

## СМІРНОВ

**Олексій Миколайович** – доктор технічних наук, професор, завідувач відділу магнітної гідродинаміки Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України

## ТІМОШЕНКО

**Сергій Миколайович** – доктор технічних наук, професор кафедри загальноосвітніх дисциплін Технічного університету «Метінвест політехніка»

## НАРІВСЬКИЙ

**Анатолій Васильович** – член-кореспондент НАН України, директор Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України

# ВІДНОВЛЕННЯ ТА ІННОВАЦІЙНИЙ РОЗВИТОК ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ В УКРАЇНІ В КОНТЕКСТІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЄВРОПЕЙСЬКОГО ЗЕЛЕНОГО КУРСУ

*У статті наголошено, що в процесі повоєнного відновлення економіки та в контексті вимог Європейського зеленого курсу щодо досягнення вуглецевої нейтральності металургія України має унікальну можливість не лише подолати технічне відставання за енергоефективністю та екологічною безпекою, а й позбутися неефективної технологічної структури з фізично зношеними і морально застарілими основними фондами. Рішення полягає у переході до малих металургійних заводів і стратегії мінімізації економічних та екологічних витрат.*

**Ключові слова:** малі металургійні заводи, дугові сталеплавильні печі, енергоефективність, вуглецева нейтральність, металізована сировина.

## Енергетичні витрати та екологічні збитки виробництва сталі.

Світова сталеливарна промисловість споживає 8 % виробленої енергії та викидає в навколишнє середовище 7 % загальної емісії вуглекислого газу (2,6 Гт у 2020 р.). Утворення CO<sub>2</sub> пов'язане переважно з використанням вугілля, яке на 75 % забезпечує галузь енергією. Завдяки новим енергоефективним технологіям, спрямованим на утилізацію теплоти в процесах виробництва сталі, питома енергія, необхідна для виробництва тонни сталі, за останні пів століття скоротилася майже вдвічі. Серед промислово розвинених країн світу Україна має найвищий показник енергомісткості сталі – 30,2 ГДж/т, тоді як, наприклад, у Японії він становить 22,9 ГДж/т, тобто є на 30 % меншим [1–4].

Концепція протидії змінам клімату, сформульована у 2019 р. як ініціатива ЄС Green Deal (Зелений курс), передбачає до 2050 р. обмеження викидів CO<sub>2</sub> у металургії до 0,25 т на тону сталі проти нинішнього рівня 0,75 т [5]. Задля дотримання принципів руху в напрямі вуглецевої нейтральності з 2026 р. запроваджується «вуглецевий податок» на продукцію, що імпортується країнами ЄС, включно з вихідними матеріалами та

Таблиця 1. Енергетичні та екологічні показники сталеплавильних технологій

| Технологічний маршрут                               | Витрати енергії, кВтгод/т сталі | Емісія CO <sub>2</sub> , т/т сталі |
|---|---------------------------------|------------------------------------|
| Доменна піч – мартен (рідкий чавун/скрап 65/35)     | 7000–7400                       | 2,2–2,5                            |
| Доменна піч – конвертер (рідкий чавун/скрап 80/20)  | 5900–6200                       | 1,6–2,0                            |
| Доменна піч – дугова піч (рідкий чавун/скрап 40/60) | 2800–3100                       | 1,1–1,3                            |
| Металізована сировина – дугова піч                  | 3400–4000                       | 0,8–1,0                            |
| Скрап – дугова піч                                  | 590–730*                        | 0,25–0,45*                         |
| Скрап – індукційна піч                              | 600–750*                        | 0,10–0,30*                         |

\* без урахування витрат при отриманні скрапу (у минулому)

енергоносіями, у розмірі близько €50 з подальшим зростанням до 2030 р. до €80–90 за тунну емісії CO<sub>2</sub><sup>1</sup>. Втрати українських металургійних компаній після запровадження «вуглецевого податку» можуть становити €700 млн на рік, що відповідає близько 0,5 % ВВП<sup>2</sup>. Уряд України задекларував зобов'язання щодо поетапного зниження емісії CO<sub>2</sub> [6].

Енергетичні та екологічні параметри наявних технологічних маршрутів виплавки сталі [1, 7–14], які наведено в табл. 1, з огляду на брак деяких даних, особливо щодо індукційних печей, характеризуються значним розкидом через методичні розбіжності при врахуванні витрат енергії стосовно вихідної сировини, втрат енергії в технологічному процесі та «вуглецевого сліду» (питома емісія CO<sub>2</sub>), в тому числі при виробництві електроенергії.

У контексті Green Deal пріоритетного розвитку в перспективі набудуть електрометалургійні процеси виробництва сталі як менш енергомісткі та екологічно безпечніші (табл. 1). Ці технології поступово витіснятимуть технологічний маршрут доменна піч – конвертер, який домінує на сьогодні, наближаючись при цьому до умовної вуглецевої нейтральності завдяки очікуваному прогресу та здешевленню «зеленого» водню як відновника в перспективних процесах виробництва металізованої сировини, а також електроенергії з відновлюваних джерел (енергія води, вітру, сонця).

Стан і перспективи виробництва сталі в Україні. Раніше Україна стабільно входила до десятки світових виробників та експортерів сталі, але в останні роки здала позиції (12-те місце у 2020 р., 14-те місце у 2021 р.). Обсяг виробництва сталі у 2021 р. становив 21,4 млн т, а у 2022 р. через воєнну агресію та втрату підприємств на сході країни виробництво сталі скоротилося до 6,3 млн т, а тому Україна змістилася на 25-ту позицію [15].

Домінуючу роль у чорній металургії України (близько 95 % виплавки сталі) відіграють вертикально інтегровані заводи (комбінати) з традиційним повним циклом виробництва [16]. Технологічний процес включає підготовку сировини, доменний, сталеплавильний (конвертер, мартен) та прокатний переділи. Товарною продукцією є безперервнолита заготовка з вуглецевих та низьколегованих сталей масового сортаменту, листовий та сортовий прокат. Основні фонди цих підприємств зношені в середньому на 65–70 %. Орієнтація на стратегію мінімізації витрат для поліпшення експортних можливостей у поєднанні зі структурними проблемами виробництва негативно впливає на конкурентоспроможність галузі в цілому.

Сталеплавильний комплекс України загалом не відповідає концепції «зеленої металургії» через застарілу технологічну структуру [16] з малим відносним обсягом (до 5 %) електросталеплавильного виробництва (рис. 1) [16], що зумовлює досить високий «вуглеце-

<sup>1</sup> Дмитро Кисилевський про мито на експорт брухту і перспективи металургії на фоні декарбонізації. *БізнесЦензор*. 16.04.2021. <https://bit.ly/40jfQbr>

<sup>2</sup> Как углеродный налог повлияет на украинский экспорт. *БізнесЦензор*. 30.12.2020. <https://bit.ly/3FBeb9o>

вий слід» порівняно як з розвиненими країнами, так і зі середньосвітовим рівнем (рис. 2).

Водночас в Україні можна знайти й позитивні приклади розвитку підприємств у контексті Green Deal, зокрема заводи Інтерпайп-Сталь (Дніпро), Електросталь (Курахове) та Обважнених бурильних та ведучих труб (Суми), металургійні виробництва машинобудівних підприємств Енергомашспецсталь та НКМЗ (Краматорськ). Ці структури реалізують технологічний маршрут скрап — дугова піч і за світовою класифікацією належать до категорії малих металургійних заводів (ММЗ).

У післявоєнний період освоєння нових технологічних процесів, які відповідають сучасним вимогам енергоефективності та екологічної безпеки, забезпечить найкращі можливості для відновлення сталеплавильної галузі України й подолання її технічного відставання. Рішення полягає у пріоритетному розвитку електросталеплавильного виробництва в умовах ММЗ. Такі технології за мінімальних матеріальних, енергетичних та екологічних витрат можна застосовувати як у «великій» металургії, що виробляє товарну продукцію, так і у «малій» металургії при машинобудівному комплексі. Розвиток концепції малих металургійних заводів сприятиме відбудові регіональної інфраструктури, створенню нових робочих місць, надходженню коштів до місцевих бюджетів.

**Малі металургійні заводи — світовий тренд сталеплавильної індустрії.** У світі близько третини всієї сталі виробляють на ММЗ. Продуктивність цих заводів варіюється в широких межах — від 0,05 до 2 млн т на рік, що потребує суттєвої диверсифікації технічних і технологічних рішень. У технологічному маршруті «великої» металургії напівпродукт виплавляють у дуговій сталеплавильній печі (ДСП) за інтенсивною технологією з доведенням до заданої марки сталі в пристроях ківш-піч і, за необхідності, здійснюють вакуумну обробку (VD/VOD, RH). У «малій» металургії готову сталь отримують як безпосередньо в дуговій печі за класичною технологією, так і методами позапічного доведення.

