

Д.В. Рябий¹, канд. техн. наук, наук. співр. відділу магнітної гідродинаміки,

e-mail: Ryaboiy@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8728-3175>

К.М. Шарандін², канд. техн. наук, генеральний директор, e-mail: sharandin@gir.ua

К.Є. Пісмарьов¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр. відділу магнітної гідродинаміки,

e-mail: kostyantynpismarov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-1698-0199>

¹Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

²ТОВ «ГІР-ІНЖІНІРІНГ» (Дніпро, Україна)

Технологічна трансформація металургійного комплексу України: перехід до гнучких систем напівбезперервного циклу та безкоксової металургії

Статтю присвячено комплексному аналізу трансформації металургійної галузі України в умовах вимушеної зміни виробничої парадигми. У статті обґрунтовано необхідність структурної та технологічної трансформації металургійного комплексу України в умовах воєнних втрат виробничих потужностей, розриву сировинних ланцюгів та енергетичних обмежень. Проаналізовано макроекономічну роль металургії до 2022 року та масштаби деградації галузі внаслідок руйнування ключових активів доменного циклу і коксохімічної бази. Доведено, що відновлення традиційної коксово-доменної моделі є технічно та економічно недоцільним, а стратегічною альтернативою має стати перехід до безкоксової металургії на основі технологій прямого відновлення заліза (DRI) — Midrex та Corex — у поєднанні з електродуговими печами (EAF).

Запропоновано модель децентралізованої мережі міні- та міді-заводів, орієнтованих на гнучке виробництво сталі для потреб воєнного-промислового комплексу (ВПК) та післявоєнної відбудови. Особливу увагу приділено застосуванню напівбезперервного розливання сталі як технології, що забезпечує адаптивність до «рваного» режиму енергопостачання, високу якість металу та зниження виробничих втрат. Обґрунтовано, що запропонована трансформація здатна підвищити технологічну стійкість галузі, зменшити імпортозалежність та інтегрувати українську металургію в глобальні ланцюги створення доданої вартості.

Додатково акцентовано увагу на необхідності формування нової інвестиційної моделі розвитку, що передбачає залучення міжнародного фінансування, механізмів державно-приватного партнерства та інструментів «зеленого» переходу в межах європейської кліматичної політики. Визначено ключові ризики впровадження нової архітектури галузі та окреслено інституційні передумови її поетапної реалізації в умовах воєнного та повоєнного періодів.

Ключові слова: металургія України, DRI, Midrex, Corex, електродугові печі, міні-заводи, напівбезперервне розливання сталі, ВПК, відбудова.

Вступ. Сучасний стан української металургії вимагає не просто відновлення, а радикальної технологічної реінновації. Втрачена значної частини активів традиційного доменного циклу створила дефіцит сталевих прокатів, що є критичним для національної безпеки.

Метою статті є розробка концепції створення

нової мережі металургійних підприємств, що базуються на принципах гнучкості, децентралізації та високої технологічності.

1. Макроекономічний контекст та ретроспектива. До 2022 року металургія була базовою галуззю економіки України. Частка у ВВП: галузь забезпечувала близько 12—15 % внутрішнього валового про-

дукту.

Валютні надходження від металургійного експорту приносили державі від \$10 до \$14 млрд щорічно, що складало майже 30 % усієї валютної виручки країни.

Зайнятість: безпосередньо в секторі та суміжних галузях було задіяно понад 500 000 працівників. Проте модель розвитку, заснована на радянській спадщині — величезних комбінатах повного циклу — продемонструвала критичну вразливість.

1.1. Аналіз втрачених активів та проблем галузі

На початок 2022 року галузь втратила близько 40—45 % свого потенціалу через вибуття ключових заводів:

МК «Азовсталь» (4,34 млн т сталі/рік): Унікальний виробник товстолистого прокату (до 200 мм) для суднобудування та бронетехніки, а також рейкової продукції.

