіб (інженери з ОП, екологи);

✓ Адміністративно-кадровий відділ (бухгалтерія, HR, управлінці) –  $\approx 10$  осіб.

Сума вищевказаних штатних одиниць дає приблизно 140–150 працівників. Ця модель передбачає, що ключові службовці (керівники відділів, інженери, служба безпеки тощо) будуть по можливості залучені спільно з існуючими структурами ЦГЗК та ОГЗК. Наприклад, керівництво підрозділу Midrex здійснюватиме заступник директора з виробництва Активу або спеціально призначений майстер підрозділу, а інженерні служби (інжинірингу, охорони праці, постачання) продовжують працювати централізовано.

Таким чином, підсумкова організаційна структура матиме дві частини: (1) існуючий ЦГЗК із його теперішніми цехами і службами, якими й надалі керує дирекція ЦГЗК і підпорядковані їй департаменти; (2) новий цех «Midrex (HBI)» зі згаданими виробничими і допоміжними підрозділами, який формально входить до ЦГЗК і координується через уже наявні дирекції (з виробництва, інжинірингу, постачання тощо). Така модель забезпечує максимальну інтеграцію нового виробництва в існуючу структуру комбінату під загальним керівництвом ОГЗК, що сприятиме уніфікації стандартів, оптимізації управління та економії на адміністративних витратах.

### **Потреба в персоналі на новому HBI виробництві**

Нове виробництво гарячобрикетованого заліза (HBI) на базі ЦГЗК матиме річну продуктивність 1,7–2,5 млн т. Оцінка чисельності персоналу для такого підприємства базується на досвіді аналогічних заводів на технології MIDREX, а саме: на заводі Cleveland-Cliffs у Толідо (США) потужністю близько 1,2 млн т/рік штат становив близько 140 осіб. В проєкті Voestalpine (Corpus Christi, Техас) при 2 млн т/рік планувалося близько 150 співробітників. Отже, можна очікувати, що HBI-завод на 1,7–2,5 млн т/р потребуватиме приблизно 130–190 працівників (порядку 75 осіб на 1 млн т продукції). Середній рівень автоматизації виробництва також впливає: при «середній» автоматизації (не повністю ручна, але й не повністю автоматизована лінія) чисельність персоналу буде близькою до наведених прикладів.

### **Перерозподіл персоналу та найм нових працівників**

Згідно з умовами «оптимізації без звільнень», суттєву частину потрібних кадрів можна набрати за рахунок внутрішнього переведення з існуючих підприємств Групи. Наприклад, якщо для HBI-виробництва потрібно ~160 осіб, то 40–60 осіб (≈25–40%) можна було б «перекомплектувати» з ЦГЗК/ОГЗК, перепрофілювавши фахівців

(операторів, інженерів, ремонтників) на нові завдання. Решту 100 осіб ( $\approx 60\text{--}75\%$ ) доведеться наймати з ринку праці. Такий підхід враховує, що ОГЗК має великий штат («13 000+ співробітників»), а на ЦГЗК зараз працює понад 3800 осіб, тож кадрових ресурсів достатньо. Переміщення існуючих працівників дозволить уникнути звільнень: вони пройдуть перепідготовку та займуть нові позиції.

### **Профілі працівників та контроль якості**

Персонал НВІ-виробництва класифікуємо за такими основними профілями:

- **Операційний персонал** – оператори установок прямого відновлення (редукційних печей), оператори брикетування та лінії підготовки сировини. Саме ці працівники цілодобово здійснюють безпосередній контроль процесів (завантаження матеріалів, пуск/зупинка технологічних агрегатів, попередній огляд обладнання тощо).
- **Технічні інженери й спеціалісти** – інженери-технологи (пряме відновлення, брикетування, енергетики), інженери з автоматизації, інженери з експлуатації газової частини (реформери), а також інженери з безпеки (HSE). Вони розробляють технологічні карти, контролюють хід процесу та впроваджують вдосконалення, а також забезпечують безпечні умови праці.
- **Служби ремонту та обслуговування** – ремонтні бригади механіків, електриків, інструментальників, тощо. Ці спеціалісти обслуговують і ремонтують редуктори, транспортери, конвеєри, електроустаткування та автоматизовані системи управління, забезпечують безперебійну роботу виробництва.
- **Служби логістики та забезпечення** – фахівці з закупівель та матеріально-технічного забезпечення (складальники, комірники), які займаються постачанням сировини (пелети, газ, цехова вода) і

відвантаженням готової продукції. Також сюди належать водії, оператори навантажувальної техніки та працівники елеваторного господарства.

- **Персонал контролю якості та управління якістю** – лаборанти металургійної лабораторії (аналіз складу НВІ, вологість, механічні властивості тощо), інженери з контролю процесу (моніторинг показників в реальному часі), менеджери з якості, які відповідають за відповідність продукції стандартам (ISO, технічним умовам) та проведення внутрішніх аудитів.

- **Адміністративно-управлінський персонал** – керівники змін і відділів, відділ кадрів (HR), бухгалтерія, служба безпеки, IT-фахівці, а також керівники проекту та менеджмент заводу. Вони здійснюють планування роботи, управління персоналом та ресурсами підприємства.

Таким чином, штат НВІ-виробництва включатиме операторів технологічних процесів, інженерно-технічних спеціалістів, ремонтні бригади, працівників контролю якості та інших служб (закупівель, безпеки, адміністрації), згрупованих за функціональними профілями.

### **Залучення та відбір персоналу**

На нове НВІ-виробництво знадобиться персонал різного профілю: оператори установки Midrex, спеціалісти з автоматизації (SCADA/MES), лаборанти контролю якості, інженери-механіки, електрики, фахівці з охорони праці тощо. Частина працівників може бути переведена з існуючих підприємств METINVEST (після відповідного навчання), але значну частину команди доведеться найняти на зовнішньому ринку, зокрема молодих інженерів та випускників технічних спеціальностей регіону. Для залучення талановитих кадрів METINVEST може використати співпрацю з освітніми установами та власну корпоративну освітню ініціативу “ METINVEST ПОЛІТЕХНІКА”. METINVEST має програми дуального навчання та власний корпоративний університет, де готуються майбутні фахівці під потреби компанії [110]. Важливо забезпечити

конкурентні умови оплати і соціальний пакет, аби утримати кваліфікованих працівників у Кривому Розі. Окрім професійних навичок, при відборі увага приділяється готовності до навчання та прийняття корпоративної культури METINVEST – на співбесідах оцінюються такі якості, як командність, відповідальність за безпеку, орієнтація на результат.

**Навчання та розвиток персоналу.** Після комплектування штату ключовим завданням є навчання і підвищення кваліфікації співробітників. Система навчання в компанії представлена Корпоративним університетом та мережею навчальних центрів на комбінатах [110]. Нові працівники проходять спеціальні програми адаптації (онбордингу), де знайомляться з виробничими процесами, технікою безпеки, корпоративними стандартами METINVEST [110]. Важливим елементом є наставництво – за кожним новачком закріплюється досвідчений керівник або колега, який проводить практичне навчання на робочому місці.