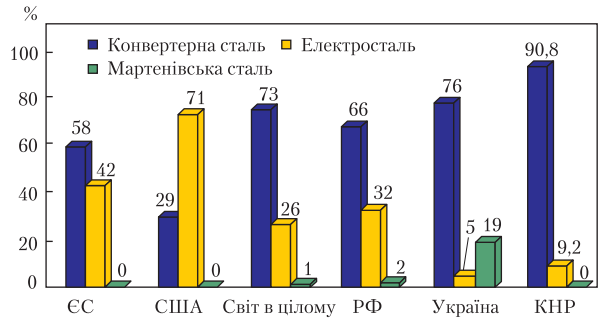


Рис. 1. Технологічна структура виробництва сталі в Україні й у світі

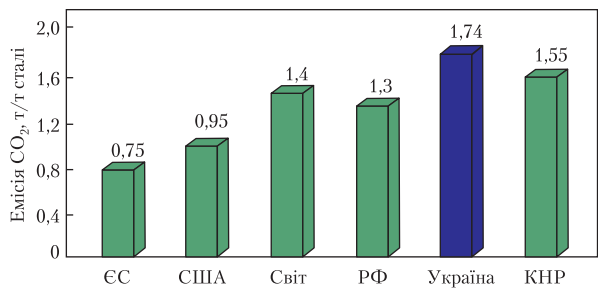


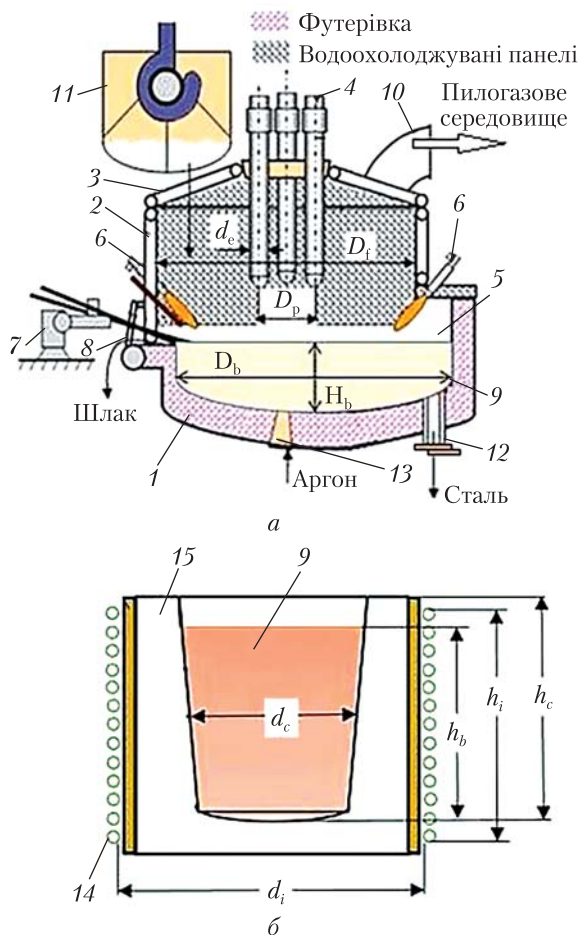
Рис. 2. Вуглецевий слід сталеплавильного виробництва в Україні та світі

Вихідними шихтовими матеріалами ММЗ є скрап та металізована сировина, а також рідкий чавун (до 40 % загальної маси шихти). Варіант з рідким чавуном у контексті Green Deal слід розглядати як тимчасове рішення.

Продукція ММЗ включає тонкий гарячекатаний лист ливарно-прокатних модулів, сортової заготовки МБЛЗ або затребувані профілі прокату, споживчі металеві вироби, зокрема металочерепицю, а також ковальські зливки.

При обсязі виробництва ММЗ до 0,5 млн т на рік альтернативою ДСП є індукційні тигельні печі (ІП). Зокрема, в Індії, другому у світі виробнику чорних металів, частка ІП в загальному обсязі виплавки сталі становить 30 % [13].

Технологічні схеми сталеплавильних печей, які застосовують на ММЗ, наведено на рис. 3, а порівняльні енергетичний і матеріальний баланси агрегатів, розраховані на основі даних [10–14, 16–18], — в табл. 2 і 3 відповідно.



**Рис. 3.** Схема дугової (а) та індукційної тигельної (б) печі: 1 – подина; 2 – каркас; 3 – звід; 4 – електроди; 5 – еркер; 6 – модуль; 7 – маніпулятор; 8 – робоче вікно; 9 – рідка ванна; 10 – витяжний газохід; 11 – баддя; 12 – випускний канал з шибером; 13 – пориста пробка; 14 – індуктор; 15 – тигель

На ММЗ «великої» металургії застосовують дугові сталеплавильні печі змінного та постійного струму (ДСППС) місткістю до 420 т і питомою електричною потужністю 1–1,5 МВА/т. Тривалість плавки в таких печах – 30–45 хв.

Робочий простір ДСП (рис. 3а) складається з футерованої вогнетривами (переважно на основі  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Al_2O_3$ ) подини з еркерною зоною для організації донного безшлакового випуску сталі та водоохолоджуваних каркасу і

зводу з отворами для електродів у центральній вогнетривкій вставці.

Крім електричної, в сучасних ДСП передбачено використання хімічної енергії (до 30–40 % загальної потреби) за допомогою модулів інтенсифікації плавки та універсальної маніпулятора. Модулі мають два режими роботи: паливно-кисневого пальника для інтенсифікації плавлення шихти та надзвукової кисневої фурми для окиснення вуглецевмісного порошку, що синхронно інжектуються у ванну. Пальники сприяють плавленню скрапу в «холодних» зонах робочого простору. Фурма забезпечує прискорений енергоефективний нагрів рідкої сталі електричними дугами завдяки примусовому перемішуванню ванни в умовах екранування спіненим пухирцями  $CO$  шлаком випромінювання дуг на водоохолоджувані панелі. Маніпулятор застосовують для підрізання нагрітої дугами шихти струменем кисню з метою прискорення плавлення у ванні, що формується, продувки ванни киснем через витратну трубку під рівень у дозвуковому режимі, інжекції у ванну вуглецевмісного порошку, відбору проб і заміру температури. Інтенсивність процесів тепломасообміну у ванні підтримують продувкою аргоном через пористі пробки в подині або за допомогою системи електромагнітного перемішування.

Проте наявні засоби інтенсифікації плавки з використанням хімічної енергії не завжди відповідають вимогам вуглецевої нейтральності, оскільки генерують  $CO_2$ , а отже, концепція застосування альтернативної енергії в ДСП у середньостроковій перспективі потребує перегляду.

Шлак у кількості 8–12 кг/т зливають через робоче вікно та утилізують. У процесі плавлення металу з ДСП через витяжний газохід видаляється пилогазове середовище у кількості до 300–350 кг/т сталі з температурою до 1600 °С. Суміш містить гази:  $CO$  (20–25 мас.%),  $CO_2$  (15–20),  $O_2$  (1–15) і  $N_2$  (50–60 мас.%), а також плавильний пил з оксидів заліза та інших металів у кількості до 20–25 кг/т сталі. Знепилювання газу до європейських норм 10–20 мг/м<sup>3</sup> (за н.у.) забезпечує система газоочищення з блоком рукавних тканинних фільтрів.

Є два концептуальних рішення щодо реалізації енергії дугового розряду на нагрів і плавлення шихти в робочому просторі [10–12, 16–18]:

1) традиційний дискретний процес (рис. 3), в якому теплообмін здійснюється переважно

випромінюванням. Електроди занурюються в шихту, завантажену в піч баддею, та розплавляють її енергією електричних дуг. У рідкій ванні завершується процес плавлення та проводиться підготовка напівпродукту з дотриманням технологічного регламенту щодо температури,

Таблиця 2. Енергетичний баланс виплавки сталі в дуговій сталеплавильній печі та в індукційній тигельній печі

|         | Стаття  | Дугова піч          |                   | Індукційна піч |
|---------|---|---------------------|-------------------|----------------|
|         |   | «Велика» металургія | «Мала» металургія |                |
| Прихід  | Електроенергія, %                                 | 50–60               | 75–85             | 98–99          |
|         | Паливно-кисневі пальники, %                       | 5–10                | –                 | –              |
|         | Хімічна енергія, %                                | 30–40               | 15–25             | 1–2            |
|         | Усього, % (кВт·год/т)                             | 100 (600–620)       | 100 (750–1000)    | 100 (600–780)  |
| Витрата | Тепловміст сталі, %                               | 55–60               | 50–55             | 50–55          |
|         | Тепловміст шлаку, %                               | 8–10                | 8–12              | 3–4            |
|         | Втрати енергії з пилогазовим середовищем, %       | 17–28               | 7–10              | 7–10           |
|         | Втрати енергії з охолоджувальною водою, %         | 8–10                | 5–6               | 18–25          |
|         | Акумуляція теплоти футерівкою і втрати назовні, % | 1–3                 | 17–30             | 3–6            |
|         | Усього, % (кВт·год/т)                             | 100 (600–620)       | 100 (750–1000)    | 100 (600–780)  |

Таблиця 3. Матеріальний баланс виплавки сталі в дуговій сталеплавильній печі та в індукційній тигельній печі

|         | Стаття                               | Дугова піч, кг/т    |                   | Індукційна піч, кг/т |
|---------|--------------------------------------|---------------------|-------------------|----------------------|
|         |                                      | «Велика» металургія | «Мала» металургія |                      |
| Прихід  | Скрап                                | 1100–1200           | 1050–1200         | 1030–1060            |
|         | Шлакоутворювальні матеріали          | 40–45               | 50–70             | 30–40                |
|         | Електроди                            | 0,9–1,2             | 5–9               | –                    |
|         | Вогнетриви                           | 6–8                 | 20–25             | 3–5                  |
|         | Паливо для пальників (природний газ) | 5–8                 | –                 | –                    |
|         | Кисень                               | 50–70               | 15–25             | –                    |
|         | Вода для охолодження (оборотна)      | 3000–4000           | 50–200            | 100–200              |
|         | Аргон                                | 0,02–0,04           | –                 | –                    |
|         | Повітря (приплив у робочий простір)  | 120–180             | 20–40             | –                    |
|         | Вуглевмісний порошок                 | 8–14                | –                 | –                    |
|         | Вугілля в завалку                    | 9–11                | 5–8               | –                    |
| Витрата | Метал                                | 1000                | 1000              | 1000                 |
|         | Шлак                                 | 105–115             | 120–160           | 10–15                |
|         | Пилогазове середовище                | 250–350             | 90–130            | <10                  |
|         | Плавильний піл                       | 18–25               | 7–9               | <1                   |

вмісту вуглецю та фосфору. При випуску металу для позапічного доведення у печі залишають «болото» з метою прискорення плавлення шихти в наступній плавці;

2) інноваційний умовно безперервний flat bath-процес з переважно конвективною теплопередачею (Consteel компанії Techint Technologies (Італія), Quantum від Siemens-VAI (ФРН, Австрія), Primetals Technologies (Велика Британія) та ін.). У рідкометалевій ванні відбувається дифузійне конвективне плавлення фрагментованої шихти, попередньо нагрітої теплою пилгазового середовища ДСП. Для компенсації втрат енергії випромінюванням відкритої поверхні ванни нагрів металу до регламентованої температури проводять електричними дугами під спіненим модулями інтенсифікації плавки шлаком в умовах примусового перемішування. Під час випуску більше половини виплавленого металу («болото») залишають у печі.