ММК ім. Ілліча (4,26 млн т сталі/рік): Основний постачальник оцинкованого та холоднокатаного листа.

«Електросталь» Курахове (0,52 млн т сталі/рік): Демонструвало модель ефективного електросталеплавильного заводу, інтегрованого у прифронтову логістику. Завод мав можливість виплавляти не лише рядову вуглецеву сталь, а й низьколеговані та конструкційні марки.

Сучасна українська металургія опинилася в ситуації «технологічного тупика» через руйнування ланцюга «вугілля — кокс — чавун». Розірвання цих зв'язків зумовлене не лише фізичним знищенням заводів, а й втратою доступу до сировинної бази. Одним із ключових вузлів в цьому ланцюгу був Авдіївський коксохімічний завод (АКХЗ).

АКХЗ був не просто підприємством, а стратегічним вузлом, що забезпечував життєдіяльність найбільших металургійних комбінатів країни. До 2022 року він був найбільшим коксохімічним підприємством у Європі.

Характеристики та потужності АКХЗ до руйнування:

Виробнича потужність: понад 6,7 млн тонн валового коксу на рік.

Асортимент: понад 30 видів продукції, включаючи кокс доменний, пек, бензол та сульфат амонію.

Частка ринку: завод забезпечував близько 40 % потреб української металургії в коксі.

Енергетична роль: завод був основним постачальником теплової енергії та газу для суміжних виробництв.

З припиненням роботи АКХЗ українська металургія втратила можливість забезпечувати паливом доменні печі в необхідному обсязі.

1.2. Криза вугільної бази та дефіцит шихти

Паралельно з руйнуванням переробних потужностей відбулося критичне скорочення видобутку. Більшість шахт, що видобували дефіцитне вугілля марки «К» (коксівне), опинилися в зоні активних бойових дій або на тимчасово окупованих територіях. Це призвело до:

— припинення роботи шахтоуправлінь, що формували стабільну шихту для коксування;

— неможливості створення сумішей вугілля з необхідними показниками плинності та сірки.

Сумарна втрата понад 9 млн тонн виплавки сталі та розрив логістичних ланцюгів ГЗК—завод—коксхім зробили відновлення старої моделі не просто дорогим, а технічно неможливим.

Зазначена цифра втрати виробництва це не просто статистичний показник, а втрата цілих сегментів ринку (товстолистий прокат, спецсталі), що змушує державу переходити до імпортозалежності в умовах, коли власний метал є запорукою суверенітету.

Подальша орієнтація на доменне виробництво означала б повну залежність від імпорту коксівного вугілля, що в умовах заблокованих портів та критичного стану залізничної інфраструктури є економічно нежиттєздатною стратегією, що веде до повної деградації галузевого потенціалу.

2. Шлях до порятунку: Безкоксова металургія

Саме колапс коксохімічної галузі диктує необхідність негайного переходу до безкоксової металургії. Україна має критичну перевагу, яка може замінити вугілля, — це величезні запаси залізної руди та розвинена мережа гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК). Замість того, щоб намагатися відновити гігантські коксові батареї, стратегія має базуватися на прямому відновленні заліза газом або воднем.

2.1. Технології

Глобальна технологічна трансформація: Шлях до DRI/HBI

Україна має унікальну перевагу — потужну залізорудну базу (ГЗК Кривбасу), яка може виробляти окатиші високої якості ($\text{Fe} > 67\%$).

Майбутнє України — у відмові від коксу та переході на залізо прямого відновлення (Direct Reduced Iron — DRI). Україна має найбільші в Європі запаси залізної руди, що робить цей перехід природним. Замість енергоємного доменного процесу пропонується використання металізованої залізорудної сировини для отримання заліза без використання коксу.

