



МЕРКУЛОВ

Олексій Євгенович — доктор технічних наук, заступник директора з наукової роботи Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

ЧИ Є МІСЦЕ ДОМЕННІЙ ПЕЧІ В УМОВАХ ЄВРОПЕЙСЬКОГО ЗЕЛЕНОГО КУРСУ?

Автору неодноразово доводилося стикатися з критикою технології відновлення залізорудних матеріалів у доменних печах для отримання чавуну з подальшим його конвертуванням у сталь. Найчастіше її недоліками називають неекологічність, застарілість і як аргумент наводять необхідність ліквідації доменного виробництва в Україні. Причому про цю технологію висловлюються зі зневажливістю не лише представники громадськості, а й фахівці-металурги. З прийняттям курсу на декарбонізацію металургійного виробництва таке негативне ставлення лише посилюється. У статті зроблено спробу привернути увагу до унікальності й переваг доменної плавки, її ефективності, багатofункціональності та обґрунтувати доцільність збереження і розвитку цієї технології в умовах «зеленого» курсу.

Ключові слова: доменна піч, доменний процес, викиди CO₂, чавун, сталь.

Еволюція доменної плавки. Виникнення доменного виробництва відносять зазвичай до середини XIV ст. Цьому передувало майже 25-віковий період (з II тис. до н.е.) отримання заліза сиродутним способом (рис. 1), який можна вважати передісторією доменного виробництва. Розгорнутий опис сиродутного процесу наведено в багатотомному, добре ілюстрованому трактаті «Про метали» німецького вченого-енциклопедиста Георга Бауера (1494–1555). У XX ст. сутність цього процесу найбільш докладно викладено в працях Д.К. Чернова [1] і академіка О.О. Байкова [2].

З розвитком людської цивілізації зростання потреби в металах приводило до збільшення розмірів печей, зокрема й їх висоти. Зі збільшенням висоти зростала область помірних температур, де відбувається відновлення оксидів заліза газом. У результаті шлак збіднювався оксидами заліза, збільшувалася його температура і зменшувався окисний вплив на вуглець у металі, що сприяло зниженню температури плавлення металу й переходу від одержання твердої губчастої маси — криці до отримання рідкого металу.

Логіку цього переходу добре описано у Д.К. Чернова:

«Уявимо собі тепер, що розміри печі зростають, що кількість палаючого вугілля збільшується, що замість маленького міху

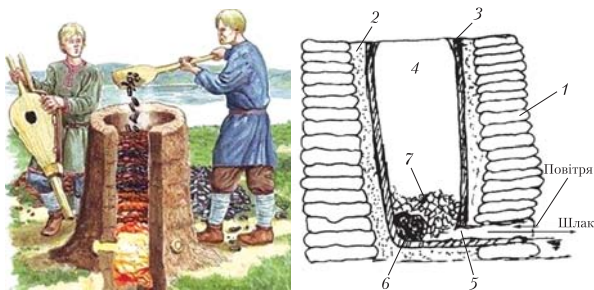


Рис. 1. Схема сиродутного горна (домниці): 1 — кам'яна кладка; 2 — ущільнений шар глини; 3 — обмазка з вогнетривкої глини; 4 — робочий простір горна; 5 — шлакова льотка; 6 — криця; 7 — зона горіння вугілля

працює великий, навіть кілька міхів, що область високої температури в поясі горіння значно розширюється. Уявимо, що ми маємо перед собою вже шахтну піч значної продуктивності, так звану «блауофен», і подивимося, що там відбуватиметься.

Газ вуглецевого окису, що піднімається вгору по шахті, так само як і в сиродутному горні, відновлює залізо з руди; але внаслідок розширення області високих температур відновлення заліза закінчується, коли воно ще далеко від поясу горіння. Просуваючись потім між розпеченим вугіллям у ділянку фурми, де відбувається остаточне зварювання залізної губки, залізо дотикається до вугілля під заслоною окису вуглецю, густо поширеного по всьому жаркому району, і встигає настільки обвуглецюватися з поверхні кусків, що деяка частина його перетворюється на чавун. І як більш легкоплавкий, ніж залізо, чавун оплавляється з поверхні залізних шматків при наближенні до фурми та стікає на под печі, решта ж маси заліза зварюється в загальну крицю. І дійсно, вже в більших штучних печах став утворюватися в невеликих кількостях чавун, який впливав з печі разом зі шлаками, які спускаються перед добуванням криці. В «блауофенах» це явище значно посилювалося; мало того, вже в цих печах можна було одержувати майже все залізо у вигляді чавуну — варто було лише відсунути фурму ближче до зовнішньої поверхні печі, зменшити рудну колошу й підсилити дуття. При переході до печей, які постійно дають чавун, «флософе-

нів» і «гохофенів», тобто до доменних печей, залишалось пройти виробленим досвідом шляхом, тобто ще більшим розширенням області високої температури біля фурм, звуженням горна, висуванням фурм назад до стінки печі, ще більшим зменшенням рудної колоші й подальшим посиленням дуття тепер уже забезпечувалося постійне одержання лише чавуну й шлаку, без шматків заліза, що не перейшло в чавун.

Економічний бік виробництва через це дуже багато вигравав. Тепер хід печі став безперервним; відпала потреба обмежувати завалку печі лише такою кількістю, яка відповідає найбільшій величині криці, яку можна добути з горна (як це було, наприклад, у штучних печах), і щоразу зупиняти піч для нового завантаження; обидва одержувані продукти — і чавун, і шлак — виливаються з печі, не потребуючи такої важкої праці кількох людей, як при виїманні криці.