Печі постійного струму, порівняно з трифазними ДСП, характеризуються більш стійким горінням дуги, що сприяє зниженню вигару заліза, рівня шуму та флікер-ефекту, але інвестиційні витрати у випадку ДСППС на 30 % більші [12]. У «великій» металургії переваги ДСППС значною мірою нівелюються швидкоплинністю плавки напівпродукту, але за певних умов реалізуються в «малій» металургії. Критичним вузлом, з точки зору експлуатації печі, є подовий електрод — анод, який замикає вторинний електричний ланцюг від графітового електрода (катода) через сталеплавильну ванну [19].

Індукційна піч як технологічний агрегат характеризується місткістю від 0,05 до 65 т, потужністю до 0,5–0,8 МВт/т, а тривалість плавки становить 30–60 хв.

В основі роботи ІП лежить принцип безконтактної передачі енергії змінного струму від первинного ланцюга (індуктор) до вторинного (шихта і рідка ванна) шляхом електромагнітної індукції з перетворенням електричної потужності на теплову. Зі збільшенням частоти струму, електропровідності та магнітної проникності середовища (знижується за темпера-

тури вище точки Кюрі) глибина проникнення електромагнітної енергії (струму) в середовище вторинного ланцюга зменшується.

На сучасному етапі оптимальним енерготехнологічним рішенням для промислових тигельних ІП місткістю  $\geq 0,5$ –1 т є використання підвищеної частоти в діапазоні 150–5000 Гц [20], причому зі збільшенням місткості робоча частота знижується. Таке рішення, з огляду на тенденції відносного здешевлення техніки для перетворення частоти, дозволяє мінімізувати питомі витрати на виробництво металопродукції завдяки енергоефективному нагріванню та плавленню шихти.

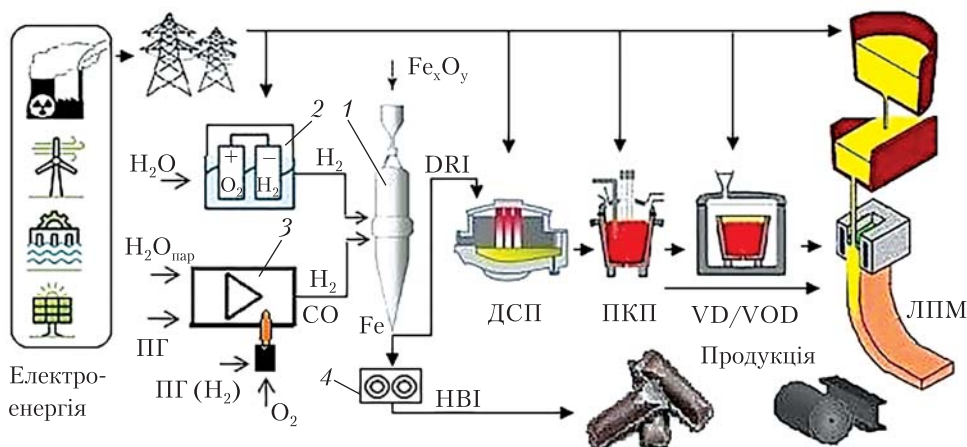
Важливим вузлом ІП (рис. 3б) є охолоджуваний індуктор, виконаний з мідної труби круглого або прямокутного перерізу і розташований концентрично тиглю. Індуктор живиться змінним струмом, як правило, підвищеної частоти від інвертора через перетворювач постійного струму, підключений до розподільної мережі змінного струму. Щільність струму в індукторі становить 20–40 А/мм<sup>2</sup>, а електричні втрати (з водою) сягають 25 % активної потужності.

Для отримання максимально високого електричного ККД системи індуктор–метал, ґрутуючись на практиці експлуатації ІП [23], рекомендовано співвідношення розмірів індуктора для місткості печі  $M$  (т):  $d_i/h_i = 0,95M^{0,005}$ . Електрична установка ІП має дуже низький коефіцієнт потужності ( $\leq 0,1$ –0,18) через великі реактивні втрати внаслідок розсіювання енергії у вторинному ланцюгу, віддаленому від індуктора на товщину футерівки тигля. Для компенсації індуктивної складової реактивної потужності при роботі ІП використовують батарею конденсаторів. Зі збільшенням частоти необхідна ємність батареї конденсаторів знижується, але зростають реактивні струми, підсилюється нагрівання батареї та підвищуються втрати теплоти з водою на охолодження конденсаторів.

Практика експлуатації ІП свідчить, що для ефективного індукційного нагріву характерний розмір (приведений діаметр) тіла, що нагрівається, відповідний внутрішньому діаметру тигля  $d_c$ , має перевищувати глибину про-

**Рис. 4.** Схема технологічного маршруту ММЗ групи А:

1 – шахтний реактор; 2 – електролізер; 3 – реформер; 4 – валковий прес; ПГ – природний газ



никнення електромагнітної енергії не менш ніж у 3,5–5 разів. Шихта меншого розміру «прозора» для електромагнітних хвиль і повільно нагрівається, що знижує енергоефективність П. Геометрія тигля характеризується коефіцієнтом форми ванни, який пов'язаний з місткістю печі  $M$  емпіричним співвідношенням [21]:  $k_b = d_c/h_b = 0,8M^{0,05}$ , а висота робочого простору тигля (з урахуванням шлаку і певного запасу) становить  $h_c = 1,3h_b$ . Електродинамічна циркуляція розплаву в тиглі П забезпечує швидке плавлення шихти, вирівнювання температури та хімічного складу ванни, мінімальний витратний коефіцієнт металу.

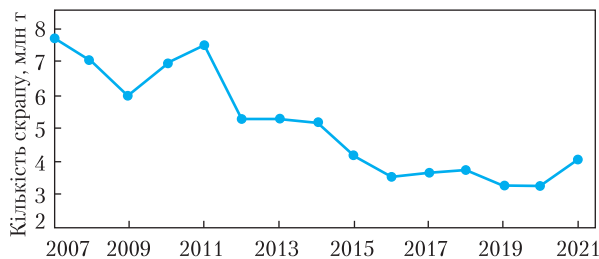
За емісією пилогазового середовища, в тому числі CO<sub>2</sub>, неорганізованими викидами та рівнем шуму П має певні переваги перед ДСП (табл. 3), що особливо важливо у контексті «зеленої» металургії. Разом з тим, шлак, що утворюється в тиглі П у процесі плавки, не сприймає індукційний нагрів через низьку електропровідність і залишається холодним та в'язким, що виключає можливість рафінування сталі по сірці і фосфору. Таку особливість слід врахувати під час підготовки шихти або передбачити доведення плавки після П у пристрої ківш-піч з електродуговим нагрівом ванни.

**Відновлення та інноваційний розвиток металургії України.** В Україні, з урахуванням промислової інфраструктури, на нашу думку, слід впроваджувати три групи малих металургійних заводів, що відрізняються одна від

одної вихідною шихтою, сортаментом та обсягом виробництва металопродукції. Комплектацію ММЗ та пусконаладжувальні роботи можуть забезпечити вітчизняні підприємства, зокрема НКМЗ – відомий у світі виробник металургійного обладнання, в тому числі ДСП, систем позапічної обробки та МБЛЗ.

**ММЗ групи А.** Основний обсяг виробництва сталі та металопродукції раціонально зосередити на нових високопродуктивних (1–2 млн т/рік) ММЗ за технологічним маршрутом (рис. 4) металізована сировина – ДСП – позапічна доводка (ПКП, VD/VOD) – ливарно-прокатний модуль (ЛПМ). Продукцією ММЗ групи А можуть бути насамперед гарячекатані рулони конструкційних марок сталі, зокрема для глибокої витяжки, трубопроводів, будівництва.

Ця схема покликана поступово замінити основний на сьогодні технологічний маршрут виплавки сталі доменна піч – конвертер. Використання металізованої сировини як шихти, що є альтернативою рідкому чавуну в контексті Green Deal, пов'язане з обмеженням заготівлі скрапу в Україні (рис. 5). Надходження металобрухту, з урахуванням витратного коефіцієнту, значно відстає від потреби, навіть за збереження обсягу виробництва сталі на рівні 2021 р. та заборони на експорт скрапу. Водночас можливості імпорту скрапу будуть вкрай обмежені через очікувану протекціоністську політику потенційних країн-експортерів.



**Рис. 5.** Обсяги заготівлі скрапу в Україні у 2007–2021 рр.

Отже, в контексті Green Deal для забезпечення нових ММЗ шихтою доцільним рішенням є розвиток власного виробництва металізованої сировини. Україна має у своєму розпорядженні поклади залізної руди (4-те місце у світі в перерахунку на вміст заліза) та розвинену гірничорудну промисловість, яка крім традиційних концентрату й агломерату виробляє доменні окатиші зі ступенем металізації 65–68 %<sup>3</sup> – вихідний матеріал для виготовлення металізованої сировини.