2.2. Процеси Midrex та Corex

Для трансформації галузі пропонується впровадження двох основних технологій:

1. Midrex (Пряме відновлення в шахтній печі): Найпоширеніша у світі технологія. Це найбільш енергоефективна технологія, де відновлення заліза відбувається в шахтній печі за допомогою газу. Залізорудні окатиші відновлюються газом (природним або в перспективі воднем) без плавлення. На виході отримуємо металізовані окатиші з вмістом заліза до 92—94 % (рис. 1).

Опис схеми: Окатиші завантажуються зверху шахтної печі. Назустріч їм подається гарячий відновлювальний газ (суміш H_2 та CO). В результаті хімічної реакції при температурі 800—900 °C кисень видаляється з руди, утворюючи металізовані окатиші (DRI) з вмістом заліза 90%+. Процес відбувається при температурі нижче точки плавлення, що мінімізує енерговитрати.

2. Corex (Плавильно-відновлювальна технологія): Альтернатива, що дозволяє використовувати неспечене вугілля замість дефіцитного коксу. Це дворівнева система: у верхній частині руда відновлюється, у

СХЕМА ПРОЦЕСУ ПРЯМОГО ВІДНОВЛЕННЯ MIDREX

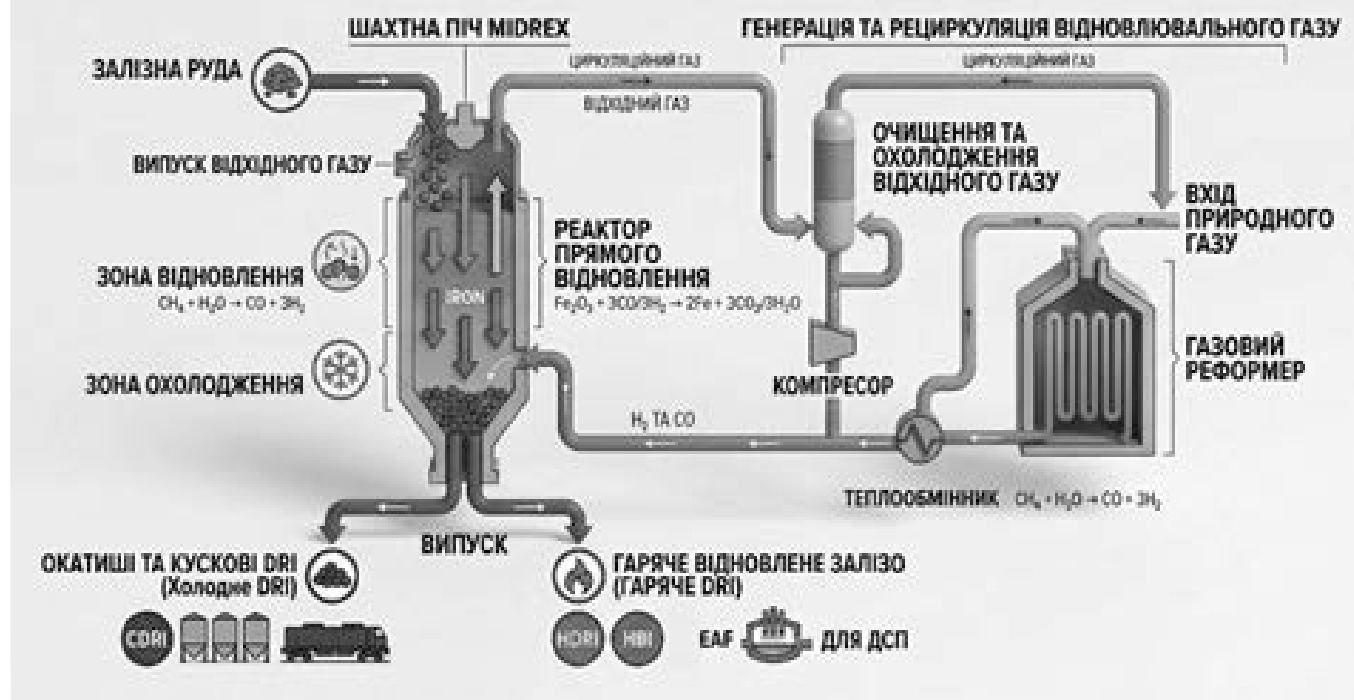


Рис. 1. Принципова схема Midrex-процесу

нижній — плавиться до стану рідкого чавуну (рис. 2).