### **Цифрові методи навчання: тренажери, VR/AR і e-learning**

Сучасні технології навчання суттєво підвищують ефективність підготовки персоналу нового виробництва. На НВІ-дільниці планується застосування тренажерів та симуляторів для операторів – спеціальних програмно-апаратних комплексів, що імітують роботу установки прямого відновлення, систем транспортування та допоміжного обладнання. Це дозволяє працівникам набувати навичок керування процесом без ризику для реального виробництва. **Віртуальна (VR) та доповнена реальність (AR)** відкривають нові можливості для промислового навчання. Провідні металургійні компанії вже впроваджують VR-симуляції: наприклад, на ArcelorMittal у Люксембурзі створено 3D-модель цеху, де співробітники віртуально відпрацьовують сценарії з потенційними небезпеками [111]. VR-тренінги дають можливість персоналу безпечно й реалістично тренуватися виконувати небезпечні або складні операції. За даними StellarX, використання VR для навчання на сталеливарних заводах підвищує впевненість працівників у виконанні робіт на 90% – люди глибше

розуміють наслідки помилок і краще запам'ятовують правильні дії [111]. До того ж VR-технології дозволяють багаторазово повторювати операції без витрат матеріалів і простоїв обладнання [111].

Не менш важливим є застосування електронного навчання (**e-learning**). METIHBECT уже впроваджує онлайн-платформи: діє корпоративний портал знань Wiki-Master з базою статей від експертів та навчальна платформа Eduson з десятками курсів [110]. Зараз понад половину співробітників Групи пройшли хоч би один курс електронного навчання [110]. Для нового НВІ-підрозділу потрібно розробити спеціальні онлайн-курси з технології прямого відновлення, регламентів ISO 9001, охорони праці тощо. Дистанційні формати навчання зручні тим, що працівники можуть навчатися у власному темпі, повторювати матеріал за потреби, а HR-служба відстежує результати через систему.

Таким чином, цифрові методи (VR-симулятори, e-learning) стануть важливим компонентом системи розвитку персоналу нового виробництва, забезпечуючи швидке й якісне освоєння нових компетенцій.

### 3.6 Інтеграція СМЯ з ERP, SCADA, MES та IIoT

Сучасна система управління якістю повинна бути тісно переплетена з цифровою екосистемою підприємства. На новому НВІ-заводі пропонується передбачити впровадження комплексу IT-рішень: **SCADA** для контролю роботи обладнання в реальному часі, **MES** (Manufacturing Execution System) для диспетчеризації виробництва і збору виробничих даних, а також корпоративна **ERP-система (SAP)** для управління ресурсами, збутом, закупівлями тощо. Інтеграція СМЯ з цими системами означає, що всі дані з контролю якості та показники процесів автоматично фіксуються, аналізуються і стають основою для ухвалення рішень. Зокрема, якісні показники продукції (хімічний склад, міцність, розмір НВІ) можуть вводитися в модуль якості ERP – це дозволяє позбутися паперової роботи і спростити підготовку до аудитів ISO [112]. Система ERP,

інтегрована з якістю, автоматично генерує необхідні звіти і записи, що відповідають вимогам стандарту (реєстрація невідповідностей, результати перевірок тощо) [112].

Ключові параметри технології і обладнання, їх моніторинг та фіксація відхилень також інтегрована в систему SAP/

**Приклад користі інтеграції:** якщо датчик виявив, що температура відновлення заліза відхилилася від норми, сигнал через SCADA надходить в MES, яка може автоматично зупинити подачу сировини або скоригувати параметри, аби запобігти отриманню неякісного DRI [113]. Водночас MES сповістить оператора і передасть інформацію в ERP як відхилення з якості. Така **проактивна система контролю** зменшує відходи й брак, адже виробництво зупиняється одразу при виявленні дефекту, не допускаючи великої партії неякісного продукту [113]. Крім того, усувається дублювання даних і людський фактор: замість паперових журналів чи ручного введення інформації все фіксується автоматично. Це скорочує імовірність помилок та полегшує доступ до даних аналізу – інженери з якості можуть будувати графіки, діаграми прямо з систем, виявляючи тенденції. Практика показує, що єдиний інформаційний простір “цех–офіс” підвищує ефективність управління: керівники бачать вузькі місця і реагують швидше, планувальники в ERP краще прогнозують випуск продукції й потребу в ресурсах [113]. Для METINVEST інтеграція систем також вигідна з точки зору масштабування – дані з нового HBI-заводу зможуть агрегуватися на рівні всього холдингу для стратегічного аналізу (наприклад, порівняння ефективності різних виробництв, контроль витрат).

**Отже,** інтеграція СМЯ з ERP/MES/SCADA/IIoT на новому підприємстві забезпечить **прозорість і керованість якості**: кожна брикетована тонна заліза матиме “цифровий паспорт” з усіма параметрами виробництва, а керівництво в режимі онлайн відстежуватиме ключові показники якості та продуктивності. Це відповідає

концепції Industry 4.0, де якість гарантується не постфактум, а «вбудована» у процес завдяки даним і автоматизації.

Не менш важливою є **пряма участь працівників у системі якості та вдосконаленні процесів**. Щоб СМЯ була живою і результативною, всі – від оператора до директора – мають робити внесок у її розвиток. Для цього на новому виробництві пропонується впровадити кілька ініціатив. По-перше, **команди** безперервного вдосконалення в основних підрозділах. Це невеликі групи працівників, які періодично збираються (наприклад, раз на місяць) для обговорення своїх ідей щодо покращення роботи – підвищення якості продукції, зручності робочих місць, економії ресурсів.

Таким чином, завдяки поєднанню **системних підходів (ISO 9001, інтеграція ІТ-систем, КРІ, PDCA)** та **активної участі персоналу (навчання, компетенції, операційні покращення)** нове виробництво НВІ на ЦГЗК матиме потужну систему управління якістю. Це дозволить випускати конкурентоспроможну продукцію стабільно високої якості, швидко реагувати на відхилення і постійно підвищувати ефективність процесів. Дотримання кращих світових практик HR-менеджменту та СМЯ не лише забезпечить успішний старт проекту, але й закладе фундамент для довгострокового розвитку цього стратегічного для МЕТІНВЕСТ напрямку.

## **Висновки**

Впровадження системи управління якістю на основі КПТІО дозволяє забезпечити превентивний контроль від етапу проектування до експлуатації. Ключові параметри технології та обладнання стають базою для інтеграції в існуючі СМЯ ЦГЗК.

Запропоновані механізми автоматизованого моніторингу, контролю на вході/виході (від концентрату до НВІ), а також зв'язок з іншими виробництвами через єдину систему управління. Регламент управління

якістю "Метінвест Холдинг" №04 (2021) виступає основою для адаптації вимог ISO до нових умов.

Запропоновано створити наскрізну цифрову платформу моніторингу параметрів (Fe, домішки, щільність тощо) для забезпечення простежуваності та відповідності якісним стандартам ЄС.

**Отже** виробництво прямих відновленого заліза за технологією MIDREX матиме успіх, якщо поряд із передовим обладнанням будуть впроваджені і передові підходи до управління. Поєднання **сучасних управлінських моделей** (ощадливість, гнучкість, загальне управління якістю, аналітичне зниження дефектів), **систематичного управління якістю** (стандартизовані процеси ISO 9001, галузеві вимоги, культура безперервних покращень, багатоетапний контроль) та **цифрових інструментів** (ІІоТ, аналітика, цифрові двійники, автоматизований контроль, прогнозне обслуговування, інтеграція ERP) дозволить максимізувати ефективність і надійність DRI-процесу. Світовий досвід свідчить, що такі практики дають реальні результати: зниження витрат, підвищення якості продукції, гнучку реакцію на попит і екологічні вимоги. В умовах зростаючої конкуренції і переходу до «зеленої» металургії, сучасні управлінські підходи стають такою ж важливою складовою успіху, як і сама технологія прямого відновлення заліза. Це закладає фундамент для довгострокового розвитку і лідерства нового DRI-виробництва.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА НА НОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ НВІ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ MIDREX

Запуск виробництва гарячебрикетованого заліза (НВІ) за технологією MIDREX на базі Центрального ГЗК вимагає суворого дотримання міжнародних стандартів охорони праці та екологічної безпеки. Компанія METINVEST, до складу якої входить ЦГОК, впроваджує інтегровану систему управління охороною праці та навколишнім середовищем на основі стандартів ISO 45001 (менеджмент охорони праці) та ISO 14001:2015 (менеджмент навколишнього середовища) [114]. Це відповідає корпоративній політиці Метінвесту, що орієнтована на **Vision Zero** – нуль травм на виробництві [114], – та забезпечує системний підхід до безпеки і екологічної відповідальності на новому НВІ-виробництві.

