

DOI: 10.34185/1991-7848.2024.01.03

УДК 622.778.873.6

А.А.Ванюков, Л.В.Камкіна, В.П.Іващенко, Я.В.Мяновська, П.О.Сазонов

АНАЛІЗ СТАНУ ТЕРМІЧНО РЕЗЕРВНОЇ ЗОНИ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ В ШИХТІ РУДОВУГІЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙ

Анотація. Розглянуто виникнення та існування зон у доменній печі, обумовлене закономірностями теплообміну. У середній зоні доменної печі температура потоку газу, що виходить, залишається відносно постійною і в ній не відбуваються хімічні процеси. Це "термічно резервна зона", верхня частина цієї зони - "хімічно резервна зона" представлена в'юститом, який не відновлюється. Резерв цієї зони - утворення газової фази. При добавках у шихту рудовугільних композицій відбувається відновлення оксидів заліза ($t=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) за реакцією $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{C}=\text{Fe}_3\text{O}_4+\text{CO}_2$ та газифікації вуглецю $\text{CO}_2+\text{C}=2\text{CO}$ (Реакція Будуара). Газова фаза (CO), що утворюється, інтенсивно відновлює оксиди заліза. Композити для доменної плавки виробляються із суміші доменних шлаків із добавками цементу. Суміш переробляється в рудовугільні котуни або брикети. Доменна плавка на металургійних заводах України, Південної Кореї, Японії показала, що використання рудовугільних композитів є ефективною добавкою в шихту доменної плавки для зниження витрати коксу. В основі ефекту рудовугільного композиту лежить теорія "Тісного контакту" (Coupling Phenomenon) між вуглецевими і залізовмісними матеріалами в окатиш-композиті. Їхня взаємодія відбувається, як показали дослідження, при температурах $250\text{-}420\text{ }^{\circ}\text{C}$ в атмосфері CO. З урахуванням реакції Будуара температура в термічно резервній зоні доменної печі знижується на $80\text{-}200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким чином у хімічно резервній зоні - відновлення в'юститу відбувається не при $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при $920\text{-}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ і вона зміщується ближче до зон формування чавуну і шлаку. У статті проаналізовано термограми у доменній печі з урахуванням рудо вугільних крмпозитів. Хімічно резервна зона розташовується у середині шахти (від поверхні шлаку) 11,2 м. Зі збільшенням витрати композиту в шихті (30%) становище резервної зони знижується з 11,2 до 6,2м. Ширина між термограмами $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ є характерною зоною когезії, зі збільшенням витрат композиту

© Ванюков А.А., Камкіна Л.В., Іващенко В.П., Мяновська Я.В., Сазонов П.О., 2024

знижується з 2,1 м т (без завантаження композиту) до 0,9 м при витраті композиту 30%.

Ключові слова: доменна піч, рудовугільний композит, відновлення оксидів заліза, газифікація вуглецю, термограми в доменній печі, термічно резервна зона доменної печі, зона когезії.

Аналіз стану питання.

Формування технологічних зон в доменній печі. Залізо та її продукція металургії це найважливіший матеріальний фундамент існування суспільства. Нині більшість заліза виробляється у доменних печах і конверторах. Серед більшості процесів доменна піч є найефективнішим агрегатом. Однак навіть у такому процесі є низка можливостей підвищення ефективності з погляду термодинаміки. Виникнення та існування зон у доменній печі обумовлено закономірностями теплообміну.

М.А. Павлов [1] відзначає наявність зони помірних температур 800-1000°C, в якій зміна температур йде повільніше, ніж у вище і нижче розташованих горизонтах за рахунок утворення вюститу. Початок розвитку теорії теплообміну у доменній печі викладено у роботах Б.І. Китаєва [2-4]. У процесі роботи доменної печі формується три чітко помітні зони: нижня (заплечики, розпар і нижня частина шахти), в якій у міру руху газу вгору відбувається швидке охолодження його; середня, де температура висхідного потоку газу залишається відносно постійною 800-1000°C; верхня (верхня чверть шахти), в якій відбувається відновлення оксидів Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO , швидке охолодження газу в міру руху вгору до рівня засипу. В основу аналізу теплообміну в доменній печі прийнято водяний еквівалент (теплоємність з урахуванням усіх фізичних та хімічних перетворень) газового потоку, який незначно змінюється по висоті печі, а водяний еквівалент шихти різко збільшується в області прямого відновлення, що йде з великою витратою теплоти.

У коксовій насадці доменної печі (нижня зона) реакція газифікації вуглецю коксу наближається до рівноваги і вуглецевмісний газ представлений тут оксидом вуглецю (реакція Будуара): $CO_2 + C = 2CO - 172$ мДЖ/кмоль CO , яка має високу енергію активації (360 мДЖ), тому її швидкість знижується при охолодженні газового потоку. В результаті при 1000°C діоксид вуглецю, що

утворився, вступає в реакцію з вуглецем, в результаті газифікації вуглецю утворюється окис вуглецю. Однак у середній зоні утворений вюстит не відновлюється через малу концентрацію CO.