Втрата теплоти, що розвивається горінням палива, доведена тепер до мінімуму. Якщо уявимо собі високу піч, а нині її можна зробити дуже високою, то побачимо, що продукти горіння, піднімаючись через шматки руди й вугілля, які лежать у шахті, можуть віддати їм майже всю свою теплоту, відновити наявне в руді залізо й вийти з печі вже дуже сильно охолодженими. Збільшуючи висоту печі, можна дійти до того, що віддача теплоти холодному матеріалу, який знову закидається, може бути доведена до повної досконалості. Незручність тут полягає насамперед у тому, що гази вже будуть не в змозі проходити так вільно через дуже високий і ущільнений стовп, і в такому разі потрібно значно збільшувати тиск дуття, а на це необхідно витратити більшу механічну силу, що й урівноважує вигоду від заощадження теплоти в печі» [1].

Перехід від домниць до більш високих доменних печей (від слова «дменіє» — дуття) міг відбутися лише в разі посилення повітродувних засобів. Приблизно з XIII ст. для руху міхів почали використовувати водяне колесо. У середині XVI ст. замість клинчастих міхів уже застосовували дерев'яні ящикові з поршнем. Збільшення інтенсивності горіння деревно-

го вугілля сприяло підвищенню температури горна. Тому поряд із залізною губкою, а потім замість неї, стали виплавляти рідке вуглецеве залізо.

Знадобилося кілька віків, щоб виробити підходи до перероблення чавуну в кричних горнах і з'ясувати, що одержання рідкого вуглецевого металу в домниціх і окисне перероблення його в горнах вигідніше, ніж сиродутний процес, як щодо продуктивності, так і щодо добування заліза й витрат вугілля, тому не можна чітко сказати, в якому саме столітті виникло доменне виробництво. Джон Персі писав, що «наприкінці XII або на початку XIII ст. відбулося ключове для залізної справи відкриття — це відкриття чавуну». Найбільш давнім свідченням виробництва чавуну в Англії вважають чавунну дошку XIV ст. Перші чавунні гармати в Британії з'явилися в середині XVI ст. Академіки М.О. Павлов і О.О. Байков відносять виникнення доменного виробництва до XIII ст., відомий історик металургії Л. Бек — до XV ст.; в американській літературі появу доменного виробництва пов'язують з другою половиною XIV ст.

Переломним моментом у розвитку доменного виробництва стало застосування коксу замість деревного вугілля. Необхідність такої заміни була спричинена зростанням потреби в металі в період розвитку промислового капіталізму, а також виснаженням лісових ресурсів у країнах Західної Європи, насамперед у Британії, яка тоді за промисловим розвитком залишила інші країни далеко позаду.

Заміна деревного вугілля на кокс потребувала переходу на більш основні шлаки для отримання металу з меншим вмістом сірки, необхідність чого було встановлено емпірично в результаті довготривалих пошуків. Газопроникність стовпа плавильних матеріалів у доменних печах з використанням коксу значно погіршилася, а тому знадобилося підсилити повітродувні засоби. Тільки після того, як у металургії почали застосовувати парові повітродувні машини Джеймса Ватта (1775—1776), доменне виробництво на коксі почало розширюватися в Англії.

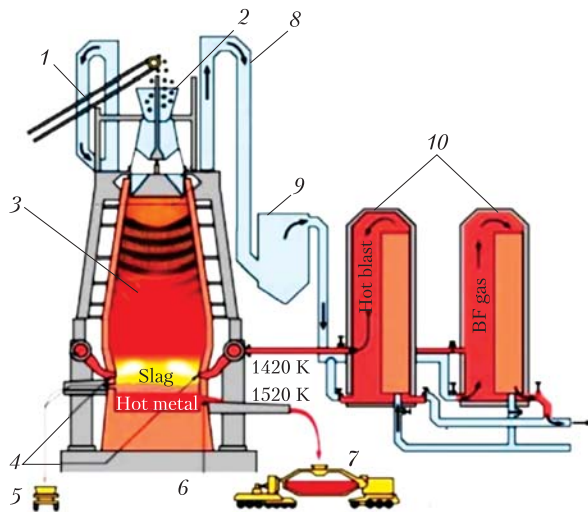


Рис. 2. Схема сучасної доменної печі: 1 — скіповий підйомник (конвеєр); 2 — завантажувальний пристрій; 3 — шахта печі; 4 — фурма для дуття; 5 — шлаковоз; 6 — чавунна льотка; 7 — чавуновоз; 8 — система газовідведення; 9 — система газоочищення; 10 — повітрянагрівачі

Отже, опанування плавки чавуну на коксі тривало близько двох століть: слід було переконатися в непридатності сирого кам'яного вугілля для виплавки чавуну, освоїти виробництво міцного коксу, визначити види коксівного кам'яного вугілля і розробити способи коксування, винайти методи видалення сірки з металу в шлак і, нарешті, замінити водяні повітродувні машини на більш потужні парові.

У подальшому важливими віхами розвитку доменного виробництва стали такі впровадження, як нагрівання дуття, вдування вугілля і природного газу у фурми печей, винахід засипного апарату «воронка-конус» тощо. Основні ознаки сучасної доменної плавки сформувалися до кінця XIX ст. До цього часу в більшості розвинених країн завершився перехід на мінеральне паливо — кокс, а конструкція доменної печі набула форми, яка принципово не відрізнялася від нинішньої (рис. 2).