Металізовану сировину виробляють переважно за технологіями Mirdex компанії Mir-dex Technologies (США) та Energiron компаній Tenova і Danieli (Італія), на які разом припадає 79 % світового ринку продукту [22]. Процес відбувається безперервно в шахтному реакторі твердофазним відновленням оксидів заліза газовою сумішшю  $H_2$  і  $CO$  за температури 900–1100 °С та тиску до 0,6 МПа. Час від завантаження шихти до виходу продукту становить 6–7 годин. У контексті Green Deal найновіші версії технічних і технологічних рішень процесів Mirdex та Energiron, до яких розробники різними шляхами йшли майже 60 років, принципово не дуже відрізняються одна від одної.

Відновну суміш отримують переважно конверсією природного газу – вуглекислотною  $CH_4 + CO_2 = 2CO + 2H_2$  або пароводяною  $CH_4 + H_2O = CO + 3H_2$ . Ендотермічні реакції конверсії здійснюються в опалюваному реформері і частково в шахті реактора з використанням відновленого заліза як каталізатора (авто-

реформінг). Окремі варіанти технології передбачають застосування коксового газу або продуктів газифікації вугілля. Залежно від опції співвідношення газових об'ємів  $H_2/CO$  в шахті становить 0,2–4 (з урахуванням перетоків і підживлення) при прагненні до максимуму.

Процес відновлення відбувається в шахті послідовно від вищого оксиду  $Fe_2O_3$  до нижчого  $FeO$  і далі до заліза згідно із сумарними реакціями:  $Fe_2O_3 + 3H_2 = Fe + 3H_2O$ ;  $Fe_2O_3 + 3CO = Fe + 3CO_2$  [23]. За температури нижче 810 °С більш ефективним відновником є монооксид вуглецю, а вище 810 °С – водень. Швидкість відновлення оксидів заліза  $H_2$  за інших рівних умов вища порівняно з  $CO$  [24].

Передбачається, що в процесі поступової модернізації технології Mirdex та Energiron наблизатимуться до вимог вуглецевої нейтральності [25]. Модернізація при цьому полягає в максимальному використанні водню як відновного газу, виробленого на основі проривних технологій електролізу води, таких як лужний (AEL), протонобмінний мембранний (PEMEL) і твердооксидний електролізер (SOEL) [26].

Витрати електроенергії в процесі виробництва водню електролізом води становлять 35–45 кВт·год/кг  $H_2$  [26, 27]. Згідно зі стехіометрією і термодинамікою сумарної реакції, водневе відновлення потребує 54 кг  $H_2$  (плюс 35–30 кг  $H_2$  на опалення нагрівача відновного газу [26]) та 486 кг води на тонну заліза, що в енергетичному еквіваленті становить 1933 кВт·год. Процеси відновлення Mirdex і Energiron мають практично однакову енергомісткість (фізична теплота на нагрів шихти до робочої температури, конверсія природного газу, теплота реакцій відновлення), за різними оцінками – в межах 2700–2900 кВт·год/т металізованого продукту [28, 29]. З урахуванням витрат на електроліз загальна енергомісткість сталі при вуглецево нейтральному виробництві технологічним маршрутом металізована сировина – ДСП становить 4600–4800 кВт·год/т. Цей показник навіть за нинішнього технологічного рівня водневої енергетики на 8–12 % нижчий за витрати в технологічному маршруті

<sup>3</sup> Григоренко Ю. Залізний бонус: український ГМК пробивається на ринок преміальної сировини. *GМК Center*. 23.04.2021. <https://bit.ly/3n8X8oS>



доменна піч — конвертер, не кажучи вже про екологічні переваги.

Металізована сировина має вигляд окатишів діаметром 9–15 мм (Directly Reduced Iron — DRI) та брикетів масою 1–5 кг (Hot Briquetted Iron — HBI), які виготовляють з окатишів за допомогою валкового пресу.

При розміщенні ДСП поруч з майданчиком виробництва сировини оптимальним енергоефективним рішенням є гарячий DRI (600–700 °С), для порційного завантаження якого в ДСП створено відповідні системи Hotlink (Mir dex) і H ytemp (Ener giron) [22, 29]. У разі відвантаження на далекі відстані оптимальним варіантом є HBI як більш компактний і не пірофорний продукт.

Основними характеристиками металізованої сировини, які визначають техніко-економічні показники виробництва сталі, є такі: ступінь металізації —  $\geq 90$  %; вміст вуглецю — 0,5–2,2 % (до 4 % у вигляді  $\text{Fe}_3\text{C}$  для «енергомісткої» сировини); насипна густина ( $\text{т/м}^3$ ) — 1,6–1,9 (DRI) і 2,5–3,3 (HBI); чистота, порівняно з рядовим скрапом, за домішками сірки, фосфору та кольорових металів. Експерти прогнозують до 2050 р. зростання споживання металізованої сировини у 3–4 рази відносно 2020 р., тобто до 400 млн т.

Слід враховувати, що сировина при водневому відновленні вироблятиметься з мінімальним (близько нуля) вмістом вуглецю, що позначиться на її відновлювальному й енергетичному потенціалах. Так, плавлення «енергомісткого» DRI ( $> 3,5$  % С) підвищує енергоефективність плавки на 0,4 кВт·год/кг С завдяки екзотермічній реакції  $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}$  у ванні ДСП.

Що ж до практичної реалізації подібних проектів, то, наприклад, орієнтовний обсяг інвестицій компанії Металоінвест у модуль Ener giron (Старий Оскол, РФ) потужністю 1,8 млн т DRI/HBI на рік становив \$660 млн, а будівництво тривало три роки<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Григоренко Ю. Залізний бонус: український ГМК пробивається на ринок преміальної сировини. *GМК Center*. 23.04.2021. <https://bit.ly/3n8X8oS>

Альтернативою твердофазному відновленню оксидів заліза за допомогою газової суміші у шахтних реакторах є вуглець-термічний процес виробництва металізованої сировини у вигляді залізних гранул — «nuggets». Процес ITmk3, розроблений компанією Kobe Steel (Японія), здійснюється в тонкому шарі рудо-вугільних окатишів у печі з подом, що обертається [30]. Протягом одного оберту поду (10–15 хв) за температури 800–1350 °С, що забезпечується теплою газоповітряних пальників, відбуваються процеси відновлення з локальним плавленням. Охоложені «nuggets» при вивантаженні відокремлюють від шлаку. Продукт за хімічним складом відповідає чавуну і має густину 6,5–7  $\text{т/м}^3$ . Перевагами ITmk3 є можливість використання дрібної фракції залізної руди, залізвмісних техногенних відходів та некоксового вугілля (приблизно 0,5 т/т металізованої сировини), значно менші витрати природного газу, ніж у шахтних реакторах (якщо застосовувати продукти конверсії природного газу), нижча порівняно з доменним виробництвом питома емісія  $\text{CO}_2$ . Після успішного пілотного проекту в Японії в 2011 р. було реалізовано вже комерційний проект ITmk3 Mesabi Nugget (США) потужністю 500 тис. т на рік [31], який, імовірно, можна вважати вдалим. Подальші роботи з впровадження технології ITmk3 в Україні, зокрема заплановані компанією Hares Group (Австрія), було припинено<sup>5</sup>.

Щодо виробництва металізованої сировини, то крім зазначених вище маловуглецевих і водневих (у перспективі) технологій, слід згадати ще й про вуглецево-нейтральний електроліз оксидів заліза. Триває підготовка до реалізації пілотних проектів високотемпературного [32] та низькотемпературного [33] процесів. Передбачається визначити режимні параметри і техніко-економічні показники промислового виробництва заготовок заліза як шихти ДСП. Згідно з даними попередніх лабораторних досліджень, питоми витрати енергії при елек-

<sup>5</sup> Японський замінець — технологія прямого восстановаження заліза ITmk3. <https://readmetal.com/?p=12615>

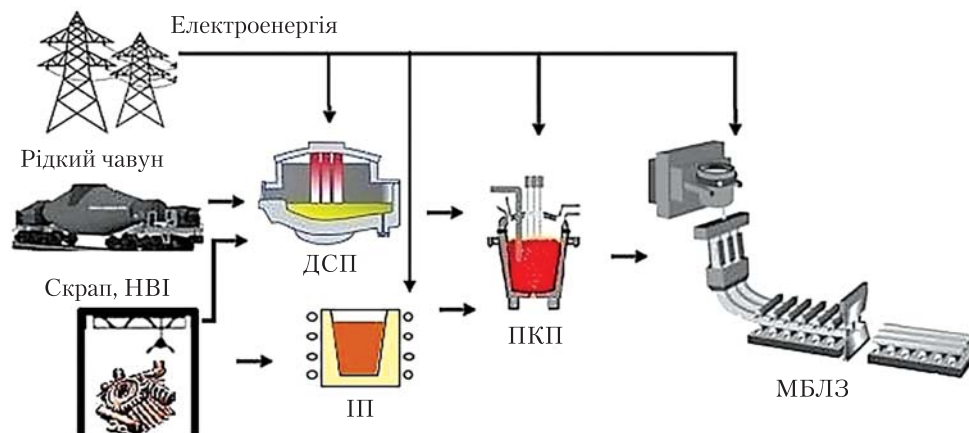


Рис. 6. Схема технологічного маршруту ММЗ групи В

тролізі не перевищуватимуть показників доменного процесу. За цим напрямом виконано й вітчизняні дослідження електролізу залізовмісних техногенних відходів в електропечі з подовими електродами [34].