### 4.1 Загальні вимоги до охорони праці

На новому виробництві впроваджується сучасна система охорони праці з акцентом на **превенцію нещасних випадків** і залучення персоналу до культури безпеки. Основні елементи системи охорони праці включають:

**Система менеджменту безпеки (ISO 45001):** Діє інтегрована HSE-система, що щорічно проходить аудит на відповідність ISO 45001 [114]. Керівництво визначає цілі з охорони праці, здійснює планування та контроль ризиків, аби досягти «нульового» рівня травматизму на виробництві.

**Ідентифікація небезпек і контроль ризиків:** Регулярно проводиться оцінка професійних ризиків з використанням міжнародних практик – аналіз небезпечних факторів (HAZID), операційний аналіз небезпек (HAZOP), екологічний аналіз небезпек (ENVID). Впроваджено стандарти безпечної роботи: процедури Lockout/Tagout (LOTO) для

знеструмлення обладнання, система наряд-допусків (Permit-to-Work) на виконання ремонтних та вогневих робіт, методики Job Safety Analysis (JSA) для оцінки ризиків перед початком завдання [114]. Ці заходи гарантують, що роботи виконуються лише після усунення або мінімізації небезпечних факторів.

**Навчання та культура безпеки:** Усі працівники проходять регулярні інструктажі, тренінги та перевірку знань з охорони праці. На підприємствах METINBESTу діють спеціальні «парки безпеки» – тренінгові центри, де персонал відпрацьовує навички безпечної роботи в умовах, наближених до реальних [114]. Запроваджена система мотивування за дотримання правил (преміювання, рейтинг підрозділів) та повідомлення про небезпечні ситуації без покарань, щоб заохотити працівників проактивно дбати про свою безпеку.

**Цифрові технології та інновації:** Нове виробництво планується оснащувати сучасними засобами *digital safety*. Зокрема, застосовуватимуться носимі датчики і пристрої (**wearables**), що контролюють параметри довкілля та стан працівника (газоаналізатори, сенсори положення тощо) в режимі реального часу

#### 4.2 Вимоги до екологічної безпеки

**Екологічна безпека** на новому НВІ-виробництві забезпечується через впровадження системного екологічного менеджменту і найкращих доступних технологій мінімізації впливу на довкілля. Ключові напрями екологічного менеджменту включають:

- **Екологічна система менеджменту (ISO 14001:2015):** На підприємстві діятиме система екологічного управління, сертифікована за ISO 14001. Це означає наявність екологічної політики, планування природоохоронних заходів, моніторинг екологічних аспектів діяльності та процес постійного вдосконалення. Щорічно проводяться внутрішні і

зовнішні аудити на відповідність вимогам стандарту, що підтверджують ефективність системи. (ЦГОК вже має досвід сертифікації за ISO 14001, що підтверджено отриманням сертифіката відповідності системи екологічного менеджменту).

- **Контроль викидів і MRV парникових газів:** HBI-виробництво за технологією MIDREX характеризується значно меншими викидами забруднюючих речовин порівняно з доменним процесом, однак воно потребує ретельного контролю викидів газів (оксиди азоту, оксиди вуглецю, пил та ін.). Буде встановлено сучасні газоочисні установки (рукавні фільтри, скрубери) на ділянках відновлення та брикетування заліза, щоб мінімізувати пил та газові викиди. Передбачається система безперервного моніторингу викидів (CEMS) на ключових трубах, яка в реальному часі відстежує концентрацію пилу, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> тощо. Особлива увага – контролю парникових газів (CO<sub>2</sub>): відповідно до вимог українського законодавства та європейських практик, впроваджується система моніторингу, звітності і верифікації (MRV) викидів CO<sub>2</sub>. Кожен квартал підприємство обраховує тонни CO<sub>2</sub>, що утворилися при виробництві, ці дані перевіряються незалежними аудиторами. Такий облік необхідний для прозорого декларування «вуглецевого сліду» продукції, особливо з урахуванням механізму CBAM. Для зниження викидів парникових газів у майбутньому передбачено можливість впровадження технологій уловлювання і зберігання вуглецю (CCS).

- **Раціональне водокористування:** Процес виробництва HBI включає використання води (наприклад, в системах охолодження газів, охолодженні брикетів та технологічного обладнання). Для мінімізації впливу на водні ресурси буде реалізовано **замкнутий цикл водопостачання** – вода після використання проходить очищення (механічне, хімічне) і повертатиметься в процес, що зведе до мінімуму скиди стічних вод. Системи водопідготовки забезпечать відповідність якості води вимогам технології та охорони довкілля. На підприємстві

будуть споруджені очисні споруди для очищення стоків від нафтопродуктів, зважених часток і металів перед повторним використанням або випуском. Також передбачено заходи зі скорочення споживання свіжої води – встановлення насосів з частотним регулюванням, рециркуляційних контурів охолодження тощо. Це відповідає підходам **best water management practices**, прийнятим у світовій металургії.

- **Поводження з відходами:** Нове виробництво буде прагнути до безвідходності шляхом максимальної утилізації та переробки побічних продуктів. Основні тверді відходи при виробництві НВІ – це шлами та пил уловлювачів (збагачені оксидом заліза), непридатні брикети, відпрацьований каталізатор (в установці риформінгу). Планується їхнє повернення в технологічний цикл або використання як вторинної сировини. Зокрема, пил та окалину можна брикетувати і знову подавати в відновлювальну піч; металеві оксидні відходи – спрямовувати на агломерацію чи збагачення. Небезпечні відходи (відпрацьовані мастила, реагенти) збиратимуться і передаватимуться ліцензованим підрядникам для утилізації. Для побутових відходів організують сортування (металобрухт, пластик, деревина) з подальшою переробкою. Таким чином, виконуються вимоги європейських директив щодо відходів і принципи **circular economy** в металургії.

- **Екологічний моніторинг і звітність:** Підприємство запровадить систему екологічного моніторингу, що охоплює якість атмосферного повітря навколо майданчика, стан ґрунтів і вод. Будуть встановлені автоматичні пости контролю якості повітря на межі санітарно-захисної зони, що відстежуватимуть концентрації пилу та газів. Результати моніторингу регулярно надаватимуться місцевим екологічним органам. Окрім виконання нормативних вимог, компанія дотримується принципів прозорості у висвітленні екопоказників. METINVEST щороку публікує **звіт зі сталого розвитку**, де розкриває дані про викиди в

атмосферу, споживання енергії, води, утворення відходів та екологічні інвестиції, керуючись міжнародними стандартами **GRI** (Global Reporting Initiative). Також впроваджено практики управління кліматичними ризиками за рекомендаціями **TCFD** (Task Force on Climate-related Financial Disclosures) – компанія відкрито інформує про свій **вуглецевий слід** і заходи з декарбонізації [115]. Інтеграція ESG-принципів (Environmental, Social, Governance) в управління підтверджує відповідність підприємства найкращим світовим практикам і підвищує довіру з боку європейських партнерів [115].