Розвиток доменної плавки протягом XX ст. привів до зростання об'єму печей до 5500—6000 м³, збільшення в 3—4 рази їх питомої продуктивності, скорочення в 2—3 рази питомої витрати коксу. Впровадження нових заходів із

вдосконалення процесу дозволило поліпшити його показники і досягти питомої продуктивності 3,5–4,0 т/м³ на добу та витрат коксу 250–300 кг/т чавуну, що наближається до граничних можливостей доменної плавки за умови газопроникності найбільш напруженої зони печі — зони фільтрації рідких продуктів плавки крізь кокс [3].

Більшість еволюційного шляху доменної плавки вже пройдено, і подальше вдосконалення процесів (як, до речі, це буває і в усіх інших складних технічних системах) нашоується на дедалі зростаючі труднощі, природу яких можна описати як окремих випадок знаменитого принципу Окермана—Павлова [4]: «Будь-яка причина, що зменшує витрати тепла в доменній плавці, дає тим більше заощадження палива, чим меншим був коефіцієнт корисної дії тепла в доменній печі». Уповільнення темпів поліпшення показників плавки зумовлене зменшенням ефективності, що припадає на одиницю витрат ресурсів, у міру того, як вдосконалюються процеси доменної плавки. Для порівняння ефективності теплової роботи доменної печі в табл. 1 наведено коефіцієнти корисної дії деяких агрегатів.

Доменна плавка — одна з небагатьох промислових технологій, включно з процесами й агрегатами, що попри всі технічні революції зберегла свою сутність і значущість. Цей феномен заслуговує на особливий розгляд з позицій його специфіки та системних властивостей, що забезпечують його стійкість у динамічному промисловому середовищі.

Протитечійний принцип технології, реалізуваної в закритому агрегаті шахтного типу, дозволяє забезпечити максимальну утилізацію

підведеної енергії в основній системі й простоту використання відведених продуктів.

Завдяки наявності в нижній частині доменної печі коксової насадки ця технологія має унікальну, характерну лише для неї, особливість: поєднання в одному агрегаті трьох фазових станів шихти (твердого, рідкого й розм'якшеного), що перебуває в протитечії з газом. Якби постало завдання розробити подібну технологію, воно могло б видатися технічно нереалістичним, але ж доменна плавка існує. Причому процес доменної плавки в сучасних агрегатах характеризується високою стійкістю при довгочасно безперервному режимі роботи, що було досягнуто в результаті тривалого еволюційного розвитку, під час якого закріплювалися і вдосконалювалися переваги шахтної протитечії. Наприклад, відома двоступінчаста схема теплообміну в доменній печі [10] забезпечує гнучкість технології в разі змінення режимів і стійкість процесів до зовнішніх впливів завдяки наявності «резервної зони», яка «пом'якшує» теплові відхилення. Це властиво також процесам відновлення оксидів, формування коксової насадки, змінення агрегатного стану матеріалів тощо.

Отже, доменну плавку можна порівняти з технічним «організмом», у якому явища різної фізичної природи поєднані спільними цілями функціонування. І цей «організм» характеризується неадитивністю, тобто до властивостей його складових частин, як правило, додаються системні властивості, притаманні організму в цілому і сформовані в ході еволюції.

Саме тому спроби підвищити ефективність одержання металу «розчленуванням» агрегату на більш прості частини — твердофазну (шахту), рідкофазну (горно) — з метою отримати вигоду в паливовикористанні не дають позитивних результатів. Досягнення очікуваних переваг породжує нові проблеми, вирішення яких потребує додаткових витрат, що зводить нанівець усі докладені зусилля.

Твердофазне відновлення в шахтній печі призначене для одержання високоякісної сталі з чистих руд. Через це обсяг виробництва такого металу регламентований, а витрати енергії

Таблиця 1. Коефіцієнти корисної дії деяких агрегатів

Агрегат	ККД, %
Теплова електростанція [5]	45
Двигун внутрішнього згоряння [6]	40
Сонячна панель [7]	31,8
Дугова сталеплавильна піч [8]	60
Доменна піч [9]	85

перевищують аналогічну величину в масовій металургії внаслідок використання електроенергії, отримання якої потребує в 3–4 рази більших витрат первинного палива. Необхідність захисту металізованого продукту від окиснення звужує сферу його використання.

Процес рідкофазного відновлення передбачає повну заміну коксу й підготовленої залізородної сировини некоксівним вугіллем та низькосортною сировиною. Однак витрати первинної енергії в разі рідкофазного відновлення (включно з енергією, необхідною для виробництва кисню) перевищують величину енергії в традиційному агло-кокс-доменному процесі сучасного технічного рівня [11]. Це зумовлено тим, що з технології рідкофазного відновлення виключено найбільш досконалий спосіб теплозасвоєння — шахтну протитечію. Викид же гарячих газів (1500–1800 °С) за межі технологічного процесу нічим не компенсується, а утилізація цього тепла можлива лише на рівні вторинних ресурсів за значно меншого, ніж у доменній печі, ККД. До того ж у процесі рідкофазного відновлення ступінь вилучення заліза в чавун є меншим, ніж у доменній плавці, а супутні важковідновлювані елементи практично повністю переходять у шлак.

