

2. Приходько Э.В., Шеенко М.И. Равновесное распределение фосфора между металлом и шлаком и методика оценки степени его достижения // Известия ВУЗов. Черная металлургия.-1985.-№1.-С.6-9.

УДК 669.1.061.6

Л. Г. Тубольцев¹, О. Е. Меркулов¹, В. О.Петренко²

¹Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Дніпро

²Український державний університет науки і технологій, Дніпро

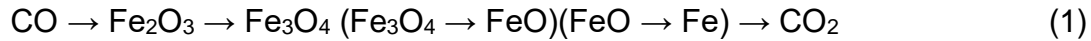
ЕКОЛОГІЧНІ ПЕРСПЕКТИВИ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ УКРАЇНИ

Вступ. Слід одразу звернути увагу, що металургія є базовою галуззю економіки більшості промислово розвинених країн, однак у загальному обсязі світових викидів парникових газів частка металургії становить 6%, транспорту – 23%, електроенергетики – 39%. В Україні у 2019 році частка чорної металургії у викидах CO₂ від загальних склала 23% [1]. Проте, обмеження щодо рівня використання вуглецю у виробництві, прийняті на найвищому законодавчому рівні в ЄС, найближчим часом вірогідно призведуть до закриття багатьох підприємств. ЄС планує запровадити спеціальний механізм (Carbon Border Adjustment Mechanism), відповідно до якого імпорт продукції, виробленої з вищими, ніж у ЄС, викидами CO₂, буде оподатковуватись додатковою платою [2]. У світі розглядаються можливості застосування технологій декарбонізації під час виробництва сталевих продукції для зменшення викидів вуглекислого газу, відповідального за парниковий ефект та глобальне потепління Землі, та поліпшення екологічної ситуації. Нагальним є використання альтернативних вуглецю відновників оксидів заліза, перспективних технологій та їх застосування у металургійному виробництві.

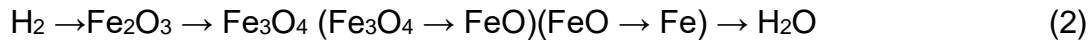
Термодинаміка відновлення оксидів заліза. Процеси відновлення оксидів металів газоподібними та твердими відновниками лежать в основі всіх металургійних технологій. Зазвичай, основним відновником у металургійних процесах використовується вуглець. Вуглець є єдиним елементом металевих ванн, що дає у звичайних умовах плавки газоподібні продукти окислення - {CO}, або суміші {CO} і {CO₂}. Іншим відновником може служити водень, але у звичайних умовах його продуктом є вода H₂O, яка при високих температурах переходить у газоподібний пар {H₂O}. Таким чином, во-

день також є перспективним екологічно безпечним відновником для здійснення металургійних процесів. Тому доцільно порівняти термодинаміку застосування вуглецю та водню як відновників оксидів заліза.

Відновлення оксидів заліза оксидом вуглецю та воднем проходить наступні стадії [3]:



Реакція відновлення оксиду заліза воднем проходить наступні стадії:



На першій стадії відновлення проходить перетворення оксиду Fe_2O_3 у Fe_3O_4 . Термодинамічний аналіз рівноважних концентрацій вуглецю (χ_{CO}) та водню (χ_{H_2}) показують, що при температурах 300-820⁰С застосування CO має переваги перед H₂, оскільки рівноважні концентрації χ_{CO} значно менші порівняно з (χ_{H_2}). Тому, з точки зору термодинаміки, в реальних умовах (до температур 820⁰С) для відновлення гематиту Fe_2O_3 до Fe_3O_4 доцільно застосовувати монооксид вуглецю CO. Проте і водень має хороші відновлювальні характеристики при температурах до 820⁰С, що дозволяє його застосовувати за таких умов.