У середній зоні доменної печі, де температура висхідного потоку газу залишається відносно постійною (800-1000°C, це термічна резервна зона). У верхній зоні (верхня чверть шахти) відбувається швидке охолодження газового потоку в міру руху до рівня засипки. В результаті висота верхньої зони не велика і температура газу на виході з печі \approx 100-200°C. Під час руху газового потоку у верхній зоні відновлюються вищі оксиди заліза Fe₂O₃, Fe₃O₄ до вюститу і починає збільшуватися концентрація CO₂ доменному газі.

Результатом цього є утворення по висоті доменної печі термічно резервної зони, в якій весь залізовмісний матеріал представлений виключно вюститом, який не відновлюється, коли склад газу наближається до рівноважного для системи FeO-Fe [5]. Вертикальна довжина термічно резервної зони в різних печах неоднакова, а при високій інтенсивності плавки ця зона може бути відсутньою [6]. Рівновага системи вюстит-залізо в цьому випадку не досягається і оксид вуглецю продовжує відновлювати залізо з вюститу.

До найбільш важливих зон доменної печі відноситься зона коксової насадки, термічно резервна зона в печі, які виконують роль своєрідного буфера, які хіба що згладжують недоліки, що виникають і цим забезпечують високу стабільність доменного процесу. Експериментальні дані про розподіл температур за висотою доменної печі дозволили встановити, що в міру скорочення витрати палива та відповідно кількості газів на одиницю шихти сучасної доменної плавки, скорочується висота резервної зони [7-10]. Не спостерігається цієї зони і вертикальних елементах печі з максимальним рудним навантаженням. Це пов'язано із зменшенням водяних еквівалентів шихти та газу [7].

Розрахунок О.М. Рама для реальних сучасних умов доменної плавки дає величину мінімальної різниці температур газу та шихти в середній зоні 50-150°C [8]. Прямі виміри Н.І. Красавцева однієї з доменних печей показали аналогічну величину у різних точках радіуса шахти 30-150°C [11]. Як і у М.А.Павлова, ці дані свідчать про уповільнення зміни температури в цій зоні.

Природно, ця зона відноситься до вюстити і не відбувається його відновлення. Тобто можна зазначити, що це хімічно резервна зона - верхня частина термічно резервної зони.

При зондуванні печі І.Г. Товаровський та В.П. Лялюк [6], зазначають, що чим ближче вертикаль зонда до перефірії, тим більше вимір йде у бік нижчих температур і тим яскравіше "ілюзія" уповільнення швидкості збільшення температур по висоті печі, тобто є наявність термічно резервної зони у вигляді ізотермічної ділянки висоти. Це підтверджується схемою теплообміну по висоті доменної печі при сучасній технології плавки чавуну, котра включає: верхню та нижню ділянки уповільненого теплообміну; зони відновлення гематиту, магнетиту та вюстити, зони непрямого та прямого відновлення. Встановлено дві ізотермічні ділянки [11, 12].

Таким чином, термічно "резервна зона" виникає як правило в середній зоні доменної печі в зоні уповільненого теплообміну. Саме в цій зоні знаходиться вюстит і при його відновлення утворюється CO_2 , при цих температурах в цій зоні не відбувається газифікація вуглецю. Очевидно, термічно резервна зона виникла, щоб її резерви використовувати для зниження температур нижче 1000°C і одночасним відновленням $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$ з подальшою газифікацією вуглецю $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ із суттєвим поглинанням теплоти та зниженням температури в термічно резервній зоні доменної печі. Доцільно використовувати цей обсяг печі термічно резервної зони, з метою завершення підготовки шихти для високотемпературних процесів розплавлення чавуну та шлаку.

Отримання рудо вугільних композитів в даний час є досить широко відомі способи підготовки залізорудної сировини у вигляді рудовугільних композицій [13-16]. При їх використанні в шихті забезпечуються процес відновлення вюстити і газифікації вуглецю в композиті. У термічно резервній зоні доменної печі, за рахунок реакції газифікації вуглецю, яка протікає із витратою теплоти, знижується температура у цій зоні [17]. Рудовугольні композити виробляються як при випаленні котунів, так і за рахунок отримання їх шляхом безвипалювальних котунів або брикетів, отриманих на цементній зв'язці.

Вперше виробництво обпалених композитів із суміші залізородного концентрату і вугілля було здійснено на дослідній фабриці окомкування, які були отримані з суміші залізородного концентрату з подрібненим вугіллям, суміш окомковувалася на чашевому грануляторі і окатиші обпалювалися на обпалювальній машині ОК-18. Композити характеризувалися такими показниками: Фезаг - 62.5-63.3%; FeO 28,8-31,3%; Фемет 2,3%; Індекс ударом 73,1-80,04%; стирання 10,8%; C = 1,1%.

Окатиші були проплавлені на металургійному заводі в двох доменних печах об'ємом по 400 м³, що виплавляли ливарний чавун. Одним з важливих показників цих котунів, це вміст вуглецю -1,1% . В шихту додавали 20% цих обкотишів, витрата коксу знизилась на 5,5% та збільшилась продуктивність на 8,7% [17].