Впровадження маловуглецевої, на першому етапі, технології з використанням продуктів конверсії природного газу забезпечить у середньостроковій перспективі скорочення питомої емісії  $\text{CO}_2$  при виробництві сталі в Україні в 1,45–2 рази і створить базу для подальшого переходу до вуглецево нейтральної водневої металургії.

**ММЗ групи В.** ММЗ цієї групи призначені для виробництва вуглецевих та низьколегованих конструкційних марок сталі масового сортаменту. Продуктивність заводу може варіюватися у широких межах від 0,1 до 1 млн т на рік, а місткість ДСП (ІП), відповідно, становить 15–100 (10–60) т. Кількість таких підприємств має бути такою, щоб принаймні задовольнити потреби відновлення економіки України.

ММЗ групи В, до якої належать наявні в Україні мінізаводи, реалізують традиційний технологічний маршрут скрап/НВІ – ДСП (ІП) [35]. Такий маршрут (рис. 6), як втілення стратегії мінімізації витрат, є найменш енергомістким сталеплавильним процесом і з позицій Green Deal характеризується прийнятним рівнем емісії  $\text{CO}_2$  (табл. 1).

У цій категорії ММЗ слід відзначити варіант з рідким чавуном як складовою шихти – актуальне для металургії України перехідне рішення

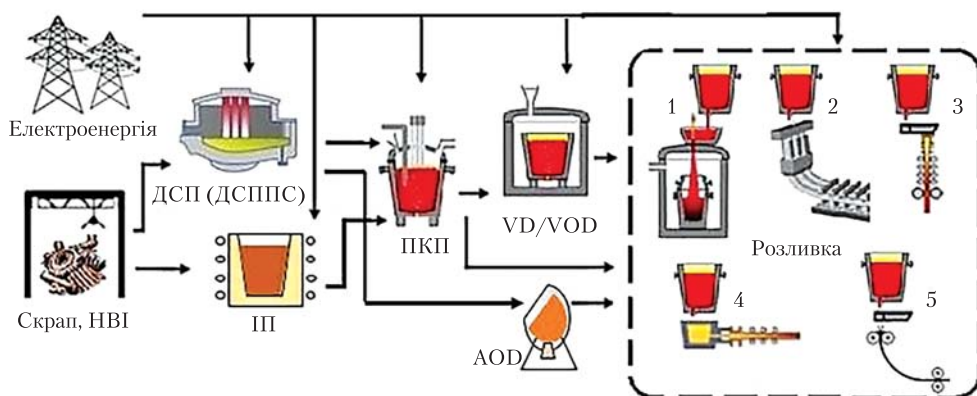
на шляху до вуглецевої нейтральності. Фахівці компанії Concast AG (Швейцарія) [36] рекомендують частку рідкого чавуну в шихті ДСП в межах 25–40 %. Заливку чавуну в ДСП здійснюють у період плавлення скрапу з ковша спеціальним маніпулятором через еркер при витраті 0,07–0,08 т/хв на тонну місткості печі.

Напівпродукт, виплавлений у ДСП (ІП), доводять до заданої марки сталі в ПКП, розливають на високопродуктивній сортовій МБЛЗ з подальшою прокаткою на ліквідну металопродукцію. Можливим є варіант роботи ММЗ на випуск товарної безперервнолитої заготовки квадратного або круглого перерізу.

Стосовно ММЗ групи В слід розглядати як будівництво нових, так і модернізацію згідно з вимогами Green Deal наявних заводів, а також можливість виділення зі складу машинобудівного підприємства ММЗ на базі окремої ДСП, що просторує.

**ММЗ групи С.** У сегменті металургійної продукції з високоякісних легованих сталей слід враховувати відносно невеликі обсяги її споживання, зокрема й в Україні (кілька десятків тонн на місяць), що практично унеможливує використання технологічних потужностей великих заводів. У свою чергу, розвиток концепції ММЗ у напрямі мініатюризації виробництва дозволяє вирішити проблему замовлень дрібносерійних партій при зниженні фінансових ризиків в умовах локальних, більш прогнозованих ринків збуту. Для ММЗ групи С економічно виправданим видається змен-

**Рис. 7.** Схема технологічного маршруту ММЗ групи С: 1 – вакуумна камера для сталевих зливків; 2 – радіальна МБЛЗ; 3 – вертикальна МБЛЗ; 4 – горизонтальна МБЛЗ; 5 – двовалкова МБЛЗ



шення нижньої межі річної продуктивності до 5–10 тис. т залежно від сортаменту продукції та обсягів інвестицій в основні фонди.

У структурі ММЗ групи С доцільно застосовувати ДСП (ДСППС) малої місткості 3–10 т, як нові, так і ті, що простоюють на ливарних підприємствах, після відповідної модернізації або як альтернативу – ІП відповідної місткості. У випадку роботи на постачання рідкої сталі машинобудівному комплексу, зокрема для виробництва крупних ковальських зливків, є потреба в ДСП (ДСППС) місткістю 100 т і більше. З огляду на високу цінність та відповідальність замовлень у складі такого заводу (рис. 7) доцільними будуть новітні засоби позапічної обробки: ПКП, VD/VOD, аргон-кисневе знеуглецювання (АОД) та розливки сталі: крупних зливків під вакуумом, радіальна, вертикальна, горизонтальна, двовалкова (процес Castrip) МБЛЗ.

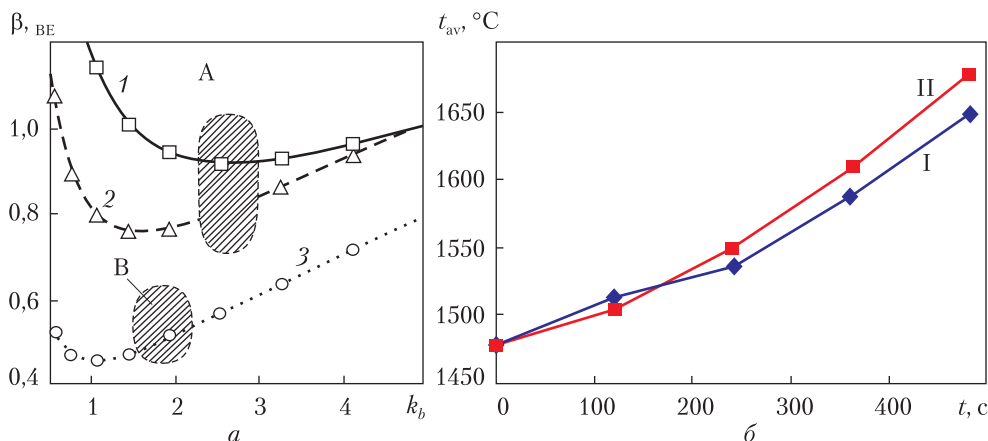
Для сталеплавильних агрегатів ММЗ групи С слід передбачити можливість як ритмічного функціонування, так і роботи за гнучким графіком, із простоями, з урахуванням добового колювання тарифу на електроенергію.

Попередньо в загальних технічних схемах ММЗ, відповідно до особливостей логістики і практики, плавильне відділення включає одну ДСП (ДСППС) або дві ІП (одна періодично в ремонті) та по одному пристрою позапічної обробки й розливки (МБЛЗ). Оцінку місткості печі (ковша) здійснюють виходячи з виробничої програми ММЗ, фонду робочого часу, наведеної вище тривалості плавки. Кіль-

кість струмків слябової та блюмової МБЛЗ зазвичай становить 1; сортової – визначається швидкістю витягування (згідно з рекомендаціями виробника машини) й перерізом безперервної заготовки.

**Нові енергоефективні рішення щодо виробництва сталі на ММЗ.** Зі збільшенням обсягів виробництва електросталі актуальним стає підвищення енергоефективності та екологічної безпеки ДСП. Досить низький (до 75 %) тепловий ККД ритмічно працюючих дугових печей порівняно з конвертером зумовлений втратами енергії, з яких 70–80 % припадає на пилогазове середовище і воду, що охолоджує захисні панелі. У ДСП ливарного класу, які працюють із простоями, ККД нижчий і переважають втрати енергії на акумуляцію теплоти футерівкою. У ДСП енергоефективність тісно пов'язана з екологічною безпекою через «вуглецевий слід» споживаної електроенергії. В табл. 4 наведено характеристики розробок, спрямованих на підвищення енергоефективності та екологічної безпеки електросталеплавильного виробництва в умовах ММЗ. Нижче надано пояснення щодо пропонування рішень.

