

КОМПЛЕКСНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ЧОРНИХ МЕТАЛІВ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПЛАЗМИ

Плотніков В.В.	канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8791-874X , e-mail: plotnikov_vv@knu.edu.ua ;
Бабасєвська О.В.	ст. викладач, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6097-6449 , e-mail: babaevska_ua@knu.edu.ua ;
Савельєв С.Г.	д-р техн. наук, професор, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6263-9422 , e-mail: saveliev_sg@knu.edu.ua ;
Бабошко Д.Ю.	канд. техн. наук, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3551-8785 , e-mail: baboshko_dyu@knu.edu.ua ;
Чубенко В.А.	канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3356-0285 , e-mail: chubenko_va@knu.edu.ua

Запропоновано концепцію інноваційного металургійного підприємства, що ґрунтується на низці ключових принципів. Вуглець, що міститься у вугіллі, розглядається переважно як основний відновник для відновлення залізовмісних оксидів. Діоксид вуглецю використовується для газифікації вугілля. Відпрацьовані гази спрямовуються на генерацію електроенергії, яка забезпечує потреби сталеплавильного виробництва, включаючи процеси її розливання та формування. Для підтримання необхідного температурного режиму, що забезпечує ефективне відновлення заліза, застосовується низькотемпературна плазма. Основні технологічні етапи роботи такого інтегрованого заводу – газифікація вугілля, остаточне відновлення залізних оксидів, насичення заліза вуглецем, а також утворення шлаку та чавуну – реалізуються в межах одного пристрою, яким є плазмохімічний плавильний реактор. Продукти газифікації, що утворюються в реакторі, характеризуються високою температурою та сильними відновними властивостями, завдяки чому використовуються для нагріву й металізації окатишів. Виробництво сталі з гарячих металізованих окатишів і чавуну здійснюється в електродуговій печі з використанням електроенергії, отриманої з відпрацьованих після металізації газів, які мають високу температуру та незначний відновлювальний потенціал. Розливання і формування здійснюються за технологією, що виключає проміжне складування заготовок. Кінцевим продуктом такого виробництва є формований метал високої якості, яку неможливо забезпечити при виплавці конвертерним способом. Це приводить до економного споживання енергії та зменшення тривалості робочого циклу. Пропонований інтегрований завод чорної металургії характеризується раціональною схемою використання тепла з мінімізацією його втрат від охолодження агрегатів. Система виділення діоксиду вуглецю та його подальшого використання є найбільш раціональним використанням вуглецю, оскільки, на відміну від традиційних схем, в яких CO_2 викидається в атмосферу, в даному випадку він використовується для підвищення вмісту вуглецю в технологічному процесі. Така концепція відповідає сучасним тенденціям світового виробництва сталі.

Ключові слова: вуглець, газифікація, низькотемпературна плазма, металізація, плазмохімічний реактор, електродугова піч, електроенергія.

Постановка проблеми

Одним із основних моментів, що стимулює у наш час розвиток різноманітних способів металургії заліза, є різке скорочення запасів або повна відсутність у різних регіонах світу коксівного вугілля (точніше вугілля, з якого різними способами можна отримати металургійний кокс). Доменне виробництво не може існувати без використання коксу. Таким чином, у регіонах, що позбавлені можливості отримувати кокс, єдиною можливістю отримувати первинний метал є способи прямого відновлення заліза. При цьому вибір способу отримання металу залежить від конкретних умов (наявність та якість руд, запаси та вид палива, асортимент палива, асортимент металу та потрібні об'єми виробництва, енергетичні ресурси тощо) [1].

Виробництво та споживання енергії є однією із характеристик технічного прогресу та економічного

розвитку суспільства. До нашого часу базовим джерелом отримання енергії було органічне паливо: вугілля, нафта, природний газ, сланці, торф, деревина [2, 3]. Роль вугілля у світовому промисловому виробництві залежить від ряду факторів, найважливішими із яких є загальний розвиток виробництва та пов'язані з цим тенденції зростання споживання енергії; темпи впровадження нових технологічних енергозберігаючих процесів та машин; наявність запасів альтернативних енергетичних джерел; рентабельність розробки родовищ; їхнє географічне розташування, що визначає доцільність транспортування вугілля; темпи створення нової техніки для гірничо-геологічних умов, що безперервно погіршуються.

В запасях невідновних джерел енергії на частку вугілля припадає більше 90% геологічних запасів та близько 70-80% розвіданих. На частку нафти та природного газу відповідно більше 6% і близько 20%. При

цьому розвідані світові запаси нафти у 2013 р. склали 120 млрд т, і за річного споживання 2,9 млрд т їх вистачить трохи більше ніж на 40 років [4-6]. Розвідані запаси природного газу склали у 2013 р. від 90 до 100 млрд т (у нафтовому еквіваленті), таким чином за нинішнього рівня споживання їх також може вистачити лише на декілька десятків років [4-6].

Зважаючи на це, головний пріоритет виробництва товарного металу слід вбачати у мінімізації використання органічних невідновлюваних палив, що можливо й доцільно реалізувати за рахунок широкого застосування електричної енергії, отриманої шляхами, альтернативними до енергетики, що базується на спаленні органічних видів палива.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Класичні процеси безкоксової металургії заліза характеризуються високим рівнем споживання органічного палива [1, 7-8]. Найпоширеніший спосіб металізації окиснених окатишів – Midrex – потребує для здійснення реакцій відновлення оксидів заліза синтез-газ, отриманий шляхом конверсії природного газу. Тривалий час експлуатуються заводи прямого отримання заліза, що мають в своїй основі використання конвертованого природного газу. Проте запаси природного газу будуть вичерпані за декілька десятків років за умови збереження сучасних рівнів його споживання [2]. Подальша переробка металізованих окатишів у сталь здійснюється переважно в електродугових печах, джерелом живлення яких є електрична енергія, отримана, у більшості випадків, на електричних станціях, що використовують енергію реакції горіння органічного палива.