Було вироблено промислову партію композитів на випалювальній машині ОК-278 об'ємом 21870 тонн, яка була проплавлена в доменних печах металургійного заводу ім. Петровського. Кількість досліджених окатишів у доменній шихті склала від 47 до 81% [18]. Дослідні окотиші містили 0,39% вуглецю. У перерахунку на масу таких окотишів вміст вуглецю в шихті 3,29 кг/тчав, що підвищило вміст FeO до 10,16%, зменшилась ступінь прямого відновлення з 31 до 30,6%, витрата коксу знизилась на 14 кг/тчав.

Рудовугільні композити були випробувані на діючій доменній печі в Кореї [15, 16], з використанням пристроїв, що моделюють. Було встановлено, що завантаження рудо вугільних композитів не надає негативного впливу на газопроникність шихтових матеріалів, на стабільність ходу шихти і на рівність ходу доменної печі. Відновлення залізовмісних матеріалів починається в зоні низьких температур і закінчується швидше порівняно з агломератом і окотишами. Результати дослідної плавки тривалістю в 80 діб на доменній печі на заводі Oita Works [16] показали зниження витрат коксу від 6,0 до 11,0 кг/тчав. Відзначається, що використання композиту є ефективним методом зниження витрат коксу в доменній плавці [15].

В Україні з 2005 року введено в експлуатацію фабрику з виробництва безобпальних обкотишів на портландцементній зв'язці з суміші пилу і шламів доменного та конверторного виробництва продуктивністю 120 тис. тонн

обкотишів на рік, основністю 1,5-1,7 [17-19]. Було вироблено 21000 тонн композиту з використанням пилів та шламів доменної печі з додаванням цементу. Вміст вуглецю у композиті становив 20%. Експерименти проводилися на доменній печі обсягом 5775 м³, витрата композиту 54 кг/тчав. Рудо вугільний композит завантажувався до району шару шихти, де відновлення менше – 500 мм від стінки колошника. Кошик з пробою композиту та агломерату опускався, коли зонд показував 900-950°C. Композит розташовувався між агломератом та коксом. Композит відновлювався раніше, ніж агломерат. Температура доменної печі в точці рівноваги при витраті композиту 54 кг/тчав, знизилася на 83°C. Встановлено, що при зниженні рівноважної температури кожен 1°C знижує витрату вуглецю на 0,05 кгС/1°C [17].

Реакції відновлення при зниженій температурі в шахті доменної печі забезпечують скорочення витрати відновлювального агента доменної печі, за рахунок підготовки шихти у вигляді композитів. Наведено залежність між початковою температурою ендотермічної реакції, відповідної реакції Будуара, та масою вуглецю в шихті [20-23]. Якщо проба композиту складається лише з коксу, то початкова температура ендотермічної реакції близько 1000°C. Ця температура значно знижувалася, коли вуглець знаходиться у складі композиту. Зі збільшенням у шихті вмісту вуглецю до 5% (за масою) початкова температура реакцій відновлення суттєво знижується до 750°C і при підвищенні вмісту вуглецю понад 5% залишається майже постійною [23]. У разі відповідності температур термічно резервної зони доменної печі та початкової температури реакцій Будуара зниження витрати відновлювального агента, завдяки зниженню температури термічно резервної зони доменної печі, зменшується витрата відновлювального агента.

Термічна резервна зона доменної печі є відмінними рисами неактивної зони. Резервні зони виникають спонтанно через термодинаміку та механізми реакції між відновленням залізовмісних оксидів і газифікацією вуглецю [23, 24]. Одна з умов контролюючих відновлення доменної печі - це зниження температури в термічно резервній зоні шляхом збільшення реактивності вуглецю коксу. Як поліпшення хімічної активності вуглецю, так і скорочення

крупності вуглецевмісного матеріалу, є методами збільшення реакційної здатності вуглецю.

Якщо швидкість відновлення оксидів заліза може збільшуватися та початкова температура реакції газифікації знижується ($C+CO_2=2CO-\alpha$), то внаслідок цього слід очікувати підвищення ефективності доменного процесу за рахунок повнішого відновлення. Зміна механізму реакції можна простежити в композитному рудовугільному окотиші, що наведені на рис.1. Початковою реакцією має бути реакція (3). Однак механізм подальших реакцій може відрізнятись і змінюватись в залежності від розташування вуглецю та оксидів заліза. У позицій (а) рис.1, реакція (3) ніколи не протікатиме, а реакції (1) та (2) домінуватимуть. Однак загальну ситуацію відновлення та газифікації важко пояснити, чому швидкість реакції прискорюється лише через циркуляцію газу. У цьому випадку існує лише одна можливість для пояснення цієї ситуації: відстань між частинками має бути мінімальною, тобто межа реакції має бути видимою одним та іншим матеріалом.