«Глибока» ванна ДСП. Зменшення коефіцієнта форми сталеплавильної ванни  $k_b = D_b/H_b$  (рис. 3а) веде до зниження втрат теплоти випромінюванням (рис. 8а) та інтенсифікації процесів тепломасообміну в розплаві (рис. 8б) завдяки зростанню двофазної зони при пневматичному перемішуванні й збільшенню потужності електровихрових течій при електромагнітному перемішуванні [37–42]. Внаслідок



**Рис. 8.** Відносні втрати теплоти випромінюванням через водоохолоджувані елементи  $\beta_{\text{вк}}$  залежно від коефіцієнта форми ванни  $k_b$  для дугової печі місткістю 120 т (а). Традиційний дискретний процес у ДСП (1), в ДСППС (2) та flat bath-процес у ДСП (3). Залежність середньої температури металу  $t_m$  від часу нагрівання дугами базової (I) та «глибокої» (II) ванни (б)

**Таблиця 4.** Характеристика інноваційних розробок для ММЗ

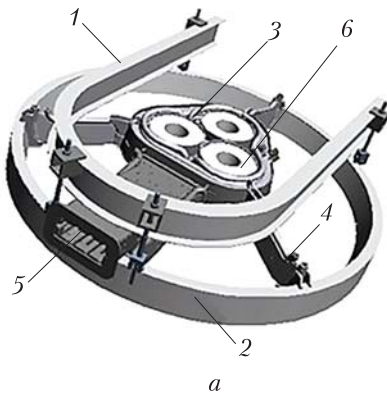
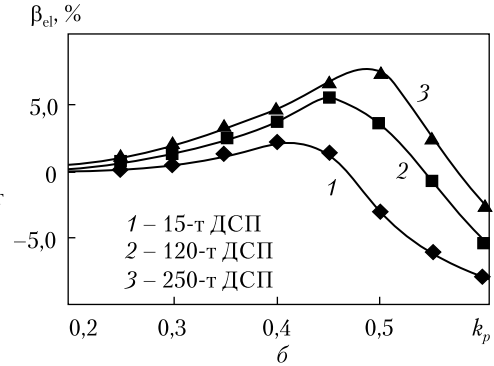
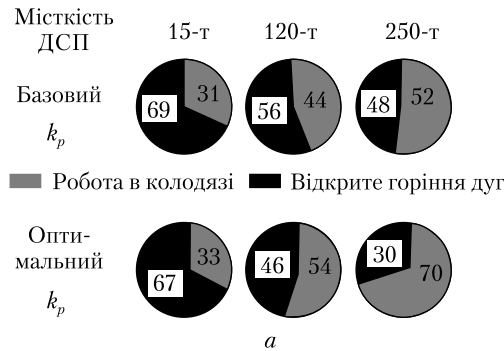
| Найменування   | Характеристика розробки   | Застосування   | Очікувані результати   |
|--|---|--|--|
| «Глибока» ванна ДСП з примусовим перемішуванням              | Зменшення коефіцієнта форми ванни з традиційного 5,0–4,5 до 2,5–1,8 за певної місткості печі        | Усі види ДСП. Найбільш ефективно при flat bath-процесі | Зниження втрат теплоти з водою на 20–50 %, втрат заліза та емісії $\text{NO}_x$ на 10–12 %. Підвищення швидкості нагріву ванни дугами та плавлення скрапу на 15–25 % |
| Оптимізація діаметра розпаду електродів ДСП                  | Збільшення відносного діаметра розпаду електродів із традиційного 0,2 до 0,42–0,49 діаметра каркасу | ДСП місткістю $\geq 100$ т, що працюють на скрапі      | Економія електроенергії 2,5–7,5 % завдяки збільшенню відносної частки етапу роботи дуг у колодахяз у загальному часі періоду плавлення                               |
| Система розосередженої аспірації пилогазового середовища ДСП | Збільшення та розосередження поверхні всмоктування з наближенням її до електродних зазорів          | Всі види ДСП, а також ПКП                              | Скорочення неорганізованих викидів, збільшення припливу повітря в піч на 20–35 % порівняно з традиційною системою аспірації  |
| Модернізація робочого простору ДСП ливарного класу           | Комплекс «глибока» ванна, система розосередженої аспірації, комбіновані водоохолоджувані елементи   | ДСП ливарного класу                                    | Економія електроенергії до 75 кВт·год/т, зниження витрати вогнетривів на 30–40 %   |
| Багатофункціональний проміжний ківш МБЛЗ                     | Нагрів та рафінування сталі в умовах електромагнітного перемішування                                | Проміжні ковші МБЛЗ                                    | Зниження витрати електроенергії на позачісну обробку сталі на 40–60 кВт·год/т  |

інтенсифікації перемішування знижується перегрів ванни в зонах горіння дуг, а отже, зменшуються втрати заліза випаровуванням та емісія токсичних оксидів азоту  $\text{NO}_x$ . Примусове перемішування у «глибокій» ванні підвищує інтенсивність дугового нагріву розплаву

та конвективного плавлення скрапу, особливо в разі умовно безперервного flat bath-процесу, скорочує тривалість плавки та витрати енергії.

Відповідно до розрахунку теплообміну в робочому просторі ДСП [37], втрати енергії з водою досягають мінімуму за певного  $k_b$  (рис. 8а),

**Рис. 9.** Режими плавлення шихти (а) та економія електроенергії  $\beta_{el}$  залежно від  $k_p = D_p/D_f$  (б)



**Рис. 10.** Комбінований звід ДСП ливарного класу — загальне рішення (а) та реалізація (б): 1 — портал печі; 2 — опорне кільце зводу; 3 — центральна водоохолоджувана частина; 4 — опори; 5 — витяжний газохід; 6 — вогнетривка вставка

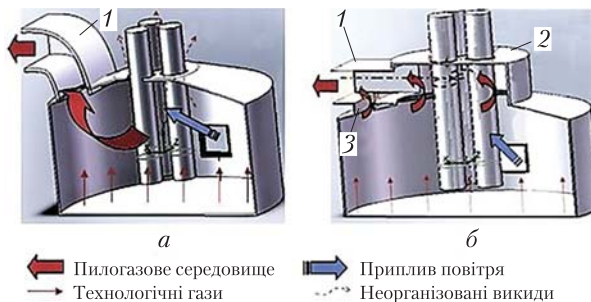
що пов'язано з посиленням впливу електродів у загальній потужності випромінювання зі зменшенням діаметра ванни. Варіювання  $k_b$  обмежене областями А, В через умови завантаження шихти в різних енерготехнологічних режимах печей. Найбільший ефект «глибокої» ванни досягається в дугових печах, що працюють за flat bath-процесом, і в ДСППС (завдяки одному електроду) і полягає у зниженні втрат теплоти з водою на 49 і 20 % відповідно.

Чисельним моделюванням нагріву ванни ДСП для середньої температури металу (рис. 8б) встановлено вплив вільної конвекції від гарячих плям дуг зверху та вимушеної конвекції при барботажі металу знизу [41]. Дія першого фактора виявляється у повільному нагріві «глибокої» ванни від дуг, другий фактор, що характеризується потужністю пневматичного перемішування, зі збільшенням глибини ванни набуває переважного розвитку і з плином часу стає визначальним. Отримані результати свідчать про можливість скорочення часу

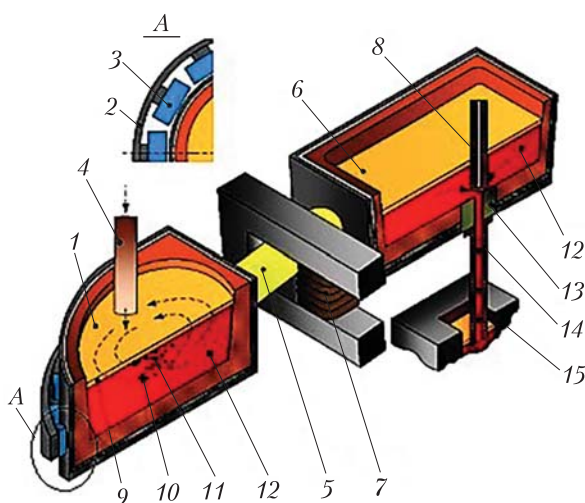
дугового нагріву сталі в печі на 12–16 % за зміни коефіцієнта форми ванни від 5,0 до 2,5.

*Оптимізація діаметра розпаду електродів ДСП.* Чисельне дослідження впливу відносного діаметра розпаду електродів  $k_p = D_p/D_f$  (рис. 3а) на режим плавлення та питому витрату електроенергії у найбільш енерговитратний період плавлення виконано для промислових ДСП місткістю 15; 120 і 250 т (рис. 9) [43].

Для ДСП, що працюють на скрапі за дискретним процесом, оптимальний  $k_p$  зростає з 42 у 15-тонній до 49 у 250-тонній печі. При переході від базового  $k_p = 0,20$  до оптимального збільшується відносний час найбільш енергоєфективного етапу плавлення шихти в колодязях на 2 % у печах малої (до 15–20 т) місткості і до 12–18 % у великотоннажних (120–250 т) ДСП. В результаті зміни режиму плавлення при оптимізації  $k_p$  очікується економія електроенергії від 2,5 % у печах малої місткості до 7,5 % у великотоннажних печах. Для досягнення максимальної відносної тривалості енергоє-



**Рис. 11.** Схема традиційної системи аспірації (а) та системи розосередженої аспірації (б): 1 – витяжний газохід, 2 – зводова камера, 3 – канал витяжного газоходу



**Рис. 12.** Багатофункціональний проміжний ківш МБЛЗ. 1 – центрифугальна камера; 2 – кожух; 3 – індуктори; 4 – захисна труба; 5 – патрубки для перетікання металу; 6 – розподільна камера; 7 – індуктор для нагрівання сталі; 8 – стопор; 9 – теплоізолювальна суміш; 10 – циркуляційні потоки; 11 – неметалеві включення; 12 – рідка ванна; 13 – стакан-дозатор; 14 – заглибний стакан; 15 – кристалізатор

фективного етапу горіння дуг у колодязях у загальному часі плавлення у великотоннажних ДСП доцільно збільшити відносний діаметр розпаду електродів.

*Система розосередженої аспірації ДСП.* Газовидалення з ДСП реалізують розрідженням, створюваним димососом, через витяжний газохід над отвором у зводі (рис. 11а). Аспірація має локальний характер через обмеження пе-

релізу газоходу та розташування його на периферії зводу.

Газодинаміка робочого простору ДСП характеризується інтенсивними пилогазовими потоками, неорганізованими викидами через електродні зазори та значним припливом повітря через робоче вікно. Наслідком є підвищені втрати теплоти з пилогазовим середовищем та заліза з плавильним пилом.