Отже, автономні агрегати, які по суті є фрагментами доменної печі, не мають переваг у виробництві масового металу. Енергетичні, екологічні, економічні характеристики та інтегральні оцінки малококсівної доменної плавки перевершують характеристики всіх відомих способів прямого одержання заліза. До них наближається лише COREX-процес, у якому збережено основні переваги доменної плавки.

Зважаючи на зазначені вище причини, доменна піч залишається визначальним технологічним модулем чорної металургії, розвиток якого визначає стан усього металургійного комплексу. Подальша еволюція доменної плавки пов'язана з переходом на безкоксівне одержання металу з повною заміною коксу. Такий розвиток доменної плавки в разі раціонального і некон'юнктурного підходу настільки зміцнює її позиції в металургії, що в осяжній перспективі альтернатив їй не проглядається.

Характеристика продуктів доменної плавки. Найбільша у світі доменна піч (BF — blast furnace) виробляє за добу близько 15 000 т чавуну, 5000 т шлаку і 22 млн м³ доменного газу з теплою згоряння 4,5 МДж/м³. Більша частина рідкого чавуну конвертується в сталь із використанням базової кисневої печі (BOF — basic oxygen furnace), решта розливається в чушки. Шлак переробляють на будівельну продукцію: гранульований шлак (граншлак), щебінь, пемзу, мінеральну вату, литво, бруківку, високоглиноземистий щебінь та ін. Газ, який виходить з доменної печі, має тиск від 0,16 до 0,4 МПа й температуру від 120 до 250 °С, і зазвичай енергія доменного газу втрачається при зменшенні тиску в мембранному клапані. Одним зі способів використання енергії доменного газу є встановлення газової утилізаційної безкомпресорної турбіни (ГУБТ), або турбодетандерної установки. Блок ГУБТ найчастіше встановлюють у нижній частині газоочисного обладнання печі. Застосування ГУБТ — це базове енергоощадне рішення для доменної печі. Використовуючи енергію тиску відпрацьованого газу, установка може виробляти електроенергії до 80 кВт·год/1000 м³ доменного газу. Обсяг виробленої електричної енергії може становити близько 30 % загальних електроенергетичних потреб для роботи всього обладнання доменної печі. Доменний газ, що виходить із ГУБТ, можна також використовувати як паливо на металургійному заводі.

Багатофункціональність доменної плавки. Вдосконалення технології доменної плавки й поліпшення конструкції агрегату (доменної печі) завжди було спрямоване на підвищення ефективності виплавки чавуну масового призначення. Інші функції були супутніми і, як правило, не впливали на цільові завдання виробництва. Проте здавна в доменних печах успішно виплавляють феросплави [12–15] і високоглиноземистий шлак для одержання цементу, а виробництво опалювального (доменного) газу пов'язує всю енергетику металургійного підприємства в єдиний комплекс, у центрі якого — доменне виробництво. Тому

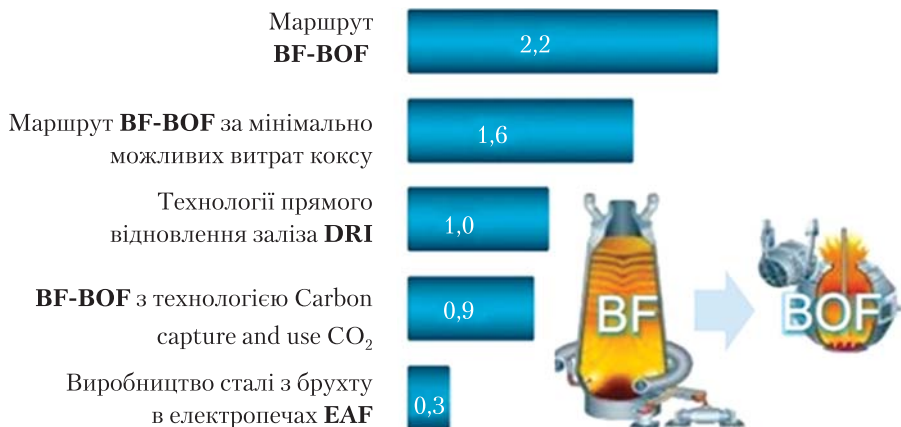


Рис. 3. Порівняння різних технологій за рівнем викидів вуглекислого газу; питомі прямі й непрямі викиди наведено в т CO₂/1 т сталі [22]

технологію доменної плавки та конструкцію кожної доменної печі адаптовано до виконання ще й супутніх завдань, крім її головної функції – одержання переробного й ливарного чавуну, а також до досягнення деяких інших металургійних цілей.

Доменна плавка за будь-яких цільових завдань супроводжується виробництвом газоподібного палива – доменного газу, а тому доменна піч є найважливішим енергетичним агрегатом металургійного комплексу. Характерно, що розвиток металургійної функції йде шляхом скорочення витрат палива та підвищення ступеня його використання в печі, відповідно, зменшуються обсяги і теплотворність доменного газу. При цьому вбачається, що розвиток енергетичної функції відбуватиметься за такими двома напрямками:

1) автономізація технології виробництва відновлюваного й опалювального газів, що до-

сягається переведенням окремих доменних печей у режим газогенераторів на основі некоксівних видів вугілля [16];

2) організація у доменних печах виробництва феросплавів і спеціальних шлаків, за якого енергетична складова технології зростає завдяки збільшенню теплотворності й кількості газу на одиницю сплаву.