При перетворенні оксиду Fe_3O_4 у FeO рівноважні концентрації вуглецю (χ_{CO}) та водню (χ_{H_2}) також показують, що до температур 820⁰С застосування CO має переваги перед H₂, оскільки рівноважні концентрації χ_{CO} дещо менші порівняно з χ_{H_2} . Підвищення температури прискорює процес відновлення. При температурах вище 820⁰С проявляється різний характер впливу CO та H₂ на процес відновлення оксидів заліза. До температури 820⁰С водень має меншу здатність до відновлення порівняно з CO, а вище цієї температури водень H₂ за відновлювальними властивостями переважає CO. Таким чином, термодинамічний аналіз показує, що при створенні реальних металургійних процесів слід враховувати особливості та відмінності поведінки вуглецю та водню як відновників, економічну доцільність, екологічні вимоги, особливості металургійних технологій та агрегатів.

Технічні рішення декарбонізації сталі у світовій практиці. Основною схемою виробництва сталі в Україні нині є технологія «доменна піч – кисневий конвертер» (BF-BOF), при застосуванні якої питомі викиди CO₂ в середньому становлять близько 2,0-2,2 т CO₂/т сталі. При модернізації доменного виробництва в Україні можуть бути використані найкращі відомі в світовій практиці технології виробництва чавуну та сталі (BF-BOF(BAT)) [4]. Вони можуть дозволити знизити викиди на 25-30%. Але цього недостатньо для того, щоб досягати необхідних цілей зниження викидів.

Технологія доменної плавки BF Top gas recycling (CCS) з використанням технології уловлювання, зберігання та використання доменного газу в суміжних технологічних процесах дозволяє зменшити викиди парникових газів до рівня 1,1 т CO₂/т сталі. Ця технологія (CCS) може стати одним з напрямків досягнення вуглецевої нейтральності у металургії.

Можливість досягнення вуглецевої нейтральності може надати технологія відновлювальної плавки (Smelting reduction). Ця технологія теоретично дозволяє замінити кокс вугіллям, виключити з виробничого процесу коксохімічний завод, аглофабрику, доменну піч та замінити їх двома агрегатами – відновлювальним реактором та плавильною піччю-газифікатором. Екологічний потенціал технології щодо зниження витрат енергії та зменшення викидів оцінюється біля 20%, при цьому застосування технології CCS дозволяє ще скоротити викиди парникових газів до рівня 0,2 т CO₂/т сталі.

Технологія використання заліза прямого відновлення (DRI) в електродугових печах (EAF) дозволяє знизити питомі викиди CO₂ до рівня близько однієї тонни CO₂/т сталі, а з застосуванням технології CCS викиди CO₂ можуть бути зменшені до рівня 0,5 т CO₂/т сталі. Однак, така технологія вимагає наявності залізорудної сировини з високим вмістом заліза та низьким вмістом домішок, наявності великих енергетичних потужностей, що обмежує можливості застосування.

Світова практика показує, що в результаті кількох років роботи і багатомільйонних інвестицій декарбонізувати сталь вдалося лише на 10%, в основному за рахунок збільшення частки металобрухту в шихті та купівлі «зеленої» електроенергії. Технологія виробництва сталі в електropечах з використанням металевого брухту дозволяє мати викиди CO₂ на рівні ~0,8 т CO₂/т сталі. Однак, в Україні застосування такої технології обмежено наявністю достатньої кількості металевого брухту.

Одним з напрямків декарбонізації виробництва сталі, який вже давно використовується в металургії, є технологія прямого відновлення заліза. Проте, технологія має викиди парникового газу на рівні ~1,6 т CO₂/т сталі і не забезпечує досягнення запланованих екологічних показників. У той же час застосування технології CCS у металургійних процесах дозволяє знизити викиди CO₂ на 55% до рівня 0,9 т CO₂/т сталі.

У металургійних колах давно обговорюють принципово нову технологію застосування водню для виробництва залізорудної сировини і, власне, металу. Основною перевагою від застосування водню в металургії є можливість відмовитися від використання вуглецевмісних видів палива (вугілля, кокс, природний газ). В Україні для ДП у перспективі можливо застосувати технологію з використанням відновлювальних та

енергетичних можливостей водню, що дозволить знизити викиди CO₂ на 10-20%. При цьому водяна пара, що утворюється, замінює викиди CO₂.