Опис схеми: Агрегат складається з двох частин: шахтної печі (де руда відновлюється) та плавильного газифікатора (де вугілля спалюється з киснем, виділяючи енергію для плавлення металу та утворюючи газ для верхньої шахти). Це екологічно чистіша альтернатива доменному виробництву.

2.3. Адаптація під електродугові печі (ЕАФ)

Отримане DRI-залізо є ідеальним для плавлення в електродугових печах, що складають основу міні-заводів.

Використання DRI/HBI у шихті електродугових печей замість металобрухту дозволяє:

Виробляти сталь «чисту» за домішками кольорових металів (Cu, Sn, Pb), що критично для авіації та ракетної техніки.

Сучасні системи Midrex-процесу дозволяють не охолоджувати отримані в реакторі Midrex металізовані DRI і завантажувати їх в електропіч з температурою близько 700 °С. При ступеню металізації 95 %, це дозволяє знизити витрату електроенергії при виплавці електросталі.

3. Моделі нових підприємств: Міні- та міді-заводи

Міні- та міді-заводи (МЗ) — це нова архітектура промисловості. Нова металургія України має бути децентралізованою та адаптованою до регіональних потреб. Ефективність малих металургійних комплексів обумовлена можливістю виробництва невеликих одиничних партій продукції, наявністю місцевих споживачів, специфікою місцевих умов, ситуацією на ринку праці. Термін окупності таких

заводів становить 2—3 роки, та цей термін можна скоротити, використовуючи існуючі будівлі, установки та іншу інфраструктуру. Мала потужність МЗ може бути максимально наближена до покупців металопродукції, що зменшить шлях від виробника до споживача, минаючи посередників.

Переваги МЗ перед вертикально-інтегрованими компаніями особливо очевидні сьогодні, коли більшість таких компаній зазнають збитків через недовикористання потужностей.

Сучасний зміст концепції «mini-plant» (міні-виробництво) включає: відносно низькі витрати на виробництво, мінімальні викиди технологічних відходів у навколишнє середовище, мінімальний час простою обладнання та агрегатів, мінімальний час виробничого циклу з максимальною продуктивністю, продажами та прибутковістю.

Створення МЗ дозволяє розвивати інфраструктуру цього регіону шляхом створення додаткових робочих місць у будівельній галузі, енергетиці, водопостачанні тощо, а також надання фінансових надходжень до місцевого бюджету.

МЗ можуть бути задіяні у вирішенні локальних завдань для потреб машинобудівних і металургійних підприємств, що працюють в регіоні, при ліквідації або реконструкції великих металоємних об'єктів, для переробки брухту безпосередньо у районі його накопичення.

3.1. Структурні відмінності

Міні-заводи (200—800 тис. т/рік): Компактні об'єкти, що спеціалізуються на сортовому прокаті,



Рис. 2. Принципова схема Corex-процесу

виробництві арматури та дроту. Їхня перевага — у низьких капітальних витратах та можливості швидко-го будівництва (12—18 місяців).

Міді-заводи (1—2 млн т/рік): більш складні комплекси, що включають ливарно-прокатні модулі. Вони здатні виробляти спеціальні профілі, трубу заготов-

ку та гарячекатаний лист, який зараз є дефіцитним.

Мікрозавод (рис. 3) включає плавильний агрегат, позапічну обробку сталі, машину безперервного або напівбезперервного лиття заготовки та може мати у своєму складі невеличкі прокатні стани.