Ці проблеми вирішуються наближенням витяжного газоходу до зони електродних зазорів (рис. 11б). Вплив розрідження димососу таким чином розосереджується між цією зоною і периферією печі за допомогою камери на зводі печі, що охоплює електроди, і додаткового каналу з витяжного газоходу на периферію печі [44]. Аспіраційна поверхня в разі такої організації газовидалення з ДСП збільшується до 1,7 раза. Загальна картина газодинаміки печі, з огляду на число треків частинок пилу, що проходять крізь електродні зазори в умовну камеру, свідчить про більш ефективну локалізацію неорганізованих викидів у системі розосередженої аспірації.

*Модернізація ДСП ливарного класу.* ДСП ливарних цехів, що простоюють на заводах України через економічні проблеми, характеризуються низькою питомою потужністю трансформатора (0,5–0,7 МВА/т), неефективною системою аспірації, відсутністю засобів примусового перемішування ванни. Наслідком є низький рівень енергоефективності та екологічної безпеки, підвищена витрата вогнетривів через тривалий «рідкий» період плавки та обмеженість застосування водоохолоджуваних елементів у критичних за стійкістю зонах футерівки при неможливості компенсації втрат теплоти. Застосування таких печей на ММЗ за сучасних цін на енергоносії та вогнетриви, а також зважаючи на підвищені екологічні вимоги, можливе лише після їх ефективного модернізації.

Проблема вирішується зниженням місткості та коефіцієнта форми ванни в межах наявної інфраструктури печі, впровадженням системи розосередженої аспірації, примусового перемішування металу та водоохолоджуваних елементів у критичних за стійкістю зонах фу-

терівки. Останнє дозволить знизити втрати енергії на акумуляцію теплоти масивною футерівкою під час простоїв ДСП, що переважають в енергетичному балансі печей ливарного класу (табл. 2).

Комбіновані водоохолоджувані елементи призначені для застосування в ДСП ливарного класу малої місткості (до 12 т) при низькій за сучасними стандартами питомій потужності трансформатора. У комбінованому зводі ДСП (рис. 10) охолоджується центральна, найбільш термічно напружена й схильна до зношування частина, що лімітує стійкість зводу в цілому [45]. Таке рішення дозволяє за мінімальних втрат теплоти скоротити витрату вогнетривів та електродів.

*Багатофункціональний проміжний ківш МБЛЗ.* Вимоги до якості безперервнолітої заготовки зі спеціальних сталей постійно посилюються. У технологічному маршруті ММЗ з ДСП малої місткості (група С) традиційно передбачений ПКП в деяких випадках не може задовольнити ці вимоги через низьку стійкість футерівки шлакового поясу сталерозливного ковша, спричинену потужним випромінюванням близько розташованих електродів. Для цієї групи ММЗ актуальним видається впровадження багатофункціонального проміжного ковша. При цьому можна виключити ПКП із технологічної схеми. Конструкція ковша (рис. 11) забезпечує необхідну температуру металу в процесі розливки, очищення сталі від неметалевих включень, рафінування й мікролегування розплаву [46, 47]. Таке технічне рішення дасть змогу зменшити інвестиційні та поточні витрати ММЗ до 10 %, знизити витрати енергії на позапічну обробку.

**Висновки.** Відновлення економіки України нерозривно пов'язане з розвитком сталеливарної промисловості. Орієнтація галузі на «зелений курс», проголошений ЄС в 2019 р. у рамках боротьби зі зміною клімату Землі, створює унікальну можливість подолати технічне відставання завдяки освоєнню нових технологічних процесів електрометалургії, які відповідають сучасним вимогам енергоефективності та екологічної безпеки.

Рішення полягає у розвитку мережі малих металургійних заводів, які працюють з мінімальними матеріальними, енергетичними та екологічними витратами. Такі заводи поступово витіснятимуть великі вертикально інтегровані металургійні комбінати, що домінують зараз, з їх традиційним вуглецевим циклом сталеплавильного виробництва, фізично зношеним і морально застарілим обладнанням.

З огляду на промислову інфраструктуру в Україні, доцільно впроваджувати три групи малих металургійних заводів, щоб задіяти наявні залізородні ресурси, металобрухт та накопичені залізовмісні техногенні відходи як вихідну шихту.

Основну увагу слід приділити малим металургійним заводам з виробництва сталі із металізованої сировини в дуговій сталеплавильній печі як альтернативі домінуючому нині енергомісткому та екологічно брудному технологічному маршруту доменна піч – конвертер. У такий спосіб можна задовольнити внутрішній попит і експортувати на зовнішній ринок конкурентоспроможну листову металопродукцію сучасних ливарно-прокатних модулів. Реалізація такого проекту дозволить зменшити питому емісію CO<sub>2</sub> у 1,45–2 рази. Перехід на відновлення заліза воднем у процесі розвитку та здешевлення технологій електролізу води кардинально вирішує проблему вуглецевої нейтральності металургійної галузі в контексті Green Deal.

Дві інші групи малих металургійних заводів на основі технологічних маршрутів з дуговими та індукційними електропечами мають забезпечити продукцією ринок сталі масового попиту та спеціальних сталей, що виробляються малими партіями, а також ливарне й ковальське виробництво в машинобудівному комплексі.

У процесі створення малих металургійних заводів доцільно використовувати окремі дугові печі, що зараз простоюють на сталеливарних заводах через проблеми з ринками збуту. Для цього їх слід модернізувати, зокрема із застосуванням «глибокої» ванни, оптимального діаметра розпаду електродів, системи розосередженої аспірації, водоохолоджуваних елементів зі зниженими втратами теплоти.

## REFERENCES

## [СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Hornby S., Brooks J. Impact of Hydrogen DRI on EAF Steelmaking. *Direct from Midrex*. 2021. <https://bit.ly/400tCAd>
2. Energy use in the steel industry. World Steel Association. 2021. <https://bit.ly/3TBqU1B>
3. Driving Energy Efficiency in Heavy Industries. Analysis. IEA, 2021. <https://bit.ly/3n03oPD>
4. Data Collection Survey on Promotion of “Eco Progress” in the Steel Industry for GHG Reduction. Final Report. March 2022. <https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12335204.pdf>
5. A European Green Deal. Striving to be the first climate-neutral continent. 2019. <https://bit.ly/40gWrbi>
6. Saha D. Towards a decarbonisation of Ukraine’s steel sector. 2021. <https://bit.ly/3n0Iekl>
7. Quader A., Ahmed S., Ghazilla R.A.R., Ahmed Sh., Dahari M. A comprehensive review on energy efficient CO<sub>2</sub> breakthrough technologies for sustainable green iron and steel manufacturing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. **50**: 594–614. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.026>
8. Kollmann T., Kirschen M., Jandl C., Zett K.-M. Benefit of gas purging in BOF and EAF with a focus on material efficiency and CO<sub>2</sub> emissions reduction. *57 International Colloquium on Refractories 2014. Refractories for Metallurgy*. 2014.
9. Stalinsky D.V., Peretyatko R.A., Andreeva T.A. Energy intensity of rolling. *Visnik NTU “KhPI”*. 2011. (46): 131–138. [Сталинский Д.В., Перетятко Р.А., Андреева Т.А. Энергоемкость проката. *Вісник НТУ XIII*. 2011. № 46. С. 131–138.]
10. Toulouevski Yu., Zinurov I. *Electric Arc Furnace with Flat Bath. Achievements and Prospects*. Heidelberg, New York, Dordrecht, London, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15886-0>
11. Seshadri S. (ed.) *Treatise on Process Metallurgy. Industrial Processes*. Part A. Elsevier, 2014. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-67121-5>
12. Toulouevski Yu., Zinurov I. *Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection*. Berlin: Springer-Verlag. 2010. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36273-6>
13. Bedarkar S.S. Energy Balance in Induction Furnace and Arc Steelmaking Furnace. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2020. **10**(6): 57–61. <https://doi.org/10.9790/9622-1006055761>
14. Chaabet M., Dötsch E. Steelmaking based on inductive melting. *Heat Processing*. 2012. **1**: 49–58.
15. December 2022 crude steel production and 2022 global crude steel production totals. World Steel Association. 31.01.2023. <https://bit.ly/3n2vwSe>
16. Narivskiy A.V., Smirnov O.M., Timoshenko S.M. Steel production in Ukraine: current state and prospects (review). *Met. lit’e Ukr*. 2022. **30**(3): 28–46. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.028>
17. Jones J., Bowman B., Lefrank P. *Electric Furnace Steelmaking*. Chapter 10. AISE Steel Foundation. Pittsburg, 1998.
18. Toulouevski Yu., Zinurov I. *Fuel Arc Furnace (FAF) for Effective Scrap Melting*. Springer Publishing, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5885-1>
19. Timoshenko S., Gubinskij M. Energy efficient solutions of DC Electric Arc Furnace Bottom Electrode. *Modern problems of metallurgy*. 2020. **23**: 121–129. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2020.01.12>  
[Тимошенко С.М., Губинський М.В. Енергоефективні рішення подового електроду дугової сталеплавильної печі постійного струму. *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті*. 2020. Т. 23. С. 121–129.]
20. Gandhewar V., Bansod S.V., Borade A.B. Induction Furnace – a Review. *International Journal of Engineering and Technology*. 2011. **3**(4): 277–284.
21. Yegorov A.V. *Raschet moshchnosti i parametrov elektropechey chernoy metallurgii (Calculation of power and parameters of electric furnaces for ferrous metallurgy)*. Moscow, 1990.  
[Егоров А.В. *Расчет мощности и параметров электропечей черной металлургии*. Москва: Металлургия, 1990.]
22. Chevrier V., Lorraine L., Muchishita H. Midrex Process: Bridge to Ultra-low CO<sub>2</sub> Ironmaking. *Kobelco Technology Review*. 2021. **39**: 33–40. [https://www.kobelco.co.jp/english/ktr/pdf/ktr\\_39/033-040.pdf](https://www.kobelco.co.jp/english/ktr/pdf/ktr_39/033-040.pdf)
23. Patisson F., Mirgaux O. Hydrogen Ironmaking. How it works. *Metals*. 2020. **10**(7): 922. <https://doi.org/10.3390/met10070922>
24. Zare Ghadi A., Valipour M., Vahedi S., Sohn H. A Review on the Modeling of Gaseous Reduction of Iron Oxide Pellets. *Steel Res. Int*. 2020. **91**(1): 1900270. <https://doi.org/10.1002/srin.201900270>
25. Chevrier V. Ultra-low CO<sub>2</sub> Ironmaking. Transitioning to the Hydrogen Economy. *Direct from Midrex*. 2020. <https://bit.ly/3LOqqTV>
26. Cavaliere P.D., Perrone A., Silvello A. Water Electrolysis for the Production of Hydrogen to Be Employed in the Ironmaking and Steelmaking Industry. *Metals*. 2021. **11**(11): 1816. <https://doi.org/10.3390/met11111816>