Однією із супутніх функцій доменної плавки є утилізація твердих відходів [17], перетворення яких у доменній печі є більш глибоким, ніж в інших агрегатах: оксиди переходять у метал і шлак, а вуглець і вуглецевмісні компоненти – в газ, причому фільтрація газу через стовп шихти може бути керованою щодо поглинання низки компонентів, зокрема й шкідливих речовин. Ефективність утилізації найбільшою мірою залежить від підготовки відходів. Залізо- і вуглецевмісні відходи металургії легко утилізуються їх безпосереднім додаванням до агломераційної шихти. Цей шлях утилізації можна реалізувати й для відходів інших виробництв, а також для побутових відходів в разі їх відповідної підготовки. Деякі відходи в подрібненому стані можна використовувати разом із пиловугільним паливом. Дозування відходів при подачі в шихту залежить від особливостей їх підготовки та вмісту різних речовин, насамперед шкідливих. Наприклад, навряд чи можна орієнтувати технологію плавки тільки на утилізацію твердих побутових відходів, проте подача їх невеликими партіями в доменну

Таблиця 2. Вплив різних паливних добавок до дуття доменної плавки на емісію CO₂ (PCI – пиловугільне паливо; NG – природний газ; COG – коксовий газ; H₂ – водень)

PCI 250 кг/т	NG 160 кг/т	COG 130 кг/т	H ₂ 45 кг/т
-11 %	-15 %	-15 %	-30 %
<i>З урахуванням попереднього нагрівання паливних добавок</i>			
-44 %	-40 %	-32 %	-31 %

під, яка працює в режимі газифікації вугілля, цілком реальна в разі належного опрацювання методу підготовки та вивчення поведінки компонентів в умовах печі.

Загалом конкретні варіанти технології доменної плавки містять, як правило, всі три функції – металургійну, енергетичну та екологічну, але різняться їхніми пріоритетами [18].

Доменна піч як джерело утворення CO₂. У структурі глобальних викидів CO₂ частка металургії становить 6 % і поступається енергетиці (39 %), транспорту (23 %) і домашнім господарствам (9 %) [19]. У доменному виробництві чавуну утворюється 1,3 т CO₂ на 1 т сталі. На другому місці за рівнем викидів вуглекислого газу стоїть коксохімічний завод (0,3 т CO₂ на 1 т рідкої сталі). Викиди CO₂ коксохімічного заводу пов'язані з високотемпературним нагріванням коксівного вугілля, яке на 100 % складається з вуглецю. На третьому місці за викидами CO₂ – фабрики агломерації й огрудування (0,2 т CO₂ на 1 т рідкої сталі) [20].

У табл. 2 наведено дані [21], що ілюструють ефективність застосування різних паливних добавок до дуття доменної плавки з урахуванням їх максимальної засвоюваної кількості на викиди CO₂.

Порівнюючи різні промислові технології одержання сталі за рівнем викидів CO₂ (рис. 3), можна дійти висновку, що технологічний маршрут доменна піч – кисневий конвертер (BF-BOF) має значний резерв щодо зменшення викидів вуглекислого газу до значень, зіставних з рівнем викидів у технологіях прямого відновлення заліза, що дозволяють отримувати альтернативну металобрухту сировину для електродугових печей: металізовані окатиші (Direct Reduced Iron – DRI) і гарячебрикетоване залізо (Hot Briquetted Iron – HBI).

Процес уловлювання й утилізації CO₂, що міститься в доменному газі (Carbon capture and use – CCU), передбачає, що вуглекислий газ не просто утримується в спеціальних сховищах, а використовується в інших виробничих процесах (наприклад, у виробництві метану або полімерів). Отже, перевага технологій

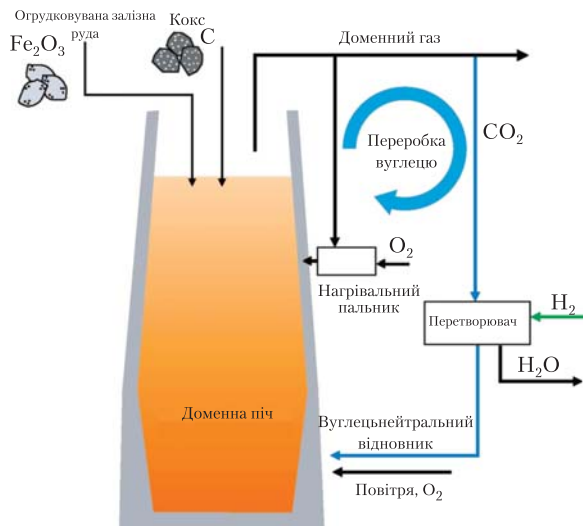


Рис. 4. Схема доменного процесу з використанням технології рециркуляції вуглецю

CCU полягає в підвищенні економічної доцільності вловлювання CO₂.

На рис. 4 наведено концептуальну схему доменного процесу з використанням технології рециркуляції вуглецю [23]. Перевагою такого підходу є те, що процес не призводить до збільшення викидів CO₂, оскільки вуглець, утворений з відновника, не викидається за межі системи, а повторно застосовується у виробництві. Витрати коксу для одержання 1 т чавуну зменшуються завдяки вдунню синтезованого з CO₂ вуглецьнейтрального відновника у фурми доменної печі, аналогічно пилоподібному вугіллю, яке вже давно використовують у доменних печах.