3.2. Напівбезперервне розливання та «рваний



Рис. 3. Принципова схема Міні-заводу

режим»

В умовах воєнних ризиків та енергетичного дефіциту критично важливою є здатність заводу працювати нестабільно. Для роботи в «рваному режимі» (умови енергодефіциту) ідеальним рішенням є встановлення напівбезперервних або компактних машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ).

Технологія напівбезперервного лиття якісної сталі передбачає її розливання на агрегатах вертикального типу (рис. 4).

Технологія напівбезперервного розливання

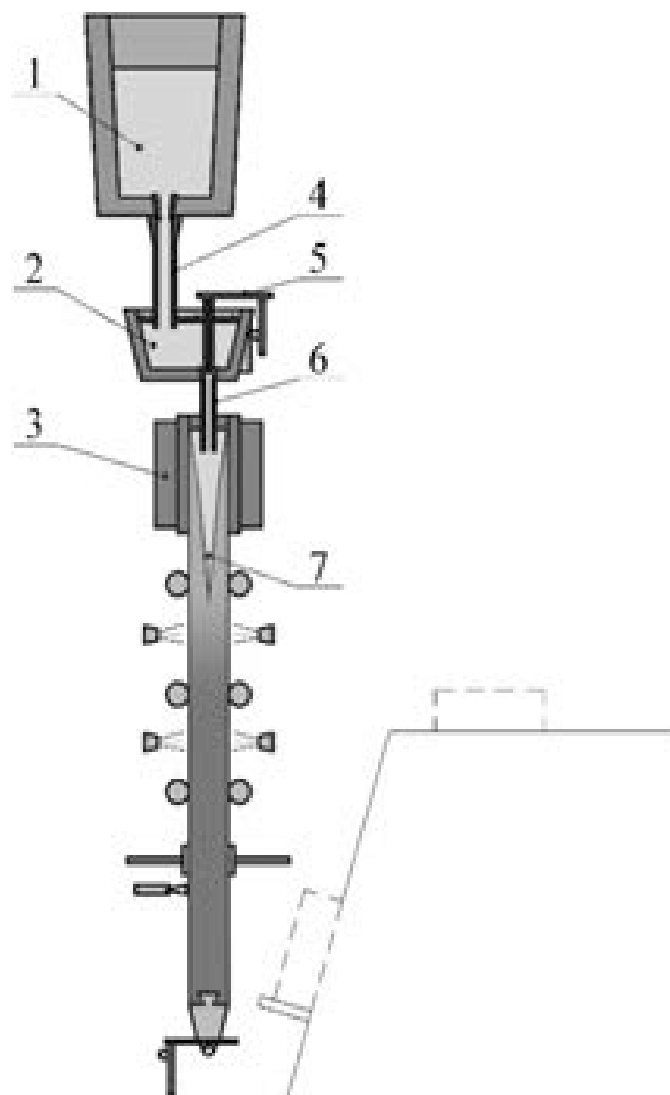


Рис. 4. Схема вертикальної МБЛЗ: 1 — сталерозливальний ківш; 2 — проміжний ківш; 3 — кристалізатор; 4 — захисна труба; 5 — стопорний механізм; 6 — занурювальний стакан; 7 — заготовка

забезпечує:

— гнучкість та маневреність: можливість швидко-го запуску та зупинки лінії без ризику технологічних аварій;

— адаптивність до енергосистеми: можливість роботи в «рваному режимі» для синхронізації виробництва з годинами найнижчого навантаження на енергосистему (запуск та зупинка залежно від лімітів електроенергії);

— якість: завдяки вертикальному або криволінійному типу забезпечується висока щільність металу, що важливо для броні;

— сортамент: можливість лити як квадратну заготовку, так і сляби невеликої товщини на одному агрегаті, що дозволяє оперативне переналаштування під потреби замовника (від арматури для будівництва до спецсталей для броні).