Виплавка чавуну за технологією, що передбачає використання комбінації «шахтна піч – плавильний газифікатор» (наприклад, Corex–процес), має низку істотних переваг. Найважливішими з них є повне усунення потреби в коксі та здатність системи адаптуватися до змін складу шихти. В технології Corex використовується плавильний газифікатор, що виконує функції газифікації вугілля та виробництва чавуну, при цьому можливе застосування вугілля різних марок [1, 7-8]. Цей аспект має велике значення, адже через зменшення запасів коксівного вугілля металургійні підприємства змушені шукати альтернативні джерела енергії й відновників для заміни традиційного коксу.

Сучасні заводи чорної металургії характеризуються раціональною схемою використання тепла. Найбільш вдала схема, на наш погляд, застосована на інтегрованому заводі фірми Saldanha Steel Co, де використовується установка Corex в поєднанні із шахтною піччю Midrex [1, 7-8]. Інтегрованість заводу дозволяє швидко й адекватно реагувати на зміну шихтових умов без коливань в якості кінцевого продукту завдяки доведення до мінімуму операцій проміжного складування. І хоча на сьогоднішній день схема такого заводу є вельми привабливою з точки зору вкладання

капіталу, проте все-одно в якості джерела теплової енергії для здійснення відновлювальних процесів, нагріву сировини і плавлення чавуну використовується енергетичне вугілля. В подальшому ефективність використання цієї схеми, на наш погляд, буде лише підвищуватись, однак одночасно буде зростати й ціна на товарний метал.

Мета статті

Мета статті полягає у створенні інтегрованого заводу, складовими модулями якого є процеси із якнайвигіднішим використанням енергії, отриманої при неминучому вивільненні теплової енергії органічного палива; у застосуванні низькотемпературної плазми для здійснення процесів відновлення оксидів заліза; в організації рециркуляції діоксиду вуглецю як джерела вуглецю та окиснювача у процесах газифікації вугілля.

Виклад основного матеріалу

Концепція пропонованого заводу чорної металургії має основою використання в якості відновника вугілля різних марок. Такий вибір обґрунтовується декількома причинами. По-перше, запаси вугілля є найбільшими серед усіх видів органічного палива. По-друге, існує довга історія видобування вугілля, і, отже, розроблені різноманітні методи його видобутку в залежності від місцевих умов. По-третє, розроблені та відпрацьовані різні способи газифікації вугілля всіх марок, тобто виробництво синтез-газу для процесів прямого отримання заліза не є проблемою. По-четверте, у промислових масштабах успішно працюють установки Corex, що споживають неоксидне вугілля та виробляють чавун, що за якістю є аналогічним до доменного.

Для раціоналізації використання вугілля у процесі виробництва товарного металу розглянуто наступну концепцію сучасного металургійного заводу, основні тези якої наведені нижче:

1. Вуглець, що міститься у вугіллі, виконує, насамперед, роль відновника в процесах відновлення оксидів заліза.
2. Відпрацьований газ із низькою температурою проходить стадію очищення від вуглекислого газу.
3. Отриманий вуглекислий газ використовується в процесі газифікації вугілля.
4. Використаний газ застосовується для генерації електроенергії.
5. Згенерована електрична енергія спрямовується на внутрішні виробничі потреби, включаючи виготовлення сталі, її розливку та формування.
6. Для підтримання необхідного температурного режиму під час остаточного відновлення оксидів заліза застосовується концентроване джерело енергії – плазма з низькою температурою.

У пропонованій концепції вугілля використовується для здійснення реакцій відновлення оксидів заліза. Це пов'язане, в першу чергу, з недопущенням використання викопних органічних матеріалів в якості джерела

теплової енергії. Із плином часу запаси вугілля будуть скорочуватись, їх видобування буде складнішим, і, отже, ціни на таке органічне паливо будуть стрімко зростати. З огляду на це, тепла енергія, отримана шляхом спалювання органічного палива, буде дедалі дорожчою. На противагу цьому виступають альтернативні джерела енергії, передусім, електрична енергія.

Перетворення електричної енергії у теплову пропонується здійснювати в електричних нагрівачах газу – плазмотронах. Останні призначені для отримання низькотемпературної плазми. У пропонованій концепції плазма розглядається як заміник тієї частини органічного палива, тобто вугілля, що витрачається на досягнення потрібного теплового рівня процесу виробництва чавуну в установках із плавильним газифікатором. Одночасно з цим низькотемпературна плазма також відіграє значну роль як реагуюче середовище в реакціях газифікації вугілля.

Таким чином, створюються достатні умови для використання вуглецю вугілля як відновника у процесах відновлення оксидів заліза. Проте вугілля відіграє також і роль джерела теплової енергії, адже в ході реакцій газифікації виділяється значна частка тепла у загальному балансі його надходження.

У межах запропонованої концепції для виплавки чавуну передбачається використання плазмохімічного плавильного реактора. У цьому агрегаті послідовно відбуваються процеси газифікації вугілля, остаточного відновлення оксидів заліза, насичення заліза вуглецем та утворення розплавленого чавуну та шлаку. Основними продуктами реактора є рідкий чавун, шлак та газ із відновними властивостями.