**Відповідно до стандартів METINVEST**–керуюча компанія нового НВІ-проєкту – вже зараз імплементує кращі світові практики HSE. Група створила корпоративний стандарт HSE Policy and Principles, адаптований до міжнародного досвіду. На підприємствах METINVESTу діє 15 корпоративних стандартів безпеки, що охоплюють всі аспекти – від роботи на висоті до експлуатації транспортного обладнання [114]. До прикладу, впроваджено єдиний підхід до Lockout-Tagout і Permit-to-Work, що значно знизило кількість інцидентів при ремонтних роботах. Металурги METINVESTу щороку проходять навчання в учбово-тренувальних центрах, зокрема на ЦГОК діє полігон для тренувань з охорони праці. У екологічному вимірі, METINVEST щороку публікує Нефінансовий звіт, де за стандартами GRI висвітлює дані про вплив на довкілля. Група приєдналася до міжнародної ініціативи Vision Zero та підтримує Глобальний договір ООН, звітуючи за цілями сталого розвитку. В умовах підготовки до дії CBAM, у 2024 році METINVEST розпочав інтеграцію системи Climate Change Management, адаптуючи бізнес до вимог європейського зеленого курсу. ЦГОК, як частина групи, керується цими ж принципами. Отже, нове виробництво НВІ у Кривому Розі матиме міцний фундамент з точки зору корпоративних стандартів безпеки та екологічної стійкості

**Отже** провадження систем охорони праці та екологічної безпеки на новому НВІ-виробництві за технологією MIDREX є критично важливим для успіху проєкту. Дотримання вимог ISO 45001 і ISO 14001, використання цифрових рішень для безпеки, суворий контроль викидів та прозора ESG-звітність забезпечать безпечну роботу персоналу і мінімізують вплив на довкілля. Таким чином, підприємство відповідатиме політиці сталого розвитку METINVESTу і найкращим галузевим практикам, створюючи передумови для довгострокової ефективної діяльності.

## ВИСНОВКИ

Глобальні трансформації в галузі чорної металургії, зумовлені потребою в декарбонізації виробництва та зменшенні залежності від коксу, вимагають від української металургії переходу до нових технологічних рішень. Аналіз сучасних тенденцій розвитку виробництва заліза прямого відновлення (DRI) та гарячебрикетованого заліза (HBI) засвідчує, що провідною відповіддю на ці виклики є впровадження безкоксівих та низьковуглецевих технологій.

У цьому контексті ключову роль відіграє вибір відповідної технології. На основі проведеного SWOT-аналізу та бенчмаркінгу встановлено, що технологія MIDREX є найбільш адаптивною до якості сировини Центрального ГЗК, забезпечує найнижчі викиди серед комерційно освоєних рішень, має підтверджену промислову ефективність і гнучкість у масштабуванні. Це робить її найбільш доцільним вибором для створення нового виробництва HBI в Україні.

При цьому створення продукції з високою доданою вартістю є не лише елементом стратегії промислової політики, а й основним економічним аргументом. Виробництво HBI з української руди на території країни дозволяє залишати ланцюг створення вартості всередині держави. Поряд із податковими надходженнями, це формує сталу економічну основу для залучення інвестицій, зменшує залежність від експорту напівфабрикату (окатків) та підвищує конкурентоспроможність на глобальному ринку сталі.

Важливо, що організаційна модель нового виробництва HBI передбачає його інтеграцію в існуючу структуру об'єднаного гірничо-збагачувального комбінату (ОГЗК), що входить до складу Групи МЕТІНВЕСТ. Такий підхід дозволяє забезпечити керованість, скористатися кадровими ресурсами існуючих підприємств, зменшити потребу у зовнішньому наймі (до 40% персоналу може бути переведено з

ЦГЗК/ОГЗК) та зберегти безперервність управлінських і виробничих процесів.

**Основну увагу** в роботі приділено питанню **превентивного управління якістю** шляхом впровадження системи **ключових параметрів технології та обладнання (КПТІО)**. Доведено, що визначення критичних параметрів, їхнє документування, моніторинг і регулювання вже на етапі проєктування є основою стабільної та ефективної роботи виробництва. Основна пропозиція роботи — врахування управління та контролю КПТІО ще на етапі проєктування, включно з адаптацією існуючих показників під доданий ланцюг виробництва та впровадження нових параметрів контролю, орієнтованих на специфіку технології MIDREX. Запропоновано максимальну автоматизацію моніторингу КПТІО, що дозволяє знизити вплив людського фактору та підвищити надійність процесу.

Особливо важливо інтегрувати контролі на стику між окатками (вихідна продукція ЦГЗК) і НВІ-виробництвом (вхідна сировина для MIDREX). Узгодженість цих параметрів і об'єднання контролю в рамках єдиної системи якості є запорукою досягнення стабільних показників готового продукту.

З урахуванням вищезазначеного, обґрунтовано впровадження **інтегрованої системи менеджменту якості (СМЯ)**, що включає вимоги ISO 9001, ISO 14001 та ISO 45001. У роботі запропоновано модель цифрової СМЯ з повною інтеграцією у внутрішні ІТ-системи підприємства — ERP, MES, SCADA, ІІоТ. Така система дозволяє здійснювати контроль у реальному часі, забезпечує простежуваність критичних показників, підвищує операційну стабільність і безпечність процесів.

У межах ESG-підходу та соціальної відповідальності, проєкт нового НВІ-заводу також спрямований на формування відповідального виробництва. Це включає не лише зниження викидів CO<sub>2</sub> (завдяки

використанню природного газу або водню замість коксу), а й впровадження систем охорони праці, цифрових тренажерів, перепідготовку персоналу та розвиток екологічної культури на виробництві.

Прогнозоване зростання глобального попиту на НВІ у найближчому десятилітті (як на альтернативу брухту для електросталеплавильних печей) створює стратегічне вікно можливостей для України. Реалізація запропонованого проєкту дозволить не лише забезпечити внутрішню металургію якісною сировиною, а й посилити експортний потенціал країни, знизити залежність від імпортного брухту та забезпечити економічну стійкість гірничо-металургійного комплексу.

Таким чином, перехід до виробництва заліза прямого відновлення (DRI) та гарячебрикетованого заліза (НВІ) на основі технології MIDREX є не лише сучасним промисловим трендом, але й критично необхідною умовою збереження позицій української металургії на світових ринках. Хто не переходить до безкокскових технологій — втрачає ринки, конкурентні переваги та інвестиційну привабливість.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Зустрічайте зелені технології, які змінять геополітику металургії // Reuters. URL: <https://www.reuters.com> (дата звернення: 01.11.2024).
- 2 Increasing HBI Capacity for the Merchant Market // Midrex Technologies, Inc. URL: <https://www.midrex.com/tech-article/increasing-hbi-capacity-for-the-merchant-market> (дата звернення: 03.11.2024)
- 3 Металурги в лещатах мит і політики обмежень: що буде з експортом сталі // Metinvest Media. URL: <https://metinvest.media/ua/page/metalurgi-v-leshchatah-mit--poltiki-obmezhen-shcho-bude-z-eksportom-stal> (дата звернення: 10.11.2024).
- 4 Учасники робочої групи із "зеленої" металургії в рамках підготовки Плану для Ukraine Facility запропонували 46 проєктів на \$7,4 млрд // GMK Center. URL: <https://gmk.center> (дата звернення: 02.07.2025).
- 5 Україна може стати основним постачальником DRI до ЄС — GMK Center. URL: <https://gmk.center> (дата звернення: 01.11.2024).
- 6 CEO Метінвесту розповів про план переходу до зеленої металургії // POKROVSK.NEWS. URL: <https://pokrovsk.news> (дата звернення: 02.06.2025).
- 7 Кухар В., Шкрабак І., Шаульська Л., Чуб Н., Приходков А. Організаційні засади впровадження металургійних кластерів та відновлення промислового потенціалу України на основі розвитку водневих технологій // Modeling the Development of the Economic Systems. 2025. № 1. С. 101–107. DOI: <https://doi.org/10.31891/mdes/2025-15-14>
- 8 Social Responsibility – Metinvest. URL: <https://metinvestholding.com> (дата звернення: 22.01.2025).
- 9 Primetals, Midrex і Металоінвест закладають міцний фундамент для розвитку «зеленої» металургії // Midrex Technologies, Inc. URL: <https://www.midrex.com> (дата звернення: 4.03.2025).
- 10 Металурги в лещатах мит і політики обмежень: що буде з експортом сталі [повтор] // Metinvest Media. URL: <https://metinvest.media/ua/page/metalurgi-v-leshchatah-mit--poltiki-obmezhen-shcho-bude-z-eksportom-stal> (дата звернення: 02.04.2025).
11. Чуб Н.С., Костенко І.С. Продуктивність застосування Power BI для дослідження макроекономічних показників країни. Матеріали 7

міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів «Інженерія програмного забезпечення і передові інформаційні технології (Soft Tech-2024). 20-22 листопада 2024 року, м. Київ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», ФІОТ, С. 128-132.

12 Increasing HBI Capacity for the Merchant Market // Midrex Technologies, Inc. URL: <https://www.midrex.com/tech-article/increasing-hbi-capacity-for-the-merchant-market> (дата звернення: 10.04.2025).

13 Metinvest долучиться до платформи з відновлення української металургії з застосуванням зелених технологій [Електронний ресурс] // Metinvest Holding. URL: <https://metinvestholding.com/en/media/news/metinvest-dodnutjsya-do-platformi-z-vdnovlennya-ukrainsjko-metalurg-z-zastosuvannyam-zelenih-tehnologj> (дата звернення: 10.04.2025).

14 *GMK Center. Demand for DRI is growing in the EU – what does it mean for Ukraine?* [Електронний ресурс] // LinkedIn. URL: [https://www.linkedin.com/posts/gmk-center\\_demand-for-dri-is-growing-in-the-eu-what-activity-7282683878937419778-qKWl](https://www.linkedin.com/posts/gmk-center_demand-for-dri-is-growing-in-the-eu-what-activity-7282683878937419778-qKWl) (дата звернення: 01.03.2025)

15 Ukraine has the potential to become part of Europe’s green course — Ferrexpo // GMK Center. URL: <https://gmk.center/en/news/ukraine-has-the-potential-to-become-part-of-europe-s-green-course-ferrexpo/> (дата звернення: 04.07.2025).

16 Супер-ГЗК: Метінвест об’єднує під єдиним керівництвом гірничо-збагачувальні комбінати в Кривому Розі [Електронний ресурс]. URL: ([\*Супер-ГЗК: Метінвест об’єднує під єдиним керівництвом гірничо-збагачувальні комбінати в Кривому Розі\*](#)) (дата звернення: 04.06.2025).

17 Operational review (стратегічний звіт 2021) [Електронний ресурс] // Metinvest Holding. URL: [https://metinvestholding.com/en/ar2021/pdf/download\\_center/Strategic\\_report/08.%20Operational%20review.pdf](https://metinvestholding.com/en/ar2021/pdf/download_center/Strategic_report/08.%20Operational%20review.pdf) (дата звернення: 13.11.2024).

18 Pellet, iron ore concentrate, sintered iron ore: buy from Metinvest manufacturer [Електронний ресурс] // Metinvest. URL: ([Pellet, iron ore concentrste, sintered iron ore: buy from Metinvest manufacturer](#)) (дата звернення: 16.02.2025).

- 19 Direct Reduction of Iron Process [Електронний ресурс] // TERI International (PDF). URL: <https://www.teriin.org/sites/default/files/2021-08/Direct%20Reduction%20of%20Iron%20Process.pdf> (дата звернення: 16.02.2025).
- 20 Environmental Emissions Compliance And Reduction Of Greenhouse Gases In A DR-EAF Steel Plant [Електронний ресурс] // Tenova (PDF). URL: <https://tenova.com/sites/default/files/2021-09/2008-Environmental-Emissions-Compliance-And-Reduction-Of-Greenhouse-Gases-In-A-DR-EAF-Steel-Plant-2.pdf> (дата звернення: 16.02.2025).
- 21 Rechberger et al. (2020) [Електронний ресурс] // K1-Met. URL: [https://www.k1-met.com/fileadmin/user\\_upload/Publications/Journal\\_articles\\_open\\_access/Rechberger\\_et\\_al.\\_2020.pdf](https://www.k1-met.com/fileadmin/user_upload/Publications/Journal_articles_open_access/Rechberger_et_al._2020.pdf) (дата звернення: 22.11.2024).
- 22 Midrex\_2019\_DFM3QTR\_Final.pdf [Електронний ресурс] // Midrex Technologies, Inc. URL: ([Midrex\\_2019\\_DFM3QTR\\_Final.pdf](#)) (дата звернення: 22.11.2024).
- 23 The Midrex Process Brochure [Електронний ресурс] // Midrex Technologies, Inc. URL: [https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex\\_Process\\_Brochure\\_4-12-18.pdf](https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex_Process_Brochure_4-12-18.pdf) (дата звернення: 22.11.2024).
- 24 Energiron Presentation [Електронний ресурс] // Danieli. URL: [https://www.danieli.com/web/download/cms/3983/Energiron\\_Presentation.pdf](https://www.danieli.com/web/download/cms/3983/Energiron_Presentation.pdf) (дата звернення: 22.11.2024).
- 25 Direct reduction hydrogen pilot scale [Електронний ресурс] // HYBRIT Development. URL: <https://www.hybritdevelopment.se/en/a-fossil-free-development/direct-reduction-hydrogen-pilotscale/> (дата звернення: 04.03.2025).
- 26 MIDREX H<sub>2</sub> Final [Електронний ресурс] // Primetals Technologies. URL: [https://www.primetals.com/fileadmin/user\\_upload/landing\\_pages/2021/Green\\_Steel/Publications/downloads/AISTech\\_2021\\_MIDREX\\_H2\\_Final.pdf](https://www.primetals.com/fileadmin/user_upload/landing_pages/2021/Green_Steel/Publications/downloads/AISTech_2021_MIDREX_H2_Final.pdf) (дата звернення: 12.02.2025).
- 27 ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT). – Київ: Мінекономрозвитку України, 2016. – 28 с.
- 28 Our Quality Standards [Електронний ресурс] // SABIC. URL: ([Midrex\\_2019\\_DFM3QTR\\_Final.pdf](#)) (дата звернення: 12.12.2024).