4. Розвиток малої та середньої металургії в Україні має два фундаментальні вектори:

1. Оборонно-промисловий комплекс (ВПК)

Потреба в якісному металі для виробництва артилерії, бронемашин та засобів захисту вимагає сталей високої чистоти. Електродугові печі міні-заводів забезпечують точне легування та мінімальний вміст шкідливих домішок (сірки та фосфору), що є недосяжним для багатьох застарілих мартенівських або конвертерних цехів.

Без власного металу ВПК залишається лише «складальним цехом». Нова металургія забезпечить:

— артилерію та танки: виплавка високолегованих сталей для стволів (09Г2С та аналоги з особливими гартуваннями);

— броню: виробництво броньованого листа підвищеної твердості на базі електросталі з DRI;

— боеприпаси: сталь для корпусів снарядів з контрольованими параметрами фрагментації.

2. Глобальна відбудова

Масштабне відновлення зруйнованих міст потребує мільйонів тонн сортового прокату. Децентралізована мережа міні-заводів (по 300—500 тис. т/рік) у різних регіонах України забезпечить будівельні майданчики ресурсом у режимі “just-in-time”, та:

— швидке постачання арматури та балок безпосередньо на будівельні майданчики;

— логістичну незалежність від зруйнованих транспортних вузлів Сходу;

— створення нових робочих місць у регіонах, що приймають внутрішньо переміщених осіб.

Потреба у металі для цивільного сектора є колосальною:

— житловий фонд: відновлення понад 160 тис. зруйнованих об'єктів потребує мільйонів тонн арматури;

— транспорт: рейки для Укрзалізниці, балки для мостів та металоконструкції для нових заводів;

— логістика: створення децентралізованих міді-заводів у центрі та на заході країни знизить вартість логістики на 20—30 % порівняно з поставками з прифронтових зон.

Висновки

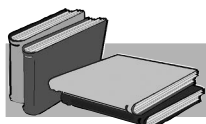
Глобальна трансформація металургії України через впровадження безкокскових технологій (DRI/ Corex) та мережі гнучких міні-заводів — це єдиний шлях до відновлення частки ВВП та валютної виручки. Така модель робить галузь стійкою до військових загроз, енергетичних криз та екологічних вимог

ЄС, перетворюючи Україну на європейський хаб «зеленої» та оборонної металургії, що дозволяє Україні інтегруватися в глобальні ланцюги доданої вартості. Використання напівбезперервного розливання мінімізує відходи виробництва, що підвищує конкурентоспроможність української продукції на світовому ринку.

Глобальна трансформація металургії України через впровадження міні- та міді-заводів на основі

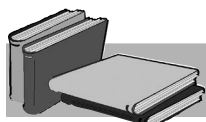
DRI-технології та напівбезперервного розливання є єдиним шляхом до виживання галузі і дозволить:

- перетворити Україну з експортера руди на виробника сталі з високою доданою вартістю;
- гарантувати стабільне постачання спецсталей для потреб ВПК у будь-яких умовах;
- забезпечити незалежність процесу відбудови від зовнішніх поставок базових матеріалів.



ЛІТЕРАТУРА

1. 2022 World Direct Reduction Statistics. Midrex Technologies, Inc., 2023. 16 p. URL: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2022.pdf> (дата звернення: 20.02.2026).
2. Смірнов О.М., Тимошенко С.М., Нарівський А.В. Відновлення та інноваційний розвиток виробництва сталі в Україні в контексті енергоефективності та європейського зеленого курсу. *Вісник НАН України*. 2023. № 4. С. 21—38. <https://doi.org/10.15407/visn2023.04.021>
3. Annual Report 2023. Metinvest Holding, 2024. 154 p. URL: <https://metinvestholding.com/ar2023/pdf/en/Metinvest%20Annual%20Report%202023.pdf> (дата звернення: 20.02.2026).
4. Промисловість України: короткострокова статистика. Державна служба статистики України. 2022. URL: <https://stat.gov.ua/uk/topics/promyslovist> (дата звернення: 20.02.2026).
5. What is happening on the Ukrainian machine-building steel market? GMK Center. 2025. URL: <https://gmk.center/en/opinion/what-is-happening-on-the-ukrainian-machine-building-steel-market/> (дата звернення: 20.02.2026).