Газ-відновник подається до шахтного агрегату, де використовується для попереднього нагрівання кускових залізородних матеріалів. Завдяки високому відновлювальному потенціалу цього газу, в шахтному модулі також здійснюється часткове відновлення оксидів заліза.

Далі відпрацьований газ очищується від діоксиду вуглецю та надходить до шахтного агрегату глибокої металізації, на виході з якого отримують два потоки: окатиші з рівнем металізації, достатнім для подальшого переплаву в електродуговій печі, а також вторинний газ.

Металізовані окатиші та чавун завантажуються в електродугову піч, де проводиться виплавка сталі високої якості різних марок. Робота модуля печі забезпечується електроенергією, яку виробляє електрогенерувальна установка, інтегрована в структуру заводу. Ця установка трансформує як фізичне, так і хімічне тепло відпрацьованого газу в електроенергію.

Для розливання та формування товарного металу можуть бути використані широко розповсюджені машини безперервного лиття та прокатки сталі. Джерелом енергії для модулю розливання та формування слугує електрика, вироблена на згаданий електричній установці.

Технологічна схема пропонованого інтегрованого заводу зображена на рисунку 1. Вихідними сировинними матеріалами пропонованого інтегрованого

заводу є окиснені залізородні окатиші, вугілля та різного роду добавки. Для виробництва чавуну потрібна також електрична енергія, що надходить від зовнішніх постачальників. Серед виробників електричної енергії перевага надається атомній та альтернативній відновлювальній енергетиці. Такий вибір постачальників обумовлюється дотриманням головного пріоритету, згідно з яким на виробництво товарного металу повинно витрачатись, навіть опосередковано, мінімум органічного невідновлюваного палива.

У рамках запропонованої технологічної концепції всі основні етапи – газифікація вугілля, фінальне відновлення оксидів заліза, навуглецювання, а також формування чавуну і шлаку – реалізуються в єдиному агрегаті, яким є плазмохімічний плавильний реактор. Газифікація палива відбувається як у середовищі низькотемпературної плазми, так і безпосередньо в шарі вугілля, розташованому на поверхні розплавленого металу. Вугілля надходить до реактора частково в порошкоподібному стані, а також у кусковому вигляді. Основними продуктами газифікації є чадний газ, водень та продукти їх окиснення.

Попередньо нагріті та частково металізовані залізородні окатиші разом із певною частиною вугілля та флюсами надходять до плавильного реактора. У ході взаємодії з продуктами газифікації вугілля вони зазнають подальшого відновлення. Завершальна редукція та насичення заліза вуглецем відбувається в шарі вугілля. Розплавлене залізо, проходячи через вугільний і шлаковий шари, збагачується вуглецем і одночасно піддається десульфурзації. Оскільки в якості відновника використовується вугілля, кількість сірки в системі є значною, тому для ефективного її видалення необхідне створення шлаку з високою основністю.

Під час нагрівання та відновлення залізородної сировини відбувається розклад кальцієвих і магнієвих карбонатів, у результаті чого утворюється активне м'якшувальне вапно. Його разом з окатишами завантажують у плавильний реактор для утворення шлаку необхідної хімічної структури. Для коригування складу та основності шлаку додаються й інші шлакоутворюючі матеріали.

Продукти газифікації, що утворюються в реакторі, мають високу температуру та потужний відновний потенціал. Після очищення від сірковмісних сполук газ використовується в модулі попереднього нагрівання та відновлення окатишів, при цьому він насичується водяною парою й діоксидом вуглецю. Після цього газ очищується від діоксиду вуглецю, зберігаючи відновлювальні властивості, але втрачаючи температуру, необхідну для ефективного металізації. Виділений CO_2 знову подається до реактора, де бере участь у газифікації вугілля, виконуючи функції окисника. Це дозволяє зменшити витрату вугілля. Необхідна тепла енергія для цього процесу забезпечується плазмовою низькотемпературного типу. Отримані чавун і шлак виводяться з агрегату: чавун – на сталеплавильну стадію, шлак – на складування.