З можливих відновників, синтезованих з CO₂, було обрано метан (CH₄), технологію синтезу якого з CO₂ і H₂, відому під назвою «метанування», відкрив на початку ХХ ст. Поль Сабатьє. Як видно з рівняння цієї хімічної реакції

$$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + 165 \text{ кДж/моль},$$

вона є екзотермічною і супроводжується порівняно значним виділенням тепла. З 2013 р. в компанії Etogas Power [24] працює промислова установка метанування, що використовує CO₂, виділений з біогазу, і водень, отриманий електролізом води.

Є також промисловий досвід рециркуляції очищеного від CO_2 і H_2O підігрітого доменного газу з киснем для спалювання коксу [25]. Очищення відбувається за допомогою моноетаноламіну та інших реагентів. Економія коксу при цьому становить 25 %, а підвищення продуктивності — 11 %. Пізніше випробування нової технології та вивчення параметрів плавки було проведено на експериментальній доменній печі LKAB [26, 27].

Чи не ставимо ми віз поперед коня? Неважливо, чия точка зору в суперечці щодо фактора найбільшого впливу на зміну клімату — чи то промислова діяльність людини, чи то прецесія земної осі — виявиться в підсумку істиною, але очевидно, що «зелений» енергетичний перехід необхідний, і він приведе до повної структурної трансформації економіки. Ці зміни стосуються й металургії, яка відіграє ключову роль у процесі декарбонізації. Для «зеленого» переходу потрібна «зелена» сталь, або, інакше кажучи, металургія потребує декарбонізації, але й декарбонізація інших галузей залежить від металургії. Згідно з даними ArcelorMittal, будівництво 1 МВт потужностей сонячної електростанції вимагає від 35 до 45 т сталі, вітрової електростанції — від 120 до 180 т [28]. Тому декарбонізація галузей енергетики й транспорту, як основних джерел викидів CO_2 , має відбуватися паралельно з декарбонізацією металургії, щоб забезпечити можливість руху в одному напрямку. Тим більше, що технології виробництва сталі з низькими викидами CO_2 так і не набули поширення, оскільки вони потребують вищих виробничих витрат. Так, порівняно з традиційним маршрутом доменна піч—конвертер (BF-BOF) виробництво тонни сталі за низьковуглецевими технологіями буде на 80 % дорожчим [29]. Ця обставина також свідчить на користь збереження й модернізації технологічного маршруту BF-BOF як мінімум доти, доки викиди CO_2 в енергетиці й на транспорті не зменшаться до зіставних з металургією значень.

Використання раціонального і системного підходу можна продемонструвати на прикладі металургії Японії. За даними на 2021 р., Япо-

нія, яка не має власного видобутку руди, вугілля й газу, посідає 3-тє місце у світі з виплавки сталі (96,3 млн т), отриманої переважно за маршрутом BF-BOF [30]. Більшу частину ресурсів для виплавки чавуну Японія імпортує з Австралії (28-ме місце у світовому рейтингу виробників сталі з показником 5,8 млн т). При цьому в стратегії розвитку найбільшої металургійної корпорації Японії Nippon Steel [31] немає планів відмовитися від маршруту BF-BOF, на відміну від, наприклад, української металургійної компанії Metinvest [32]. Навпаки, Японська федерація чавуну й сталі [33] просуває таку думку: незважаючи на те, що у виробництві сталі доменна піч (BF) для відновлення залізної руди справляє сильніший вплив на навколишнє середовище, ніж метод плавки сталевого брухту в електродуговій печі (EAF), маршрут BF-BOF створює сталеву продукцію, в результаті експлуатації якої утворюється брухт, переробка якого в кінцевому підсумку приводить до загального скорочення викидів CO_2 . Оскільки ефект переробки металобрухту компенсує викиди CO_2 у процесі BF-BOF, сукупний вплив маршрутів BF-BOF і EAF на навколишнє середовище є таким самим, як і в разі багаторазової переробки сталі [31]. Цей підхід відображено в японському стандарті JIS Q 20915 «Life cycle inventory of steel products».

Висновки. Розглядаючи доменну плавку в широкому діапазоні її функціональних можливостей, слід характеризувати цей модуль як універсальну технологію, в якій домінування окремих функцій задається вимогами до продуктів і залежить від шихтових, дуттєвих та інших умов. Отже, доменна плавка, як багатфункціональна технологія, може бути орієнтованою на режими, в яких домінує одна з функцій: металургійна, енергетична чи екологічна. Перша з них передбачає виробництво металу й шлаку заданих складів і властивостей. У цій функції домінує виплавка переробного чавуну. Енергетична функція означає, що доменна піч працює як газовиробний апарат і є потужним газогенератором з рідким шлаковидаленням. Екологічна функція полягає в утилізації від-

ходів, зокрема й тих, що містять марганець, титан, хром, ванадій, рідкісноземельні метали і кількість яких нині не контролюється. Така утилізація може бути перетворена на керований процес з максимальним добуванням корисних компонентів.

Часто можна почути, що використання доменного процесу критикують через його застарілість, проте подібні закиди є безпідставними і ґрунтуються лише на анахронічності сприйняття доменної плавки без урахування її багатofункціональності й ефективності. Наявна в Україні структура первинного одержання металу за маршрутом BF-BOF сформувалася в процесі промислової еволюції й зумовлена високими позиціями у світі за розвіданими запасами залізної руди (18 %), загальними запасами марганцевої руди (12 %), доведеними запасами вугілля (3,8 %), а також розвинутою

транспортною мережею (залізниця, порти) та промисловою й науковою спадщиною УРСР. Зазначені фактори визначають основну схему виробництва сталі для умов України: видобуток руди — виплавка чавуну в доменній печі (BF) — переробка чавуну в сталь у кисневому конвертері (BOF). Це становить основу промислової незалежності України, яка при цьому, безперечно, має доповнюватися розвитком нових технологій, спрямованих на ресурсо- і енергоощадність поточної структури металургійного виробництва.