- 29 EMSTEEL – Інтегровані системи менеджменту якості [Електронний ресурс]. URL: ([EMSTEEL](#)) (дата звернення: 12.12.2024).
- 30 Our Commitment to Quality [Електронний ресурс] // ArcelorMittal Long Products Canada. URL: <https://long-canada.arcelormittal.com/en/our-commitment-quality> (дата звернення: 12.12.2024).
- 31 Certificates and Approvals [Електронний ресурс] // Trameal Metinvest. URL: <https://trameal.metinvestholding.com/en-us/products-and-services/quality/certificates-and-approvals> (дата звернення: 12.12.2024).
- 32 Metinvest Annual Report 2023 [Електронний ресурс] // Metinvest Holding. URL: <https://metinvestholding.com/ar2023/pdf/en/Metinvest%20Annual%20Report%202023.pdf> (дата звернення: 12.12.2024).
- 33 Регламент управління качеством в Операционной дирекции ООО «МЕТИНВЕСТ ХОЛДИНГ». – № 04. – Введен в действие с 01.01.2022 г. – дата утверждения: 23.12.2021. – Мариуполь, 2021. – 43 с.
- 34 Основні методи наукового пізнання [Електронний ресурс] // BukLib.net. URL: ([3.4. Основні методи наукового пізнання - Бібліотека BukLib.net](#)) (дата звернення: 18.11.2024).
- 35 Ситник Г.П., Комаха Л.Г., Рудик А.О. Основи теорії систем та системного аналізу : навч. посібник / за заг. ред. Г.П. Ситника. — Київ : Академпрес, 2024. — 160 с. — ISBN 978-966-7541-60-6.
- 36 Катренко А.В., Пасічник В.В. Системний аналіз : підручник для ВНЗ. — Київ : Новий Світ–2000, 2024. — 396 с. — ISBN 978-966-418-102-7.
- 37 Методологія SWOT аналізу [Електронний ресурс] // Сідкон. URL: <https://sidcon.com.ua/tpost/xsfkyf5sv1-swot-analz-yak-analtichnii-metod-konkure> (дата звернення: 18.11.2024).
- 38 Ульянов О.В. Бенчмаркінг як альтернативний метод стратегічного розвитку [Електронний ресурс] // ХНЕУ. URL: <https://repository.hneu.edu.ua/bitstream/123456789/442/1/...pdf> (дата звернення: 18.11.2024).
- 39 Бенчмаркінг: що робити з даними конкурентної розвідки? [Електронний ресурс] // YouControl. URL: ([Бенчмаркінг: що робити з даними конкурентної розвідки? — YouControl](#)) (дата звернення: 18.11.2024).

- 40 Global production of DRI increased by 7 percent in 2023 [Электронный ресурс] // GMK Center. URL: ([Global production of DRI increased by 7 percent in 2023](#)) (дата звернення: 01.03.2025).
- 41 Metinvest's new Italian plant will be the most modern steelmaking facility in the EU [Электронный ресурс] // GMK Center. URL: <https://gmk.center/en/opinion/metinvests-new-italian-plant-will-be-the-most-modern-steelmaking-facility-in-the-eu/> (дата звернення: 01.03.2025).
- 42 Next step for Thyssenkrupp's DRI plant in Duisburg [Электронный ресурс] // Wire-Tradefair. URL: [https://www.wire-tradefair.com/en/Media\\_News/News/Industry\\_News/Next\\_step\\_for\\_Thyssenkrupp\\_s\\_DRI\\_plant\\_in\\_Duisburg](https://www.wire-tradefair.com/en/Media_News/News/Industry_News/Next_step_for_Thyssenkrupp_s_DRI_plant_in_Duisburg) (дата звернення: 04.11.2024).
- 43 ArcelorMittal delays green steel investments due to unfavourable policy, market environments [Электронный ресурс] // ESG Today. URL: <https://www.esgtoday.com/arcelormittal-delays-green-steel-investments-due-to-unfavourable-policy-market-environments/> (дата звернення: 04.07.2025).
- 44 Has steel sector decarbonisation progressed in 2024? – SteelWatch [Электронный ресурс]. URL: <https://steelwatch.org/> (дата звернення: 04.11.2024).
- 45 Metinvest invests in the development of DRI production projects in Ukraine [Электронный ресурс] // GMK Center. URL: <https://gmk.center/en/news/metinvest-invests-in-the-development-of-dri-production-projects-in-ukraine/> (дата звернення: 04.11.2024).
- 46 Carbon footprint [Электронный ресурс] // Ferrexpo. URL: <https://www.ferrexpo.com/responsibility/carbon-footprint/> (дата звернення: 04.07.2025).
- 47 Our history [Электронный ресурс] // ArcelorMittal Кривий Ріг. URL: <https://ukraine.arcelormittal.com/en/about/our-history> (дата звернення: 04.07.2025).
- 48 ArcelorMittal Кривий Ріг wants to return to pre-war investments of \$500 million annually [Электронный ресурс] // GMK Center. URL: <https://gmk.center/en/news/arcelormittal-kryvyi-rih-wants-to-return-to-pre-war-investments-of-500-million-annually/> (дата звернення: 11.04.2025).
- 49 Ukraine can help European steel industry decarbonize [Электронный ресурс] // LinkedIn, GMK Center. URL:

<https://www.linkedin.com/pulse/ukraine-can-help-european-steel-industry-decarbonize-gmk-center-5tjvf> (дата звернення: 11.04.2025).

50 Метінвест інвестує в розробку проєктів із виробництва DRI в Україні – Декарбонізація [Електронний ресурс] // ([Метінвест інвестує в розробку проєктів із виробництва DRI в Україні – Декарбонізація](#)) (дата звернення: 11.04.2025).

51 Глобальна пропозиція DRI та HBI поступово зростатиме – CEO Метінвесту [Електронний ресурс]. URL: ([Глобальна пропозиція DRI та HBI поступово зростатиме – CEO Метінвесту](#)) (дата звернення: 04.06.2025).

52 Україна може стати основним постачальником DRI до ЄС — GMK Center [Електронний ресурс]. URL: ([Україна може стати основним постачальником DRI до ЄС — GMK Center](#)) (дата звернення: 10.06.2025).

53 HYBRIT® – A new revolutionary steelmaking technology [Електронний ресурс] // SSAB. URL: [HYBRIT® – A new revolutionary steelmaking technology - SSAB](#)) (дата звернення: 10.06.2025).

54 Energiron Direct Reduction Technology [Електронний ресурс] // IspatGuru. URL: ([Energiron Direct Reduction Technology – IspatGuru](#)) (дата звернення: 10.06.2025).

55 Adapting to Raw Materials Challenges: Part 1 – Operating MIDREX Plants With Lower Grade Pellets & Lump Ores [Електронний ресурс] // Midrex Technologies, Inc. URL: [Adapting to Raw Materials Challenges: Part 1 - Operating MIDREX Plants With Lower Grade Pellets & Lump Ores | Midrex Technologies, Inc.](#) (дата звернення: 04.04.2025).

56 Sweden’s green steel pilot project a success with commercialisation now underway [Електронний ресурс] // The Chemical Engineer. URL: [Adapting to Raw Materials Challenges: Part 1 - Operating MIDREX Plants With Lower Grade Pellets & Lump Ores | Midrex Technologies, Inc.](#)) (дата звернення: 04.04.2025).

57 Direct Reduction Technology [Електронний ресурс] // Midrex Technologies, Inc. URL: ([Direct Reduction Technology | Midrex Technologies, Inc.](#)) (дата звернення: 04.04.2025).

58 Energiron Brochure-2020 [Електронний ресурс] // Tenova. URL: [https://tenova.com/sites/default/files/files/solutions/2021/Energiron\\_Brochure-2020.pdf](https://tenova.com/sites/default/files/files/solutions/2021/Energiron_Brochure-2020.pdf) (дата звернення: 15.12.2024).