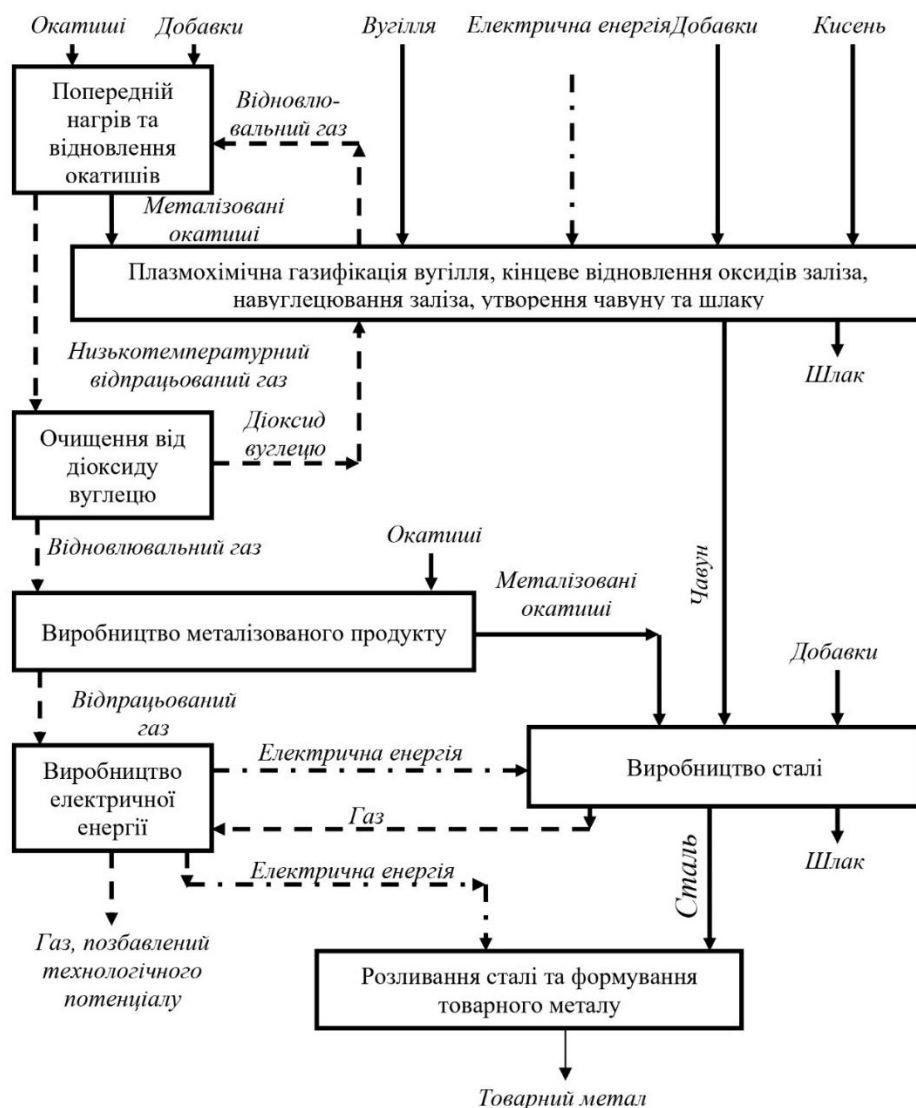


Рис. 1 – Технологічна схема інтегрованого пропонованого заводу з виробництва товарного металу з використанням низькотемпературної плазми

Очищений відпрацьований газ, після повторного нагрівання за допомогою залишкового тепла з реактора, подається на модуль металізації, де він взаємодіє з окатишами, формуючи гарячий металізований продукт. Завдяки температурним умовам транспортування продукту до сталеплавильного етапу виключається самозаймання губчастого заліза.

Вторинний газ, який утворюється після металізації, має високу температуру, проте низький відновний потенціал. Його енергетична цінність є невисокою, тому він використовується як джерело тепла для виробництва електроенергії. Для цього застосовуються як хімічна, так і фізична енергія газу. Попри те, що використання цього газу для генерації електроенергії частково суперечить початковим пріоритетам процесу, така операція забезпечує раціональне використання

ресурсів. Відпрацьований газ після генерації електроенергії очищується та викидається в атмосферу.

Сталеплавильне виробництво базується на використанні чавуну та металізованих окатишів як основної сировини. Центральним агрегатом є електродугова піч, що дозволяє досягти високих стандартів якості сталі, яких неможливо досягти у кисневих конвертерах. Електродугова піч живиться електроенергією, що генерується з технологічного газу, який утворюється під час виплавки сталі. Цей газ, завдяки своїй високій теплоті згорання, використовується для подальшого виробництва електроенергії. Додатково в піч подаються легуючі та шлакоутворювальні добавки для регулювання складу шлаку. Отримана сталь надходить на розливання і формування, а шлак відправляється на утилізацію.

Для здійснення операції розливання та формування товарного металу використовується, головним чином, електрична енергія. Вона надходить з операції виробництва електричної енергії, що включена до схеми пропонованого інтегрованого заводу чорної металургії. Розливання і формування здійснюються за технологією, що виключає проміжне складування

заготовок. Це призводить до економного споживання енергії та зменшення тривалості робочого циклу. Кінцевою продукцією цієї операції є формований метал.

Схема ланцюга апаратів пропонованого інтегрованого заводу чорної металургії зображена на рисунку 2.