На підтвердження цієї теорії [22] були проведені експерименти, в яких відстань між поверхні графіту та оксиду заліза складала (1,2 та 0,5 мм). Експеримент проводили в атмосфері CO_2 та CO . Було встановлено, що початкова температура відновлення та газифікації в парі гематит-графіт в атмосфері CO - $250^\circ C$, тоді як температура окремого гематиту - $420^\circ C$. В атмосфері CO_2 температура цієї пари - $600^\circ C$, а газифікації графіту $900^\circ C$. Проведені експерименти показали, що між відновленням та газифікацією “coupling phenomenon” існує – це тісний контакт між дрібними частинками оксидів заліза та вуглецю, який формується в рудо-вугільному композиті

Експериментальні дослідження відновлення рудовугільних композитів

Композит отримували із суміші тонкоподрібнених матеріалів: шламів доменного та конверторного виробництв, хімічний склад: Fe_{3O_4} -43%, C -7-9%, CaO 12-16, SiO_2 -7-8%. Проба композиту розміром 5-10 мм завантажувалося в тигель і нагрівалася в електропечі в атмосфері аргону. Відновлення композиту проводили при температурах 900,1000 і $1100^\circ C$ протягом 150 і 240 хвилин. На рис. 2 наведено зміну маси проби залежно від тривалості експерименту та температури. Ступінь відновлення композиту за рахунок вуглецю, що

міститься в пробі, наведені в таблиці 1. Ступінь відновлення за рахунок вуглецю, що міститься в композиті, складає при витримці 150 хв - 67,5% - 68,7%, при витримці 240 хвилин 69,6% - 69,9%.

Композит роблять з суміші тонкоподрібнених залізородних матеріалів і вуглецьмістячих компонентів з добавкою в'язучої речовини. Тоді при нагріві усередині окотиша на контакті тверде – тверде ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{тв} - \text{Ств}$) відбувається процес відновлення по реакціях:



На рис. 1 схематично ілюструються різні механізми відновлення композиту з вуглецем, розміщеним в середині обпалювальних обкотишів, та вуглецем розташованим зовні обкотиша.

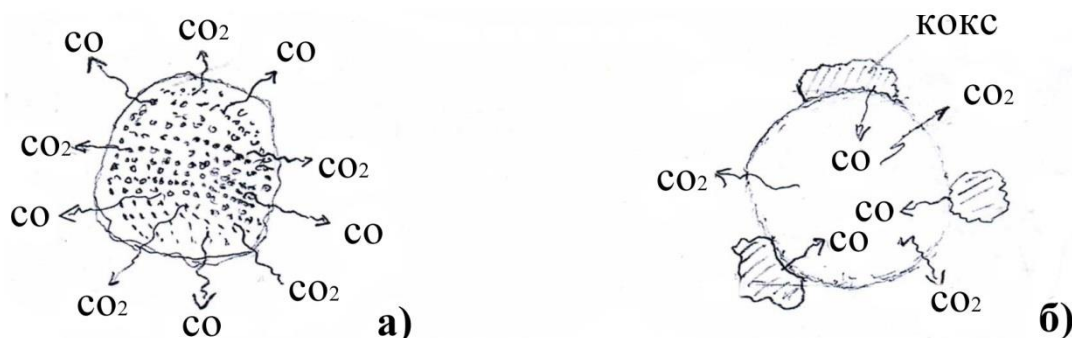


Рисунок 1 - Схема ілюструюча різні механізми відновлення:

- а) обкотиші, що самовідновлюються, реакції 1, 2 і 3 протікають у середині обкотиша;
- б) звичайні обпалені обкотиші: розташування вуглецю на їх поверхні.

Для імітації умов нагріву шихти, подібних до умов в доменній печі, перші 45 хвилин середня швидкість нагріву в електропечі підтримувалася $17^\circ\text{C}/\text{хв}$, потім її знижували до $4^\circ\text{C}/\text{хв}$. Досліди проводили таким чином. У робочий простір печі заздалегідь нагрітої до $200\text{--}220^\circ\text{C}$ встановлювали в підвішеному стані алундовий тигель з досліджуванним матеріалом. Після установки алундового тигля в електропеч опускається алундова трубка, через яку в піч подається аргон у кількості $0,5 \text{ дм}^3/\text{хв}$ впродовж 3 хвилин : витрата аргону в

перші хвилини була узята з обліку об'єму відновної камери рівною 0,5 дм³. Далі витрату аргону під час експерименту підтримували у кількості 0,1 дм³/хв. Впродовж усього експерименту температура в печі контролюється термопарою і реєструється автоматичним потенціометром.

Заздалегідь до процесу відновлення композит висушували в сушарній шафі при температурі 105±5°С до постійної маси. Відновленню в тиглі піддавали цілі обкотиші, розміром 10-15 мм, у кількості 4-5 штук, засипані коксиком, крупністю 3-7 мм - для створення слабо відновної атмосфери з метою зменшення окислення відновлених композит. Масу коксика визначали з умови збереження рудного навантаження, рівного 4. Відновлення композиту з витримкою впродовж 150 або 240 хвилин проводили при температурах 900, 1000 і 1100°С. Зміна маси проби в залежності від тривалості експерименту наведена на рис.3.