Автор присвячує цю статтю пам'яті доктора технічних наук, професора Йосипа Григоровича Товаровського, який, на жаль, пішов у засвіти в 2020 р. В основу публікації покладено сформульовані ним принципи пізнання та еволюції доменної плавки.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

- Chernov D.K. About direct production of ingot iron and steel in the blast furnace. In: *D.K. Chernov i nauka o metallakh [D.K. Chernov and Science of Metals]*. Leningrad, Moscow, 1950. P. 307–327 (in Russian).
[Чернов Д.К. О прямом получении литого железа и стали в доменной печи. В кн.: *Д.К. Чернов и наука о металлах*. Ленинград, Москва, 1950. С. 307–327.]
- Baikov A.A. *Izbrannyye trudy [Selected works]*. Moscow, 1961. P. 6–9 (in Russian).
[Байков А.А. *Избранные труды*. Москва, 1961. С. 6–9.]
- Yusfin Yu.S., Chernousov P.I., Travyanov A.Ya. Determination of the minimum possible coke consumption for blast-furnace smelting. *Metallurgist*. 1998. **42**(4): 124–128. <https://doi.org/10.1007/BF02765163>
- Pavlov M.A. *Metallurgiya chuguna [Metallurgy of cast iron]*. Part 2. *Domennyy protsess [Blast Furnace Process]*. Moscow, 1949 (in Russian).
[Павлов М.А. *Металлургия чугуна*. Ч. 2. *Доменный процесс*. Москва: Металлургиздат, 1949.]
- Global CCS Institute. Efficiency in Thermal Power Generation, Energy efficiency technologies: overview report. 1 March 2014. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/energy-efficiency-technologies-overview-report/>
- Dahham R.Y., Wei H., Pan J. Improving Thermal Efficiency of Internal Combustion Engines: Recent Progress and Remaining Challenges. *Energies*. 2022. **15**(17): 6222. <https://doi.org/10.3390/en15176222>
- LONGi announces the new efficiency of 31.8% for perovskite/crystalline silicon tandem solar cells based on commercial CZ silicon wafers. 26.05.2023. <https://www.longi.com/en/news/new-efficiency-of-solar-cells/>
- Lee B., Sohn I. Review of innovative energy savings technology for the electric arc furnace. *JOM*. 2014. **66**: 1581–1594. <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1092-y>
- Tovarovskiy I.G. *Poznaniye protsessov i razvitiye tekhnologii domennoy plavki [Knowledge of processes and development of blast furnace smelting technology]*. Dnepropetrovsk, 2015 (in Russian).
[Товаровский И.Г. *Познание процессов и развитие технологии доменной плавки*. Днепропетровск: Журфонд, 2015.]
- Kitayev B., Yaroshenko Y., Lazarev B. *Teploobmen v domennoy pechi [Heat transfer in blast furnace]*. Moscow, 1966 (in Russian).
[Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.Л. *Теплообмен в доменной печи*. Москва: Металлургия, 1966.]