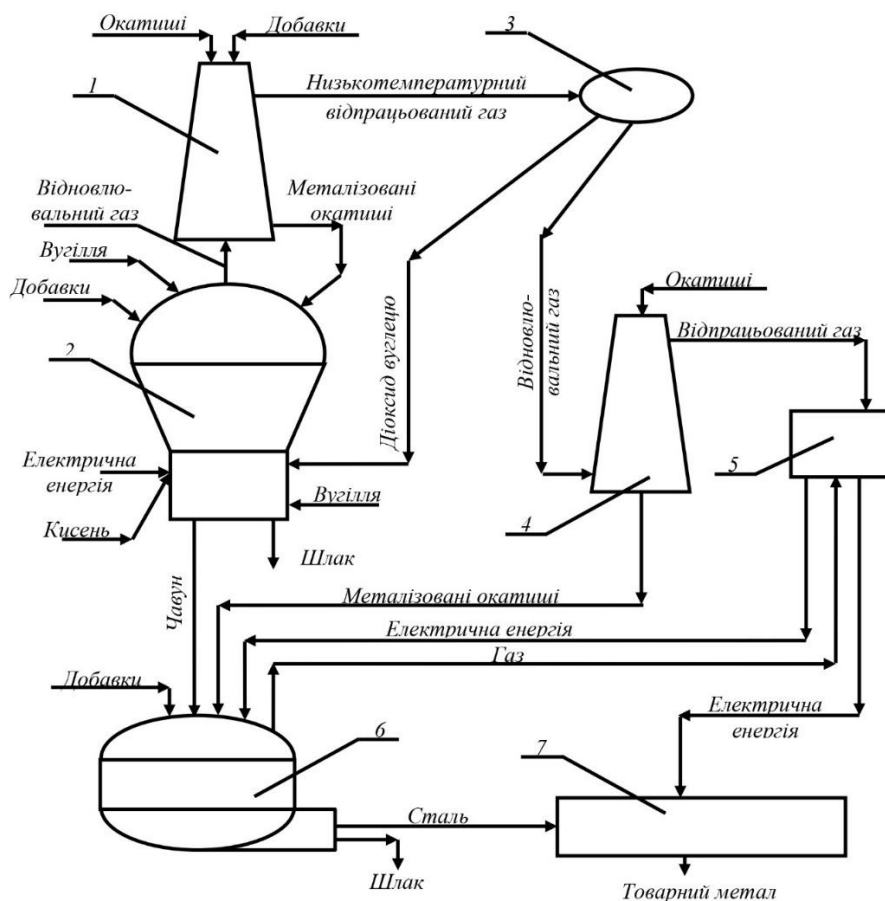


Рис. 2 – Схема ланцюга апаратів пропонованого заводу: 1 – відновлювальний агрегат шахтного типу; 2 – плазмохімічний плавильний реактор; 3 – пристрій для очищення потоку газу від діоксиду вуглецю; 4 – відновлювальний агрегат шахтного типу; 5 – електрична станція; 6 – електродугова піч; 7 – стан розливання та формування товарного металу

Окиснені окатиші разом із вапняком завантажуються у відновлювальний агрегат шахтного типу 1 (рис. 2), в який також надходить відновлювальний газ із плазмохімічного плавильного реактора 2. Агрегат шахтного типу 1 призначений для утилізації тепла відхідних газів плазмохімічного плавильного реактора 2. Відновлювальний газ має відновлювальний потенціал, тому разом із процесами теплообміну здійснюється також попереднє відновлення оксидів заліза. Паралельно із цим відбувається дисоціація карбонатів вапняку. Завдяки відносно невисокій температурі газу в агрегаті шахтного типу 1 здійснюється м'який випал вапна. Це призводить до отримання вапна, що має високу реакційну здатність.

Попередньо відновлені окатиші та вапно завантажуються до плазмохімічного плавильного реактора 2. Разом з цим завантажуються частина вугілля та добавки для коригування властивостей шлаку. В нижній частині плазмохімічного плавильного реактора 2 радіально встановлені плазмотрони (на рисунку 2 не зображені) аналогічно до фурм плавильного газифікатора установки Corex. До плазмотрону підводиться електрична енергія та плазмоутворюючий газ – кисень. В утворену в плазмотроні плазму вводиться частина вугілля у вигляді порошку. У плазмовому струмені здійснюються реакції газифікації вугілля з утворенням відновлювальних у відношенні до оксидів заліза газів. На виході із плазмотрону низькотемпературна киснева

плазма віддає своє тепло шару з вугілля та попередньо відновлених окатишів. При цьому кисень переходить з іонізованого стану у молекулярний. Зустрічаючи на своєму шляху вугілля, кисень реагує з ним з утворенням продуктів газифікації, переважно монооксиду вуглецю та водню. Продукти плазмохімічної та молекулярної газифікації взаємодіють з нагрітими попередньо відновленими окатишами. В результаті окиснені окатиші перетворюються на металізовані до високого ступеня металізації. Паралельно здійснюються процеси науглецювання свіжовідновленого заліза, а також процеси шлакоутворення. Шлак стікає крізь вугілля та окатиші та розташовується під ними. Шлак безперервно перемішується завдяки надходженню у робочий простір плазмохімічного плавильного реактора 2 низькотемпературної плазми. Таким чином досягається гомогенізація шлаку, що позитивно впливає на його сіркопоглинальну здатність.

Тепло, що надходить від струменів низькотемпературної плазми та реакції газифікації вугілля, поглинається металізованими окатишами. Внаслідок цього утворюються краплини чавуну, що проходять крізь шар вугілля, і піддаються подальшому науглецюванню. Потрапляючи у шар шлаку, чавун очищується від сірки та стікає у нижню частину плазмохімічного плавильного реактора.

Продукти газифікації вугілля після кінцевого відновлення попередньо відновлених окатишів надходять у верхню частину плазмохімічного плавильного реактора 2, втрачають там швидкість і видаляються з робочого простору. Цей газ має високу температуру та відновлювальний потенціал. З метою зробити використання цього газу у відновлювальному агрегаті шахтного типу 1 можливим, відновлювальний газ піддається охолодженню та очищенню від пилу та сполук сірки. Очищений та охолоджений відновлювальний газ подається у нижню частину агрегату 1. Утворений у плазмохімічному плавильному реакторі 2 шлак складається для подальшої переробки, а чавун направляється на виробництво сталі.

На виході з відновлювального агрегату 1 є низькотемпературний відпрацьований газ, що має низький відновлювальний потенціал, однак містить ще деяку кількість відновлювачів. Для забезпечення можливості використання цього газу як відновного агента він надходить у пристрій очищення потоку газу від діоксиду вуглецю 3. В цьому пристрої здійснюється виділення діоксиду вуглецю, й, тим самим, відбувається збагачення потоку газу відновниками. На виході з пристрою 3 існують два потоки: потік діоксиду вуглецю та потік відновлювального газу. Перший потік є джерелом вуглецю та виступає в ролі окисника, тому спрямовується у плазмохімічний плавильний реактор 2. Другий потік являє собою низькотемпературний відновлювальний газ. Для підвищення його температури здійснюється раціональний теплообмін між ним та відновлювальним газом, що надходить з плазмохімічного плавильного газифікатора 2. Таким чином вдається уникнути

неекономного використання надлишкового тепла високо нагрітого відновлювального газу.