Рисунок 2 - Зміна втрати маси проби залежно від тривалості дослідження та температури в печі: закреслена область - витримка композиту протягом 150 хвилин при температурі 1000°С; ● - зміна температури в печі; ▲ - втрата маси наважки.

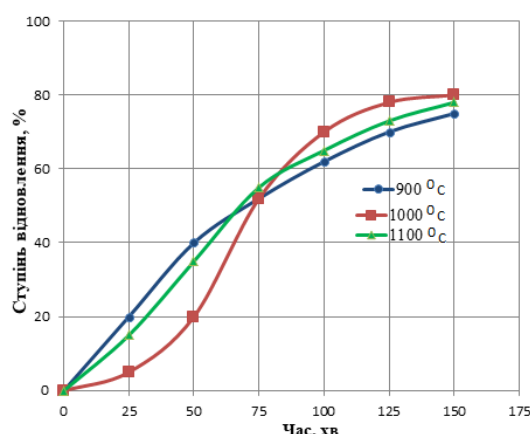
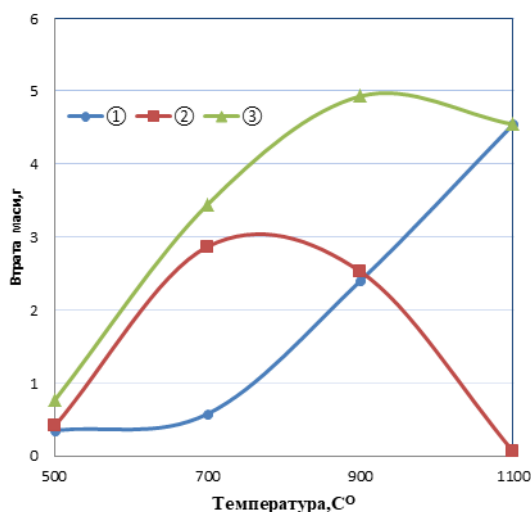


Рисунок 3 - Залежність ступеню відновлення від тривалості експерименту для композиту - 15,8% коксу в атмосфері аргону.

При температурах 900°C і 1100°C ступінь відновлення нижче 73,25% і 78,25% відповідно. Ступінь відновлення визначена по хімічному аналізу 84,6% - 85,7% відповідно. Ступінь відновлення за рахунок власного вуглецю, що міститься в обкотиші, склала 66-67% (рис.4).

Відновлення композиту в струмі водню.

Досліджували процес відновлення обкотишів композиту в струмені водню і їх міцність після відновлення. Відновлення здійснювали в трубчастій печі в інтервалі температур 500-1100°C в струмі водню (500 см³/хв). Досліджували обкотиші розміром 10-15 мм. При відновленні в струмі водню проба поміщалася в газопроникний кошик з нержавіючої сталі і нагрівалася до температури досліду в аргоні. Потім її відновлювали в струмі водню впродовж 30 хвилин (рис.4). Після цього пробу охолоджували в струмі аргону. Міцність відновлених гранул визначали по опору стискуванню. Ступень відновлення оцінювали по втраті маси. Експериментальні дані представлені на рис.5.



Риунок 4 - Залежність втрати маси композиту в процесі відновлення воднем від температури: ① – сумарна; ② – прогрівання до toC - експерименту; ③ – відновлення воднем

З експериментальних даних, приведених на рис.4, слідує, що при toC=500oC в процесі прогрівання втрата маси ~5-7%, що відповідає видаленню вологи гідрата і летких коксу. При 700o C - ступень відновлення воднем склала ~ 20%, тоді як вуглецем (час прогрівання) - 4-5%. При 900oC ступень

відновлення воднем і твердим вуглецем рівні по 14,0-15,0%. У інтервалі t_{0C} - 700-920 $^{\circ}C$ ступень відновлення за рахунок власного вуглецю склала 76,2%, а в інтервалі температур 700-1100 $^{\circ}C$ - 77,6%. Таким чином, проведені експерименти по відновленню композиту за рахунок власного вуглецю і водню показали, процес відновлення оксидів заліза у композиті приблизно на 2/3 відбувається за рахунок твердого вуглецю.

Обговорення експериментальних даних за результатами відновлення композиту.

У порівняння із загально прийнятим методом дослідження відновлення залізородних обкотишів в струмі відновного газу, представлена робота відрізняється: присутністю ендотермічних реакцій газифікації вуглецю діоксидом вуглецю, а також парами води при дегідратації зв'язки у композита, що складається з гідросилікатів кальцію; дуже великою питомою поверхнею і тісним контактом залізовмісних матеріалів і твердого палива, які і після реакцій на контактах розділені відстанню в мікрони.

Відновлення обкотишів, що містять оксиди заліза і частки твердого палива, не відбувається в ізотермічних умовах і процес відновлення протікає при істотних температурних градієнтах. Значна роль в цих процесах належить крупності частинок залізної руди і вуглецю. Розмір частинок шламів доменного і конверторного виробництв і коксика складає в основному 70-80% величину від 10 до 70 мкм. Відстань для CO_2 , щоб пройти від місця його появи (частинка шламу, що містить вуглець з оксидом заліза) до місця його зникнення може бути близько 100 мікрон в місцях з високою температурою, де активно протікає хімічна реакція. Ця дистанція порівнянна з середнім вільним пробігом молекул газів, що дозволяє зробити висновок про те, що перенесення маси газів не є лімітуючою стадією для швидкості реакції.