Використання водню в агрегатах прямого відновлення та агломерації може відновлювати до 50% заліза. Проте, згідно термодинамічним розрахункам, такі процеси дозволяють зменшити споживання енергії лише на 8-18%. Основні енергетичні витрати потребує відновлення FeO до Fe (біля 70%).

Водень, як енергетичний замінник може бути використаний практично у всіх технологіях металургійного виробництва. Однак поки що масове виробництво водню потребує великих затрат електроенергії і такі технології тільки почали розвиватися. Поки що водень обходиться дорожче, ніж паливо, що містить вуглецю. Розрахунки показують, що при ціні коксу 400 дол/т ціна водню не повинна перевищувати 1600 дол/т (співвідношення 1 до 4).

Перспективи відновлення металургії України. Війна з РФ кардинально змінила роботу чорної металургії України. Зруйновано більше половини металургійних потужностей. Проте, навіть у таких умовах галузь зберегла певний експортний потенціал, який поки що обмежений закритими морськими портами. Відновлення металургії України має пройти декілька етапів. Після закінчення військових дій на першому етапі протягом 2-3 років має бути здійснена відбудова зруйнованих підприємств. На цьому етапі важко сподіватися на поліпшення екологічної ситуації в чорній металургії.

На другому етапі протягом 3-5 років доцільно довести технічний рівень металургійного виробництва до енергетичних показників світового рівня, дозволить зменшити викиди парникових газів на 15-20%.

На третьому етапі до 2050 року необхідно довести показники декарбонізації виробництва сталі до мінімального можливого рівня, що забезпечить дотримання екологічних умов до визначених на той час у світовій металургії показників.

Висновки. Експертні оцінки показують, що в Україні на даний час використання вуглецю як відновника та як джерела енергії в металургійному виробництві в даний час є необхідним. При цьому досягти суттєвого зменшення використання вугілля та коксу у металургійному виробництві можливо лише у довгостроковій перспективі. На цьому шляху є ціла низка наукових, технічних та фінансових проблем, що потребують спільної роботи держави, металургійних підприємств та наукових організацій України.

Список літератури

1. Iron and Steel Technology Roadmap. *www.iea.org*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>. [Дорожня карта технологій чорної металургії. *International Energy Agency*: Веб-сайт: URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>].
2. Carbon Border Adjustment Mechanism. *EC.EUROPA.EU*. Retrieved from https://ec.europa.eu/taxation_customs/green-taxation-0/carbon-border-adjustment-mechanism_en. [Механізм регулювання вуглецевих кордонів. *European Commission*]. Веб-сайт: https://ec.europa.eu/taxation_customs/green-taxation-0/carbon-border-adjustment-mechanism_en].
3. Thermodynamic analysis of iron oxide reduction processes with hydrogen and carbon monoxide. Retrieved from https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/11112/2016_441_ivochkindv.pdf?sequence=1. [Термодинамический анализ процессов восстановления оксидов железа водородом и оксидом углерода. Веб-сайт: https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/11112/2016_441_ivochkindv.pdf?sequence=1].
4. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. (2010). Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and Control. 2013. Retrieved from <http://eippcb.jrc.es>

УДК 303.669.1:33(477)

Л. Г. Тубольцев¹, В. О. Петренко², Т. А. Фонарьова²

¹Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України,
м. Дніпро

²Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ В КОМПЛАЄНСІ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

Застосування принципів комплаєнсу все більше розповсюджується на різні сфери промислового виробництва. Сучасним інноваційним підходом в металургійному виробництві є розробка комплаєнс-програми. Металургійне виробництво включає в себе процеси, де необхідно враховувати та дотримуватися багатьох вимог, які фіксуються як у внутрішньо-корпоративних та/або державних, так й у міжнародних документах, настановах, інструкціях, стандартах тощо. Відповідно, керівники всіх рівнів та