Нагрітий до оптимальної температури відновлювальний газ із пристрою 3 надходить до відновлювального агрегату шахтного типу 4. Також у цей агрегат завантажуються окиснені окатиші. Відновлювальний газ, рухаючись назустріч потоку окиснених окатишів, відновлює їх. При цьому досягається такий ступінь металізації окатишів, що їх економічно доцільно переплавляти у сталь. На виході з відновлювального агрегату шахтного типу 4 існує потік відпрацьованого газу. Він має низький вміст відновників і тому не придатний для подальших відновлювальних процесів. Проте відпрацьований газ має високу температуру та приховану енергію хімічного перетворення, що дозволяє використовувати його як джерело енергії для виробництва електричної енергії.

Виробництво електричної енергії здійснюється на електричній станції 5.

Чавун та отримані у відновлювальному агрегаті шахтного типу 4 металізовані окатиші завантажуються в електродугову піч 6. Разом з цим здійснюється завантаження добавок для наведення властивостей шлаку. В електродуговій печі 6 здійснюються процеси виробництва сталі, шлаку, а також газу, що складається переважно з монооксиду вуглецю. Цей газ спрямовується на електричну станцію 5 для виробництва електричної енергії. Сталь надходить на стан розливання та формування товарного металу 7. Тут здійснюються остаточні операції з надання сталі товарного виду у вигляді прокату. Стан 7 споживає електричну енергію, що отримана на електричній станції 5.

Для забезпечення нормального функціонування пропонованого заводу існує замкнений цикл водопостачання.

Схематично плазмохімічний плавильний реактор зображений на рисунку 3.

У плазмохімічний плавильний реактор згори завантажуються попередньо відновлені окатиші, добавки та частину вугілля. Маючи достатню потенціальну енергію вони проходять зону зниження тиску відновленого газу, де швидкість руху газу не надто загальмовує подальше падіння кускових матеріалів. Зона зниження тиску газу розташовується у сферичній частині плазмохімічного плавильного реактора. Опускаючись донизу, потенціальна енергія кускових матеріалів стає співвимірною із кінетичною енергією газу, що рухається вгору. Рівність енергій свідчить про можливість утворення псевдозрідженого шару 1 (рис. 3). Він складається з кусків вугілля, попередньо відновлених окатишів, добавок та газової фази, що представлена продуктами газифікації вугілля. У псевдозрідженому шарі відбувається інтенсивний нагрів вугілля, добавок та попередньо відновлених окатишів. Останні також піддаються відновленню з утворенням металічного заліза. Відновлення здійснюється як прямим, так і непрямим шляхом. Також у псевдозрідженому шарі відбувається первинне науглецювання металізованих окатишів.

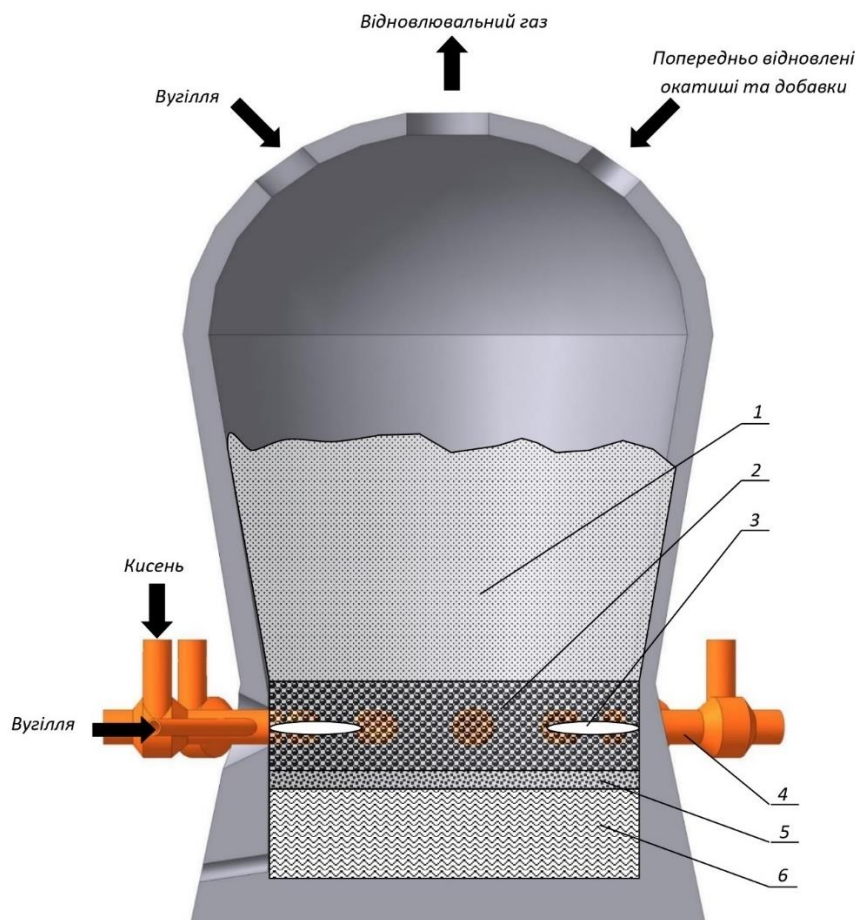


Рис. 3 – Плазмохімічний плавильний реактор: 1 – псевдозріджений шар; 2 – шар вугілля та окатишів; 3 – потік низькотемпературної плазми; 4 – плазмотрон; 5 – шар шлаку; 6 – шар чавуну