Теплоперенос в пористому просторі включає: теплопровідність, випромінювання і конвекцію. Відносні значення цих механізмів варіюються залежно від властивостей: твердої фази, структури пір, інтервалу температур і руху газу. Для даного випадку швидкість передачі теплоти випромінюванням на три порядки менша, ніж теплопровідністю. Зі збільшенням

теплопровідності шихти температура в системі і швидкість загальної реакції значно збільшується. Більше того, рання металізація збільшує термічну провідність реакційної суміші завдяки підвищеному вмісту металевого заліза. Усе це дає позитивний ефект, збільшуючи швидкість хімічної реакції.

Збільшення питомої швидкості хімічної реакції газифікації вуглецю має мінімальний ефект на швидкість загальної реакції. Це може бути пояснено таким чином. Збільшення швидкості ендотермічної реакції газифікації вуглецю пов'язане зі збільшенням швидкості споживання теплоти. Реакція газифікації вуглецю сама по собі також сильно залежить від температури. Швидке поглинання теплоти завдяки швидкій газифікації вуглецю матиме тенденцію до зниження локальної температури, яка веде до зниження локальної швидкості хімічної реакції. Виходячи з цього, можна припустити, що загальна кінетика реакції може контролюватися швидкістю теплопереноса, щоб ініціювати і підтримувати газифікацію вуглецю за рахунок CO_2 і H_2O .

Одна з переваг відновлення композиту полягає в тому, що при значній кількості тісних контактів між вуглецем і оксидами заліза протікає реакція прямого відновлення по двухзвенній схемі ($\text{FeO}_x + \text{CO} \rightarrow \text{FeO}_{x-1} + \text{CO}_2$; $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$). Причому, ці дві реакції протікають одночасно.

Дослідження показали високу швидкість реакцій відновлення заліза і газифікації вуглецю і низьку початкову температуру газифікації вуглецю 250-420°C [22]. Однією з причин цього явища, є рециркуляція газу в обкотиші, що виникає в результаті реакції прямого відновлення. Прискорення реакції відновлення відбувається за рахунок рециркуляції газу завдяки короткій відстані між частинами залізовмісних та вуглецевих композитів та їх розмірів., де відстань між ними коротка і межа реакції «видима» одним і іншим.

Таблиця 1

Розрахунок збільшення концентрації газу CO в відновлювальному газі за рахунок використання СВО

		Витрата СВО, 60 кг/Т _{чавуну}				Витрата СВО, 160 кг/Т _{чавуну}			
		8,8% C	9,5% C	16,2% C	24,7% C	8,8% C	9,5% C	16,2% C	24,7% C
Вихід газу CO	кг/Т _{чавуну}	5,3	5,7	9,7	14,8	14,1	15,2	25,9	39,5
Вихід газу CO	м ³ /Т _{чавуну}	9,9	10,6	18,1	27,6	26,32	28,3	48,3	73,7
Вихід горнового газу	м ³ /Т _{чавуну}	1692	1692	1692	1692	1668	1668	1668	1668
Вихід відновлювальних газів (вміст CO~40%)	м ³ /Т _{чавуну}	676,8	676,8	676,8	676,8	667,2	667,2	667,2	667,2
Об'єм газу CO, який виходить з СВО	м ³ /Т _{чавуну}	24,75	26,5	45,25	69,0	65,8	70,8	120,75	184,3
Самарна кількість відновлювального газу (CO)	м ³ /Т _{чавуну}	701,55	703,3	722	745,8	733	738	787,7	851,2
Збільшення концентрації в відновлювачі	%	3,52	3,8	6,3	9,3	9,0	9,6	15,2	21,7

Приймаємо витрату композитів: 60 та 160 кг/Т_{чавуну} ; вміст вуглецю в композиті: 8,8; 9,5; 16,2; 24,7. Оцінка впливу збільшення концентрації газу CO в відновлювальному газі: у зв'язку з відсутністю статистичних даних про вплив збільшення концентрації CO в газі відновлювачі, використали технологічні данні про вплив коксового газу. Коефіцієнт заміни коксу коксовим газом (вміст CO; H₂; CO₂ при використанні до 200 м³/т), складає 0,45 кг/м³.

Дослідження зміни температур за висотою доменної печі під час використання композиту

Композит (або брикети) виробляються із суміші шламів доменного та конверторного виробництва [18-20]шлами містять оксиди заліза та вуглець. Гранулометричний їх склад характеризується вмістом фракцій -45 мкм (95-97%), що відповідає теорії тісного контакту між вуглецем і оксидом заліза при виробництві композиту. Первинна реакція при нагріванні композиту

протікають між вуглецем і оксидом заліза з утворенням CO і відбувається їхнє роз'єднання. Після цього вже домінують реакції відновлення $FeO+CO \rightarrow Fe+CO_2$ та газифікація вуглецю $3+CO_2 \rightarrow 2CO-165,797$ мДЖ. Ці взаємодії відбуваються в тісному контакті. Остання реакція (реакція Будуара) має високу енергію активації (-360 мДЖ/Кмоль). Діоксид вуглецю, що утворюється, моментально взаємодіє з частинками вуглецю, що вимагає значних витрат теплоти, що знижує температуру в термічно резервній зоні доменної печі.