REFERENCES

1. Midrex Technologies, Inc. (2023). *2022 World Direct Reduction Statistics*. <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2022.pdf>
2. Smirnov, O. M., Timoshenko, S. M., & Narivskiy, A. V. (2023). Renovation and innovative development of steel production in Ukraine in the context of energy efficiency and Green Deal. *Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (4), 21-38. <https://doi.org/10.15407/visn2023.04.021> [in Ukrainian].
3. Metinvest Holding (2024). *Annual Report 2023*. <https://metinvestholding.com/ar2023/pdf/en/Metinvest%20Annual%20Report%202023.pdf>
4. State Statistics Service of Ukraine (2022). *Promyslovist Ukrainy: korotkostrokovaya statystyka* [Industry of Ukraine: Short-term statistics]. <https://stat.gov.ua/en/topics/industry> [in Ukrainian].
5. GMK Center (2025). *What is happening on the Ukrainian machine-building steel market?* <https://gmk.center/en/opinion/what-is-happening-on-the-ukrainian-machine-building-steel-market/>

Надійшла/Received 23.02.2026

Прийнята/Accepted 13.03.2026

Опублікована/Published 31.03.2026

Summary

D.V. Riabiy¹, PhD (Engin.), Researcher of the Department of Magnetohydrodynamics,
e-mail: Ryaboiy@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8728-3175>
K.M. Sharandin² PhD (Engin.), General Director, e-mail: sharandin@gir.ua
K.Ye. Pismarov¹, PhD (Engin.), Senior Research Scientist of the Department of Magnetohydrodynamics,
e-mail: kostyantynpismarov@gmail.com,
<https://orcid.org/0009-0006-1698-0199>

¹*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)*

²*“GIR-ENGINEERING”, LLC (Dnipro, Ukraine)*

Technological Transformation of Ukraine’s Metallurgical Complex: Transition to Flexible Semi-Continuous Systems and Coke-Free Metallurgy

The article is devoted to a comprehensive analysis of the transformation of Ukraine’s metallurgical industry under conditions of a forced shift in the production paradigm. The paper substantiates the necessity of structural and technological transformation of Ukraine’s metallurgical complex in the context of wartime losses of production capacities, disruption of raw material supply chains, and energy constraints. It analyzes the macroeconomic role of metallurgy prior to 2022 and the scale of the industry’s degradation resulting from the destruction of key assets of the blast furnace cycle and the coke-chemical base. It is proven that the restoration of the traditional coke-blast furnace model is technically and economically impractical, and that the strategic alternative should be a transition to coke-free metallurgy based on direct reduced iron (DRI) technologies – Midrex and Corex – in combination with electric arc furnaces (EAF).

A model of a decentralized network of mini- and midi-mills focused on flexible steel production to meet the needs of the defense industry and post-war reconstruction is proposed. Particular attention is paid to the application of semi-continuous steel casting as a technology that ensures adaptability to an intermittent energy supply regime, high metal quality, and reduced production losses. It is substantiated that the proposed transformation can enhance the technological resilience of the industry, reduce import dependence, and integrate Ukrainian metallurgy into global value chains.

Additional emphasis is placed on the need to form a new investment development model that involves attracting international financing, implementing public-private partnership mechanisms, and applying green transition instruments within the framework of European climate policy. The key risks of implementing the new industry architecture are identified, and the institutional prerequisites for its phased implementation during wartime and post-war periods are outlined.

Keywords

Ukrainian metallurgy, DRI, Midrex, Corex, electric arc furnaces, mini-mills, semi-continuous steel casting, defense industry, reconstruction.