Псевдозріджений шар виконує також функцію сепарації газового потоку від дрібних кусків залізородного матеріалу. Це відбувається завдяки високій інтенсивності протікання процесів тепло- та масообміну у псевдозрідженому шарі, що зменшує винесення дрібних частинок залізородного матеріалу з плазмохімічного плавильного реактора. Дрібні частинки нагріваються, відновлюються й в потоці газу розплавляються. Рух потоку газу організований таким чином, що відбувається його обертання навколо вертикальної осі. Краплини металу мають більшу густину, ніж кускові матеріали у псевдозрідженому шарі, тому вони притискаються до внутрішніх стінок плазмохімічного плавильного реактора. Далі краплини металу стікають стінками та потрапляють у шар вугілля та окатишів 2.

Металізовані окатиші, краплини металу, непрореаговане вугілля та добавки з псевдозрідженого шару 1 надходять у шар вугілля та окатишів 2. У цьому шарі здійснюються процеси газифікації вугілля, прямого та непрямого кінцевого відновлення окатишів, навуглюювання окатишів, утворення чавуну та шлаку.

У шар вугілля та окатишів 2 надходить потік низькотемпературної плазми 3. Низькотемпературна

плазма утворена в плазмотроні 4. До плазмотрону 4 надходить електрична енергія та плазмоутворюючий газ – кисень. Кисень підводиться тангенціально, утворюючи тим самим закручений потік. Електричний розряд у плазмотроні перетворює потік молекулярного кисню у низькотемпературну плазму з температурою 3000-5000 К. В утворений потік плазми надходить подрібнене вугілля у вигляді порошку, що зважений у потоці газу. Потрапляючи у потік низькотемпературної плазми, холодна частинка вугілля внаслідок великого термічного напруження, що виникає всередині неї, руйнується з утворенням декількох уламків. Такий процес термічного подрібнення приводить до збільшення поверхні частинок вугілля, а це, в свою чергу, приводить до збільшення площі розділу твердої та газової фаз, і, отже, підвищується реакційна здатність вугілля. При подальшому швидкому нагріві частинки вугілля звільняються від легких і перетворюються на кокс. Газифікація коксового залишку вугілля здійснюється за участі радикалів. Отриманий у низькотемпературній плазмі синтез-газ характеризується високим вмістом монооксиду вуглецю та водню. У газовій фазі відбуваються також газозфазні реакції, які призводять до

деякого зменшення відновлювального потенціалу синтез-газу.

На виході з плазмотрону існують потоки синтез-газу та плазмоутворюючого газу, що не прореагував. Непрореагований кисень у вигляді потоку низькотемпературної плазми віддає тепло шару вугілля та окатишів 2, і при цьому перетворюється на молекулярний кисень. Останній реагує з кусками вугілля, газифікуючи їх. Синтез-газ та продукти газифікації вугілля молекулярним киснем відновлюють окатиші до металічного заліза. Останнє науглецьовується і, завдяки теплу низькотемпературної плазми, синтез-газу та продуктів газифікації, розплавляється. Утворенню металічного розплаву передують процеси утворення шлаку, який має нижчу температуру плавлення. Краплини шлаку проходять крізь шар вугілля та окатишів 2 й стікають у шар шлаку 5.

Розплавлені краплини чавуну проходять крізь шар вугілля та окатишів 2, де остаточно науглецьовуються. Чавун проходить крізь шар шлаку 5, де відбуваються реакції десульфурації. Очищений від сірки чавун стікає у шар чавуну 6. Готовий чавун разом зі шлаком зливають із робочого простору плазмохімічного плавильного реактора.

Висновки

Таким чином, використання запропонованої концепції дозволить створити інтегрований завод із виробництва товарного металу з мінімумом використання органічних невідновлюваних компонентів, широким застосуванням електричної енергії та досить гнучким підлаштуванням під зміни сировинних умов із забезпеченням незмінної якості товарного металу.

Пропонований інтегрований завод чорної металургії відповідає сучасним тенденціям щодо економії природних ресурсів, характеризується раціональністю використання теплової енергії та відновлювального

потенціалу газів, відрізняється виробництвом електричної енергії, що споживається у процесах виробництва сталі та товарного металу. Система виділення діоксиду вуглецю та його подальшого використання є найбільш раціональним використанням вуглецю. В даному випадку він підвищує вміст вуглецю в продуктах газифікації у порівнянні з іншими способами газифікації.

Перелік використаних джерел

- [1] Бондаренко Б.И., Шаповалов В.А., Гармаш Н.И. Теория и технология бескоксовой металлургии. К. : Наукова думка, 2003. 535 с.
- [2] Бережний М.М., Хіноцька А.А. Паливо та металургійні печі : монографія. Кривий Ріг : Діонат (ФОП Чернявський Д.О.), 2012. 380 с.
- [3] Хейфец Р.Г., Куваев Г.Н. Теплоэнергетика металлургических заводов : уч. пособ. Д. : НМетАУ, 2000. 66 с.
- [4] 4BP Statistical Review of World Energy. June 2014. Energy in 2013: Taking stock. URL: [https://www.energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/energy/BP-statistical-review-of-world-energy-2014%20\(1\).pdf](https://www.energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/energy/BP-statistical-review-of-world-energy-2014%20(1).pdf) (дата звернення: 03.04.2025).
- [5] Маркевич К., Омельченко В. Глобальні енергетичні тренди крізь призму національних інтересів України : аналітична доповідь. К. : Заповіт, 2016. 118 с.
- [6] Запаси та видобування кам'яного вугілля. URL: https://eti.gov.ua/resursi-rozvidka-ta-vidobuvannya/kamyane-vugillya_2022/ (дата звернення: 03.04.2025)
- [7] Безкоксowa металургія заліза : підручник / Іващенко В.П., Величко О.Г., Терещенко В.С., Чеченев В.А. Дніпропетровськ : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. 338 с.
- [8] Губін Г.В., Півень В.О. Сучасні способи безкоксowej металургії заліза. Кривий Ріг, 2010. 336 с.