При моделюванні роботи доменної печі з використання рудо вугільного композиту – 0%, 10%, 20%, 30% було отримано ізотерми за висотою доменної печі, для температур 1200°C, 1400°C та відстань між цими ізотермами по висоті доменної печі. Виконано аналіз ізотерм за висотою доменної печі від рівня поверхні шлаку – 11,2 метрів до рівня засипу при змінній витраті композиту.

Вихідні дані для аналізу ізотерм: доменна піч ефективним об'ємом 2303 м³, діаметр горна 11,2 м, висота 25,2 м.

Оперативні умови показників дуття та вдування ПУТ:

Температура дуття -	1050°C;
Об'єм дуття -	4119 нм ³ /хв;
Збагачення киснем -	3,0 [моль - %];
Вологість дуття [H ₂ O/нм ³]	2,3;
ПУТ	8,0 [кг/сек];
Температура [°C]	2124;

Фізичні властивості агломерату та композиту:

Fezag%	59,4...52,7
Температура при	25 25
Завантаження:	
Щільність кг/м ³	3500... 4200
Чинник форми	0,84... 0,95
Діаметр, мм	16, 30, 15

Анализ ізотерм по висоті печі, яка працює з використанням композитів

Таблиця 2

Положення ізотерм по висоті та радіусу

Відстань	Витрата СВО	0%	10%	20%	30%
м	Ізотерма по висоті 1200°C	11,2	9,8	8,0	6,2
м	Ізотерма по висоті 1400°C	9,1	8,0	6,5	5,3
м	Ізотерма по ширині 1200-1400°C	2,1	1,8	1,5	0,9

Цифри в таблиці Звідносяться до положення ізотерм 1200°C периферії в метрах від рівня шлаку. З отриманих даних випливає, що зі збільшенням витрати композиту, положення термічно резервної зони знижується з 11,2 до 6,2 м при 30% композиті. Різниця температур ізотерм 1200-1400°C відноситься до положення зони когезії. Ширина між цими температурами скорочується із збільшенням витрати композиту із 2,1 метра без завантаження композитів до 1,8 м; 1,5; 0,9; при 10%, 20% та 30% композиту відповідно.

Інтервал ізотерм 1200-1400°C визначається як зона когезії. Вона зміщується висотою шахти з 11,2 м до 6,2 м від рівня поверхні шлаку. Це пов'язано насамперед із зниженням рівня температур у термічно резервній зоні доменної печі. У цьому дослідженні верхня межа температур термічно резервної зони становить 11,2 м від рівня поверхні шлаку і відповідає 1000°C без завантаження композиту. При завантаженні 30% композиту температура термічно резервної зони доменної печі знижується до 750°C, а при 20% до - 800°C і для 10% до - 900°C. У верхній позиції залізовмісні оксиди представлені вюститом, як було показано вище. І ця температура відповідає температурі реакції Будуара, тобто, вюстит не відновлюється ні прямо, не побічно. Поява композитів у цій зоні активує процес відновлення та газифікації вуглецю. Присутність композиту з тонкоподрібнених частинок вуглецю та оксидів заліза (до менше 50 мкм) ініціює реакцію відновлення вюститу та газифікацію вуглецю вже при температурах 800-900°C, що відповідає теорії тісного контакту між залізовмісними та вуглецьвмісними компонентами композитів.

Висновки

1. Розглянуто основи фізико-хімічних процесів у доменній печі з погляду утворення технологічних зон, що забезпечують ефективність доменного процесу. В зв'язку з цим, було досліджено існування термічно резервної зони доменної печі, що забезпечує підготовку шихти для розплавлення у вигляді шлаку та чавуну.

2. Розглянуто можливості процесів відновлення оксидів заліза та газифікації вуглецю в рудовугільному композиті, що додаються в шихту. Ці дві реакції, що протікають між тонкоподрібненими матеріалами композиту, забезпечують зниження температури відновлення та газифікації. Останнє обґрунтовано теорією перебігу процесів при тісному контакті тонкоподрібнених оксидів заліза та вуглецю, коли межа реакції спільна двом учасникам процесу.

3. Наведено експериментальні матеріали щодо відновлення рудовугільних композитів. Встановлено, що ступінь відновлення композиту за рахунок вмісту тонкоподрібненого вуглецю становить 66,0-67,0%.

4. Моделюванням доменного процесу отримано ізотерми температур за висотою доменної печі, визначено їх параметри за висотою. Проаналізовано зміни параметрів ізотерм 1200-1400°C, що визначають зони когезії доменної печі. Показана як за рахунок зниження температур у хімічній термічно резервній зоні, зменшується розміри зони когезії і вона зміщується нижче.