11. Tovarovskiy I.G. Comparison of fuel consumption in blast furnace smelting and Romelt liquid-phase reduction process. *Steel in Translation*. 1998. **28**(12): 6–13.
12. Babanakov V.V., Pavlov V.V., Zaitsev V.A. et al. Smelting of blast furnace ferromanganese in conditions of JSC “Nosta”. In: *Proceedings of the V Congress of Blast Furnace specialists*. Dnepropetrovsk, 1999. P. 322–326 (in Russian). [Бабанаків В.В., Павлов В.В., Зайцев В.А. і др. Выплавка доменного ферромарганца в умовах ОАО «Носта». В кн.: *Труды V конгресса доменщиков*. Днепропетровск: Пороги, 1999. С. 322–326.]
13. Babanakov V.V., Borodulin A.V., Shkurko E.F. et al. Ural manganese: past, present and future. In: *Teplofizika i informatika v metallurgii: dostizheniya i problemy* [*Thermophysics and Informatics in Metallurgy: Achievements and Problems*]. Ekaterinburg, 2000. P. 83–89 (in Russian). [Бабанаків В.В., Бородулін А.В., Шкурко Е.Ф. і др. Уральський марганец: минуле, нинішнє і майбутнє. В кн.: *Теплофізика і інформатика в металургії: досягнення і проблеми*. Екатеринбург, 2000. С. 83–89.]
14. Mikhailov V.V. Smelting of ferrochrome in a blast furnace on oxygen blast. *Kislород*. 1945. (1): 16–25 (in Russian). [Михайлов В.В. Выплавка феррохрома в доменной печи на кислородном дутье. *Кислород*. 1945. № 1. С. 16–25.]
15. Gaidukov G.V., Lukashenko M.H. Blast-furnace ferrochrome from slags of mine furnaces smelting low-carbon ferrochrome by fluxless method. *Steel in Translation*. 1943. (9-10): 3–7. [Гайдуков Г.В., Лукашенко М.Х. Доменный феррохром из шлаков шахтных печей, выплавляющих малоуглеродистый феррохром бесфлюсовым методом. *Сталь*. 1943. № 9-10. С. 3–7.]
16. Tovarovskiy I., Merkulov A. Domennaya plavka s vduvaniem produktov gazifikatsii ugley [*Blast furnace smelting with blowing of coal gasification products*]. Kyiv: Naukova Dumka, 2016 (in Russian). [Товаровский И.Г., Меркулов А.Е. *Доменная плавка с вдуванием продуктов газификации углей*. Киев: Наукова думка, 2016.]
17. Chernousov P.I. Retsikling. Tekhnologii pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrazovaniy i otkhodov v chernoy metallurgii [*Recycling. Technologies of processing and utilization of technogenic formations and wastes in ferrous metallurgy*]. Moscow, 2011 (in Russian). [Черноусов П.И. *Рециклинг. Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов в черной металлургии*. Москва, 2011.]
18. Merkulov O. Multifunctional blast furnace technology. In: *Poznaniye protsessov i razvitiye tekhnologii domennoy plavki* [*Process knowledge and development of blast furnace technology*]. Dnipro, 2016. P. 27–42 (in Russian). [Меркулов А. Многофункциональная технология доменной плавки. В кн.: *Познание процессов и развитие технологии доменной плавки*. Дніпро: Журфонд, 2016. С. 27–42.]
19. Global Energy Transitions Stocktake. IEA50. <https://www.iea.org/topics/global-energy-transitions-stocktake>
20. Cavaliere P. *Ironmaking and Steelmaking Processes*. Springer Cham, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39529-6>
21. Chaika O., Kornilov B., Alter M. et al. Analysis of new and existing technologies for reducing carbon dioxide emissions based on the energy balance of blast furnaces. In: *METEC & 6th ESTAD 2023 Conf.* (12–16 June 2023, Düsseldorf, Germany).
22. Decarbonization of the steel industry: the challenge for the coming decades. Kyiv, 2021. https://gmk.center/wp-content/uploads/2021/07/Decarbonisation-rus_2021.pdf [Декарбонізація сталельної галузі: виклики на найближчі десятиліття. Київ, 2021.]
23. Kawashiri Y., Nouchi T., Kashihara Y. Reduction of CO₂ Emissions from Blast Furnace with Carbon Recycling Methane. *JFE Technical Report*. 2022. No. 28. P. 1–7. <https://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/028/pdf/028-03.pdf>
24. EtoGas Power-to-Gas. <https://www.hz-inova.com/renewable-gas/etogas/>
25. Pukhov A., Stepin G., Tseytlin M. et al. Mastering of blast furnace smelting technology with hot reducing gases injection. *Steel in Translation*. 1991. (8): 7–13. [Пухов А.П., Степин Г.М., Цейтлин М.А. и др. Освоение технологии доменной плавки с вдуванием горячих восстановительных газов. *Сталь*. 1991. № 8. С. 7–13.]
26. van der Stel J. et al. Developments and evaluation of the ULCOS Blast furnace process at LKAB Experimental BF in Luleå. In: *Scrap Substitutes and Alternative Ironmaking V. Conf.* (November 2-4, 2008, Baltimore, USA).
27. Danloy G. et al. ULCOS – Pilot testing of the Low CO₂ Blast Furnace Process at the Experiment BF in Lulea. *Metallurgical Research & Technology*. 2009. **106**(1): 1–8. <https://doi.org/10.1051/metal/2009008>
28. Steel is the power behind renewable energy. <https://corporate-cm-uat.arcelormittal.com/media/case-studies/steel-is-the-power-behind-renewable-energy>

29. Simplified levelised cost of competing low-carbon technologies in steel production. IEA, Paris. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/simplified-levelised-cost-of-competing-low-carbon-technologies-in-steel-production>
30. World Steel in Figures 2021. <https://worldsteel.org/world-steel-in-figures-2021/>
31. Nippon Steel Corporation integrated report 2021. https://www.nipponsteel.com/en/ir/library/pdf/nsc_en_ir_2021_a3.pdf
32. Business and life during the war with Yuriy Ryzhenkov. https://youtu.be/s_YeZUFO5jg?si=YVjltDCvfRyC9teY
[Бізнес та життя під час війни з Юрієм Риженковим.]
33. Isohara T. CRÈME Webinar on “Carbon Footprint of Steel Products”. *The Japan Iron and Steel Federation*. 2021.

Oleksii Ye. Merkulov

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7867-0659>

DOES A BLAST FURNACE HAVE A RIGHT TO EXIST UNDER THE EUROPEAN GREEN DEAL?

The author has repeatedly had to face criticism of the technology of iron ore materials reduction in blast furnaces to produce pig iron with its subsequent conversion into steel. There are reproaches against it on the subject of environmental unfriendliness, prehistoric technology and the need to liquidate blast furnace manufacturing in Ukraine. Moreover, contempt is shown not only by common people, but also by metallurgical specialists, and with the adoption of the course for decarbonization of metallurgical production this negative attitude has only increased. The publication of this article is an attempt to draw attention to the uniqueness of blast furnace smelting, its efficiency, multifunctionality, as well as the need for its preservation and development under the European Green Deal.

Keywords: blast furnace, blast furnace process, CO₂ emissions, pig iron, steel.

Cite this article: Merkulov O.Ye. Does a blast furnace have a right to exist under the European Green Deal? *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2024. (4): 69–79. <https://doi.org/10.15407/visn2024.04.069>