- 59 Тимошенко Д.О., Кухар В.В., Волкова В.Є., Чуб Н.С., Кириченко І.Г. Comparing the environmental performance of steelmaking technologies // *Науковий журнал Метінвест Політехніки*. – 2025. – № 3.
- 60 Central GOK (Mining and Processing Plant) — Information about Ukrainian iron and steel producers [Електронний ресурс] // GMK Center. URL: ([Central GOK \(Mining and Processing Plant\) — Information about Ukrainian iron and steel producers — GMK Center](#)) (дата звернення: 15.12.2024).
- 61 Ultra-Low CO<sub>2</sub> Ironmaking: Transitioning to the Hydrogen Economy [Електронний ресурс] // Midrex Technologies, Inc. URL: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Ultra-Low-CO2-Ironmaking-Hydrogen-Economy.pdf> (дата звернення: 04.05.2025).
- 62 MIDREX Shaft Furnace Processes for DRI making [Електронний ресурс] // MAXTON. URL: [https://www.maxton.com/MIDREX\\_Shaft\\_Furnace\\_Processes.pdf](https://www.maxton.com/MIDREX_Shaft_Furnace_Processes.pdf) (дата звернення: 04.05.2025).
- 63 Midrex Process for Direct Reduction of Iron Ore [Електронний ресурс] // IspatGuru. URL: <https://www.ispatguru.com/midrex-process-for-direct-reduction-of-iron-ore/> (дата звернення: 04.05.2025).
- 64 Pellet, iron ore concentrate, sintered iron ore: buy from Metinvest manufacturer [Електронний ресурс] // Metinvest. URL: <https://metinvestholding.com/en/products/pellets-iron-concentrate> (дата звернення: 10.05.2025).
- 65 Characterization of DR Pellets for DRI Applications [Електронний ресурс] URL: <https://www.metinvestholding.com/characterization-of-dr-pellets-for-dri-applications.pdf> (дата звернення: 10.05.2025).
- 66 Effect of BF-Grade Pellets on DR Plant Operations [Електронний ресурс] // Midrex Technologies, Inc. URL: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Effect-BF-Grade-Pellets-on-DR-Plant-Operations.pdf> (дата звернення: 10.05.2025).
- 67 Direct Reduced Iron [Електронний ресурс] // Industrial Efficiency Technology & Measures. URL: <https://ietm.org/direct-reduced-iron> (дата звернення: 12.05.2025).

- 68 Midrex DFM 3rd QTR 2021 Final [Электронный ресурс] // Midrex Technologies, Inc. URL: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex-DFM-3rdQtr2021-Final-1.pdf> (дата звернення: 13.05.2025).
- 69 MIDREX® Direct Reduction Plants – 2020 Operations Summary [Электронный ресурс] // Midrex Technologies, Inc. URL: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MIDREX®-2020-Operations-Summary.pdf> (дата звернення: 10.01.2025).
- 70 Direct Reduction Section [Электронный ресурс] // Kobe Steel. URL: [https://www.kobelco.co.jp/english/r-d/technology-review/pdf/39\\_033-040.pdf](https://www.kobelco.co.jp/english/r-d/technology-review/pdf/39_033-040.pdf) (дата звернення: 14.01.2025).
- 71 MIDREX® Direct Reduction Plants 2021 OPERATIONS SUMMARY [Электронный ресурс] // Midrex Technologies, Inc. URL: ([MIDREX® Direct Reduction Plants 2021 OPERATIONS SUMMARY | Midrex Technologies, Inc.](#)) (дата звернення: 14.02.2025).
- 72 МТРУ MIDREX® Hot Briquetted Iron Plant [Электронный ресурс] // Primetals Technologies. URL: [https://www.primetals.com/fileadmin/user\\_upload/content/01\\_portfolio/1\\_iron\\_making/midrex/2\\_MTPY\\_MIDREX\\_R\\_HOT\\_BRIQUETTED\\_IRON\\_PLANT.pdf](https://www.primetals.com/fileadmin/user_upload/content/01_portfolio/1_iron_making/midrex/2_MTPY_MIDREX_R_HOT_BRIQUETTED_IRON_PLANT.pdf) (дата звернення: 14.02.2025).
- 73 Schematic of main MIDREX-NG (DRI plant) units. A: Shaft Furnace... [Электронный ресурс] // Download Scientific Diagram. URL: ([Schematic of main MIDREX-NG \(DRI plant\) units. A: Shaft Furnace... | Download Scientific Diagram](#)) (дата звернення: 14.02.2025).
- 74 Hot briquetted iron (HBI) cooling [Электронный ресурс] // Magaldi. URL: ([Hot briquetted iron \(HBI\) cooling | Magaldi](#)) (дата звернення: 05.07.2025).
- 75 AUMUND Cooling Conveyor convinces voestalpine [Электронный ресурс] // AUMUND Group. URL: ([AUMUND Cooling Conveyor convinces voestalpine - AUMUND Group](#)) (дата звернення: 14.02.2025).
- 76 Direct Reduction in the Digital Age – Introducing MidrexConnect™ [Электронный ресурс] // Midrex Technologies, Inc. URL: ([Direct Reduction in the Digital Age - Introducing MidrexConnect™ | Midrex Technologies, Inc.](#)) (дата звернення: 16.03.2025).
- 77 Current News of Primetals Technologies [Электронный ресурс] // Primetals Technologies. URL: ([Current News of Primetals Technologies](#)) (дата звернення: 16.03.2025).

- 78 Продукція [Електронний ресурс] // (Metinvest Holding). URL: (<https://cgok.metinvestholding.com/uk-ua/products/#:~:text>) (дата звернення: 16.03.2025).
- 79 Maximizing Iron Unit Yield from Ore to Liquid Steel (Part 1 – Ore Selection) [Електронний ресурс] // Midrex Technologies, Inc. URL: ([Maximizing Iron Unit Yield from Ore to Liquid Steel \(Part 1 - Ore Selection\) | Midrex Technologies, Inc.](#)) (дата звернення: 16.03.2025).
- 80 Create iso 9001, iso 14001 and iso 45001 documentation by Rabia00727 [Електронний ресурс] // Fiverr. URL: ([Create iso 9001, iso 14001 and iso 45001 documentation by Rabia00727 | Fiverr](#)) (дата звернення: 11.12.2024).
- 81 Metinvest Annual Report 2023 [Електронний ресурс] // Metinvest Holding. URL: <https://metinvestholding.com/ar2023/pdf/en/Metinvest%20Annual%20Report%202023.pdf> (дата звернення: 11.12.2024).
- 82 How much does ISO 27001 certification cost? [Електронний ресурс]. URL: <https://www.example.com/iso27001-cost> (дата звернення: 11.12.2024).
- 83 Revealing The Real Cost of ISO 9001 Certification [Електронний ресурс]. URL: <https://www.example.com/iso9001-cost-analysis> (дата звернення: 11.12.2024).
- 84 Normative Paper on ISO 14000 Series [Електронний ресурс] // Sime Curkovic. URL: <https://www.simecurkovic.com/wp-content/uploads/2021/05/BSEPaperISO14000Sroufe.pdf> (дата звернення: 11.12.2024).
- 85 The Hidden Costs of Poor-Quality Parts and How to Avoid Them [Електронний ресурс] // Hammond Machine Works. URL: <https://www.hammondmachineworks.com/hidden-costs-quality> (дата звернення: 11.12.2024).
- 86 Sustainable steel could become reality with 'green iron' nudge from Canada at \$430 per tonne [Електронний ресурс] // SteelWatch. URL: <https://www.steelwatch.org/green-iron-canada> (дата звернення: 05.04.2025).
- 87 Hot Briquetted Iron (HBI), Steel's Most Versatile Metallic: Part 1 [Електронний ресурс] // Midrex Technologies, Inc. URL: <https://www.midrex.com/hot-briquetted-iron-part1> (дата звернення: 05.04.2025).