27. The Future of Hydrogen. Report prepared by the IEA for the G20, 2019. <https://www.iea.org/topics/hydrogen/>
28. Green E. The use of Hydrogen in the Iron and Steel Industry. US Department of Energy Workshop 2018. <https://bit.ly/3K1KMrz>
29. Mukhopadhyay A., Ometto M. Energy saving and CO<sub>2</sub> reduction in Energiron DRI production. In: *VI International Congress on the Science and Technology of Ironmaking* (14–18 October 2012, Rio de Janeiro, Brazil). P. 302–312.
30. Kikuchi S., Ito S., Kobayashi I., Tsuge O., Tokuda K. ITmk3 Process. *Kobelco Technology Review*. 2010. **29**: 77–84. [https://www.kobelco.co.jp/english/ktr/pdf/ktr\\_29/077-084.pdf](https://www.kobelco.co.jp/english/ktr/pdf/ktr_29/077-084.pdf)
31. Rutherford S.D., Kopfle J.T. Mesabi Nugget: The World's First Commercial ITmk3® Plant. *Iron and Steel Technology*. 2010. **7**: 38–43.
32. Peplow M. Can industry decarbonize steelmaking? *Chemical & Engineering News*. 2021. **99**(22): 22. <https://bit.ly/42tSguJ>
33. The right formula for steel in the future. <https://etipwind.eu/wp-content/uploads/Siderwin.pdf>
34. Tishchenko P.I., Timoshenko S.N. Smelting and reduction process for the disposal of metallurgical waste in an electric furnace with hearth electrodes. *Ekologiya i promyshlennost*. 2013. (3): 90–94.  
[Тищенко П.И., Тимошенко С.Н. Плавно-восстановительный процесс для утилизации металлургических отходов в электропечи с подовыми электродами. *Экология и промышленность*. 2013. № 3. С. 90–94.]
35. Dubodelov V., Smirnov O., Kubersky S., Goryuk M. Innovative development of small metallurgical plants as a key direction of modernization of steelmaking in Ukraine. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr*. 2015. (12): 33–45. <https://doi.org/10.15407/visn2015.12.200>  
[Дубоделов В.И., Смирнов А.Н., Куберский С.В., Горюк М.С. Инновационное развитие малых металлургических заводов как ключевое направление модернизации сталеплавильного комплекса Украины. *Вісник НАН України*. 2015. № 12. С. 33–45.]
36. Gottardi R., Miani S., Partyka A. The Hot Metal Meets the Electric Arc Furnace Steelmaking Route. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2008. **53**(2): 517–522.
37. Timoshenko S.N., Stovpchenko A.P., Kostetski Yu.N., Gubinski M.V. Energy efficient solutions for EAF steel-making. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2018. **88**(1): 18–24. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.5867>
38. Timoshenko S.N. Computer modeling bath geometry to improve energy efficiency of electric arc furnace. *System technologies*. 2016. **3**: 33–39.
39. Timoshenko S., Smirnov A., Nemtsev E. Increasing energy efficiency of arc furnace with electromagnetic stirring. *Proc. 30<sup>th</sup> Anniversary Int. Conf. on Metallurgy and Materials*. 2021. P. 21–26. <https://doi.org/10.37904/metal.2021.4080>
40. Timoshenko S.N. Modeling the geometry of the steel-smelting bath and the hearth electrode of a DC arc furnace in order to improve its energy efficiency. *Visnik NTU "KhPP"*. 2017. **30**: 116–124.  
[Тимошенко С.Н. Моделирование геометрии сталеплавильной ванны и подового электрода дуговой печи постоянного тока с целью повышения ее энергоэффективности. *Вісник НТУ ХП. Сер. Математичне моделювання в техніці і технологіях*. 2017. Вип. 30. С. 116–124.]
41. Timoshenko S.N. Improving bath geometry as a way of increasing EAF thermal efficiency. *Scientific Papers of Donetsk National Technical University*. 2012. (1-2): 36–43.
42. Timoshenko S.N., Gubinsky M.V. Deep bath – the way to intensify heat and mass transfer processes and increase energy efficiency of the electric arc furnace. *Met. lit'e Ukr*. 2019. **27**(10-12): 8–17. <https://doi.org/10.15407/steel-cast2019.10.008>  
[Тимошенко С.М., Губинський М.В. Глибока ванна – шлях до інтенсифікації процесів тепломасообміну і підвищення енергоефективності дугової сталеплавильної печі. *Метал та лиття України*. 2019. Вип. 10-12. С. 8–17.]
43. Timoshenko S., Gubinskij M. Energy efficient solutions for electrodes pitch diameter of electric arc furnace. *Modern problems of metallurgy*. 2019. **22**: 104–113. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2019.01.11>  
[Тимошенко С.Н., Губинский М.В. Энергоэффективные решения диаметра распада электродов дуговой сталеплавильной печи. *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті*. 2019. Вип. 22. С. 104–113.]
44. Timoshenko S. Increasing energy efficiency of electric arc steelmaking furnace by improvement of aspiration system and recycling of melting dust. *Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: Electrical and Power Engineering*. 2021. (24): 14–24. <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2021-1-14-24>  
[Тимошенко С.М. Підвищення енергоефективності дугової сталеплавильної печі шляхом вдосконалення системи аспірації та рециклінгу плавильного пилу. *Наукові праці ДонНТУ. Сер. Електротехніка і енергетика*. 2021. № 24. С. 14–24.]

45. Doroshenko A.V., Timoshenko S.N., Tischenko P.I. Combined water-cooled roof for electric arc furnaces of small capacity. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*. 2017. (5): 91–95.  
[Дорошенко А.В., Тимошенко С.Н., Тищенко П.И. Комбинированный водоохлаждаемый свод дуговых электропечей малой вместимости. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017. № 5. С. 91–95.]
46. Smirnov O.M., Narivskiy A.V., Smirnov E.N., Verzilov A.P., Semenko A.Yu., Goryuk M.S. Development of a Two-Chamber MHD Tundish for Metal Casting. *Science and Innovation*. 2021. **17**(4): 19–24. <https://doi.org/10.15407/science17.04.019>
47. Dubodelov V., Smirnov O., Goryuk M., Pogorsky V., Seredenko V., Buryak V. Features of functioning of magnetodynamic tundish at continuous casting of steel. *Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Electromagnetic Processing of Materials EPM2015*. (October 12–16, 2015, Cannes, France). P. 625–628.

Oleksii M. Smirnov

*Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1173-976X>

Sergey M. Timoshenko

*Technical University “Metinvest Polytechnic” LLC, Mariupol, Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4221-9978>

Anatoliy V. Narivskiy

*Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1596-6401>

#### RENOVATION AND INNOVATIVE DEVELOPMENT OF STEEL PRODUCTION IN UKRAINE IN THE CONTEXT OF ENERGY EFFICIENCY AND GREEN DEAL

In the future recovery of the economy, an important role is assigned to the steelmaking complex. In the context of the Green Deal requirements to achieve carbon neutrality by 2050, the metallurgy of Ukraine has a unique opportunity not only to overcome the technical lag of the industry in terms of energy efficiency and environmental safety, but also to get rid of an inefficient technological structure with physically worn out and out-of-date, obsolete fixed assets. The solution lies in the transition to small metallurgical plants (SMP) and the strategy of minimizing economic and environmental costs. The industrial infrastructure of Ukraine needs the implementation of three groups of SMPs in order to use available iron ore resources, scrap metal and iron-containing waste as the initial charge. The production and remelting of metallized raw materials (DRI/HBI) in an electric arc furnace (EAF) as an alternative to the ecologically dirty technological route blast furnace – converter will supply the domestic market and exports with competitive sheet metal products of casting-rolling modules. Low-carbon at the first stage, the technology will allow in the medium term to reduce the specific emission of CO<sub>2</sub> by 1.45-2 times and will create a basis for the further transition to carbon-neutral hydrogen metallurgy. Two groups of SMPs, based on technological routes with arc and induction electric furnaces, should focus on the market of mass-demand steel and small batches of special steels, as well as provide foundry and forging production for the machine-building complex. In the context of new SMPs, the modernization of EAFs that are idle due to problems with sales markets, through the introduction of a “deep” bath, a system of distributed aspiration, water-cooled elements with reduced heat loss, optimization of the electrodes pitch diameter, is gaining relevance.

**Keywords:** small metallurgical plants, EAF, energy efficiency, carbon neutrality, metallized raw materials.

**Cite this article:** Smirnov O.M., Timoshenko S.M., Narivskiy A.V. Renovation and innovative development of steel production in Ukraine in the context of energy efficiency and Green Deal. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2023. (4): 21–38. <https://doi.org/10.15407/visn2023.04.021>