INTEGRATED TECHNOLOGY FOR FERROUS METAL PRODUCTION USING LOW-TEMPERATURE PLASMA

Plotnikov V.V.	PhD (Engineering), associate professor, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8791-874X , e-mail: plotnikov_vv@knu.edu.ua ;
Babaievskia O.V.	senior lecturer, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6097-6449 , e-mail: babaievskia_ua@knu.edu.ua ;
Saveliev S.G.	D.Sc. (Engineering), professor, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6263-9422 , e-mail: saveliev_sg@knu.edu.ua ;
Baboshko D.Yu.	PhD (Engineering), Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3551-8785 , e-mail: baboshko_dyu@knu.edu.ua ;
Chubenko V.A.	PhD (Engineering), associate professor, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3356-0285 , e-mail: chubenko_va@knu.edu.ua

A concept of a modern metallurgical plant is proposed, based on the following key principles: the carbon in coal is primarily considered as a reducing agent for the reduction of iron oxides; carbon dioxide is utilized for coal gasification;

off-gases are used for electricity generation, which supplies the energy needs of steel production, casting, and forming; low-temperature plasma is applied to maintain the required thermal level of the iron reduction processes. The core operations of the proposed integrated plant include coal gasification, final reduction of iron oxides, carburization of iron, and the formation of pig iron and slag — all carried out in a single unit: a plasma-chemical smelting reactor. The gasification products formed in the reactor possess high temperature and reducing potential and are directed toward heating and metallization of pellets. Steel is produced from hot metallized pellets and pig iron in an electric arc furnace using electricity generated from the high-temperature, low-reducing-potential off-gas produced after the metallized product stage. Casting and forming are carried out using a technology that eliminates intermediate billet storage, resulting in energy savings and shorter production cycles. The final result of such production yields a high quality of metal which cannot be achieved by smelting using the converter method. The proposed integrated ferrous metallurgy plant features an efficient thermal utilization scheme with minimized heat losses from equipment cooling. The system for CO₂ capture and its subsequent use represents the most rational use of carbon, since, unlike conventional systems where CO₂ is emitted into the atmosphere, it is reused to increase the carbon content in the technological process. This concept is in line with modern trends in global steel production.

Keywords: carbon, gasification, low-temperature plasma, metallization, plasma-chemical reactor, electric arc furnace, electricity.

References

- [1] B.I. Bondarenko, V.A. Shapovalov, and N.I. Garmash, *Teoriya i tekhnologiya beskoksovoy metallurgii* [Theory and technology of coke-free metallurgy]. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka Publ., 2003. (Rus.)
- [2] M.M. Berezhny, and A.A. Khinotska, *Palyvo ta metallurhiyni pechi: Monohrafiya* [Fuel and metallurgical furnaces: Monograph]. Kryvyi Rih, Ukraine: Dionat (FOP Chernyavskiy D.O.) Publ., 2012. (Ukr.)
- [3] R.G. Kheifets, and G.N. Kuvaev, *Teploenergetika metallurgicheskikh zavodov* [Thermal power engineering of metallurgical plants: Textbook]. Dnipropetrovsk, Ukraine: NMetAU Publ., 2000. (Rus.)
- [4] BP Statistical Review of World Energy. June 2014. Energy in 2013: Taking stock. [Online]. Available: [https://www.energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/energy/BP-statistical-review-of-world-energy-2014%20\(1\).pdf](https://www.energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/energy/BP-statistical-review-of-world-energy-2014%20(1).pdf). Accessed on: April 03, 2025.
- [5] K. Markevich, and V.Omelchenko, *Hlobal'ni enerhetychni trendy kriz' pryzmu natsional'nykh interesiv Ukrainy: analitychna dopovid'* [Global energy trends through the prism of national interests of Ukraine: analytical report]. Kyiv, Ukraine: Zapovit Publ., 2016. (Ukr.)
- [6] Coal reserves and extraction. [Online]. Available: <https://eti.gov.ua/resursi-rozvidka-ta-vidobuvannya/kamyane-vugillya> 2022/. Accessed on: April 03, 2025.
- [7] V.P. Ivashchenko, O.G. Velichko, V.S. Tereshchenko, and V.A. Chechenev, *Bezkoksova metallurhiya zaliza: pidruchnyk* [Coke-free iron metallurgy: textbook]. Dnipropetrovsk, Ukraine: RVA «Dnipro-VAL» Publ., 2002. (Ukr.)
- [8] G.V. Gubin, and V.O. Piven, *Suchasni sposoby bezkoksovoyi metallurhiyi zaliza* [Modern methods of coke-free iron metallurgy]. Kryvyi Rih, Ukraine, 2010. (Ukr.)

Стаття надійшла 23.04.2025

Стаття прийнята 07.05.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Комплексна технологія виробництва чорних металів із застосуванням низькотемпературної плазми / В.В. Плотніков та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 125-133. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336317>.