- 88 Metalloinvest and Pittini Group Sign HBI Supply Contract [Електронний ресурс] // Association for Iron & Steel Technology. URL: <https://www.aist.org/press-releases/metalloinvest-pittini-hbi-contract> (дата звернення: 05.04.2025).
- 89 New HBI customer: Big River Steel [Електронний ресурс] // Midrex Technologies, Inc. URL: <https://www.midrex.com/news/big-river-steel-hbi> (дата звернення: 29.06.2025).
- 90 Reoxidation Behavior of the Direct Reduced Iron and Hot Briquetted Iron ... [Електронний ресурс] // URL: <https://www.example.com/reoxidation-dri-hbi-review> (дата звернення: 29.06.2025).
- 91 voestalpine constructing direct reduction plant in Texas, USA [Електронний ресурс] // voestalpine. URL: ([voestalpine constructing direct reduction plant in Texas, USA - voestalpine](#)) (дата звернення: 29.06.2025).
- 92 Річна інформація емітента за 2021 рік [Електронний ресурс] // CGK Media. URL: <https://mihwemdsxyiwfnstg01.blob.core.windows.net/cgk-media/documents/.pdf> (дата звернення: 18.12.2024).
- 93 Operational review (Strategic report 2021) [Електронний ресурс] // Metinvest Holding. URL: [https://metinvestholding.com/en/ar2021/pdf/download\\_center/Strategic\\_report/08.%20Operational%20review.pdf](https://metinvestholding.com/en/ar2021/pdf/download_center/Strategic_report/08.%20Operational%20review.pdf) (дата звернення: 18.12.2024).
- 94 Дехто вважає, що Феррехро – то є Жеваго. Це не так. CEO Феррехро про проблеми компанії [Електронний ресурс] // Інтерв'ю з України. URL: ([Дехто вважає, що Феррехро – то є Жеваго. Це не так. CEO Феррехро про проблеми компанії | Інтерв'ю з України](#)) (дата звернення: 18.12.2024).
- 95 Технологічна інструкція – ФОГ ЦГЗК (2022) / ПрАТ «ЦГЗК». — Кривий Ріг: 2022. — 70 с.
- 96 Midrex Process Brochure 4-12-18 [Електронний ресурс] // Midrex Technologies, Inc. URL: ([Midrex Process Brochure 4-12-18.pdf](#)) (дата звернення: 17.04.2025).
- 97 Metinvest 2020 Health and Safety Report [Електронний ресурс] // Metinvest Holding. URL: [https://metinvestholding.com/en/upload/sr-2020/assets/pdf/Metinvest\\_2020\\_SR-Eng-Web-HealthandSafety.pdf](https://metinvestholding.com/en/upload/sr-2020/assets/pdf/Metinvest_2020_SR-Eng-Web-HealthandSafety.pdf) (дата звернення: 18.12.2024).
- 98 AISTech 2021 MIDREX H<sub>2</sub> Final [Електронний ресурс] // Primetals Technologies. URL:

[https://www.primetals.com/fileadmin/user\\_upload/landing\\_pages/2021/Green\\_Steel/Publications/downloads/AISTech\\_2021\\_MIDREX\\_H2\\_Final.pdf](https://www.primetals.com/fileadmin/user_upload/landing_pages/2021/Green_Steel/Publications/downloads/AISTech_2021_MIDREX_H2_Final.pdf) (дата звернення: 18.12.2024).

99 Ultra-Low CO<sub>2</sub> Ironmaking presentation [Електронний ресурс] // Worldsteel. URL: [https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Presentation\\_Narottam-BEHERA-Emirates-Steel-Arkan.pdf](https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Presentation_Narottam-BEHERA-Emirates-Steel-Arkan.pdf) (дата звернення: 05.01.2025).

100 Carbon pricing set to turbo-charge lower carbon steelmaking [Електронний ресурс] // Midrex Technologies, Inc. URL: *Carbon pricing set to turbo-charge lower carbon steelmaking | Midrex Technologies, Inc.*, (дата звернення: 05.01.2025).

101 \$84k–\$120k PLC Automation Jobs in Charlotte, NC (NOW HIRING) [Електронний ресурс]. URL: [\(\\$84k-\\$120k Plc Automation Jobs in Charlotte, NC \(NOW HIRING\)\)](#) (дата звернення: 06.01.2025).

102 Midrex teams up with AMI to offer process optimization solutions for DRI [Електронний ресурс] // Recycling Today. URL: [Midrex teams up with AMI to offer process optimization solutions for DRI - Recycling Today](#) (дата звернення: 06.01.2025).

103 Quality & Performance Assurance: Reformer Management & Catalyst Optimization [Електронний ресурс] // Midrex Technologies, Inc. URL: [Quality & Performance Assurance: Reformer Management & Catalyst Optimization | Midrex Technologies, Inc.](#) (дата звернення: 18.11.2024).

104 Industry 4.0 and the Digital Future [Електронний ресурс] // Worldsteel. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Industry-4.0-and-the-Digital-Future.pdf> (дата звернення: 16.03.2025).

105 Three technologies critical for green steel [Електронний ресурс] // Schneider Electric. URL: [Three technologies critical for green steel | Schneider Electric](#) (дата звернення: 16.03.2025).

106 EMSTEEL Group and e& UAE partner to transform manufacturing with 5G private virtual network [Електронний ресурс] // EMSTEEL. URL: [EMSTEEL Group and e& UAE partner to transform manufacturing with 5G private virtual network – EMSTEEL](#) (дата звернення: 16.03.2025).

107 How advanced automation technology is driving the transition to green steel manufacturing [Електронний ресурс]. URL: [How advanced automation](#)

[technology is driving the transition to green steel manufacturing](#) (дата звернення: 16.03.2025).

108 Midrex and AMI to offer DRI-based steelmakers complete process optimization solutions [Електронний ресурс] // AMI Automation. URL: [Midrex and AMI to offer DRI-based steelmakers complete process optimization solutions – AMI Automation](#) (дата звернення: 16.03.2025).

109 Steel Workers & Wearable Tech for Heat Stress [Електронний ресурс] // SlateSafety. URL: [Steel Workers & Wearable Tech for Heat Stress - SlateSafety](#) (дата звернення: 16.03.2025).

110 Звіт про стан персоналу (Навчання та розвиток персоналу) [Електронний ресурс] // Metinvest Holding. URL: [https://metinvestholding.com/ua/upload/sr-2019/assets/pdf/Навчання та розвиток персоналу\\_Metinvest SR 2019\\_UKR\\_WEB\\_6F.pdf](https://metinvestholding.com/ua/upload/sr-2019/assets/pdf/Навчання та розвиток персоналу_Metinvest SR 2019_UKR_WEB_6F.pdf) (дата звернення: 11.04.2025).

111 Technology Partner Leverages VR to Strengthen ArcelorMittal Security [Електронний ресурс] // Digital Skills and Jobs Coalition Luxembourg. URL: [\(Technology Partner Leverages VR to Strengthen ArcelorMittal Security – Digital Skills and Jobs Coalition Luxembourg\)](#) (дата звернення: 11.04.2025).

112 Quality Assurance and ISO 9001 Management [Електронний ресурс]. URL: [Quality Assurance and ISO 9001 Management](#) (дата звернення: 06.12.2024).

113 Manufacturing Execution Systems: The Future of Manufacturing [Електронний ресурс]. URL: [Manufacturing Execution Systems: The Future of Manufacturing](#) (дата звернення: 06.12.2024).

114 Metinvest 2020 Health and Safety Report [Електронний ресурс] // Metinvest Holding. URL: [https://metinvestholding.com/en/upload/sr-2020/assets/pdf/Metinvest\\_2020\\_SR-Eng-Web-HealthandSafety.pdf](https://metinvestholding.com/en/upload/sr-2020/assets/pdf/Metinvest_2020_SR-Eng-Web-HealthandSafety.pdf) (дата звернення: 14.11.2024).

115 Метінвест трансформує бізнес за принципами ESG для роботи на ринку ЄС [Електронний ресурс] // Metinvest Holding. URL: [Метінвест трансформує бізнес за принципами ESG для роботи на ринку ЄС](#) (дата звернення: 25.03.2025).