5. На основі аналізу термограм по висоті доменної печі встановлено положення термічно резервної зони доменної печі, яка переміщається з висоти печі з 11,2 м під час роботи без композиту до 9,8 м, 8,0 м та 6,2 м відповідно зі збільшенням витрати композиту на 10, 20, 30%

6. Вперше встановлені зони когезії по ширині з використанням відстані між ізотермами 1200-1400°C, що змінюються з 2,1 м при роботі без композиту до 1,8 м, 1,5 м.

ЛІТЕРАТУРА

1. М.А. Павлов. Металургія чавуну. М. 1949 р.-628 с.
2. Б.І, Китаєв. Теплообмін у шахтних печах, М., Metallurgizdat, 1945 р.
3. Б.І. Китаєв, Схема теплообміну в доменній печі і підготовка руд до плавки // Сталь - 1944 - №7-8.

4. Б.І.Китаєв, Ю.Г. Ярошенко і Б.Л. Лазарєв. Теплообмін у доменній печі // М. Металургія, 1966 -355 с.
5. Д.Г. Пісі, В.Г. Давенпорт. Доменний процес - Теорія і практика- М. Металургія. 1984 - с. 27.
6. І.Г. Товаровський, В.П. Лялюк. Еволюція доменної плавки. Дніпропетровськ, Пороги 2001. С. 61-69, 424с.
7. С.В. Шаврін, А.В. Ченцов. Вибір рівнянь для аналізу теплообміну в доменних печах // Форсування доменної плавки / праці наукових конференцій з теорії вип. металургії чавуну. металургій. металургвидав. 1963 - с169-172.
8. А.Н. Рамм. Сучасний доменний процес М. / Металургія - 1980. 304 с.
9. Введення в сучасний доменний процес. Геердес М., Токсопеус Х. 2004. ISBN: 572379871318
10. Дослідження взаємозв'язку розподілу температури та хімічного складу газового потоку за радіусом доменної печі / В.І. Большаков, В.В. Лебедь // Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. Лебідь // Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії: Зб. наук. тр. - Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2006. Вип. 13. С.27-35. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/21625>
11. М.І. Красавцев, В.Ф. Кузьменко. Дослідження теплообмінних процесів у шахті доменної печі об'ємом 2300 м³// Металургія чавуну: Збірник праць. Випуск 18. ДонНДІЧерМет. М.: Металургія, 1970. С. 91-102.
12. М.М. Бабарикін. Вплив відновлювальних процесів на теплообмін у доменній печі // Сталь. 1981 №3. С.5-9.
13. Treatise on Process Metallurgy. Volume 3: Industrial Processes. 2014, Pages 2-88. Chapter 1.1 – Ironmaking. Yongxiang Yang, Kalevi Raipala, Lauri Holappa. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00017-1>
14. STACHURA, R. Determination of the reserve zone localization in the working area of blast furnace. *HutnikWiadomoci Hutnicze* vol. 80, No. 11 2013 pp.752-756.
15. Hirokazu Yokoyama, Kenichi Higuchi, Takashi Ito, Akiyoshi Oshio. Decrease in Carbon Consumption of a Commercial Blast Furnace by Using Carbon Composite Iron Ore. *ISIJ International*, Vol. 52 (2012), No. 11, pp. 2000–2006. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.52.2000>
16. K. Higuchi, K. Kunitomo and S. Nomura. Reaction Behaviors of Various Agglomerates in Reducing the Temperature of the Thermal Reserve Zone of the Blast Furnace : *ISIJ International*, V 60, (2020), №11, pp.2366-2375. DOI:10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-115
17. Д.А. Ковальов, Б.П. Крикунов, А.А. Ванюков. Ефективність застосування гранульованого вуглецевмісного залізофлюсу в доменній плавці. /ВАТ «Черметінформація». Бюллетень «Чорна металургія» - 2012 №7 -с.49-54.
18. Ковальов Д. А., Ванюкова Н. Д., Ванюков А. А. Виробництво і використання самовідновлювальних окатишів у доменній плавці із застосуванням пиловугільного палива // Металургійна і гірничорудна промисловість. - 2013 - №1 - С. 13-15.
19. Ковальов Д.А., Ванюков А.А., Крикунов Б.П. Виробництво високоосновних самовідновлювальних окатишів на цементній зв'язці та доменна плавка з їх використанням. // «Металургійна та гірничорудна промисловість». - 2014. -№5. - С. 2-4.
20. *ISIJ International*. Volume 41 (2001). Issue 8. Reaction Behavior of Facing Pair between Hematite and Graphite: A Coupling Phenomenon of Reduction and Gasification. Yoshiaki Kashiwaya, Motomichi Kanbe, Kuniyoshi Ishii. *JOURNAL FREE ACCESS*. 2001. Volume 41. Issue 8. Pages 818-826. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.818>

21. A. Kasai and Y. Matsui. Lowering of thermal Reserve Zone Temperature in Blast Furnace by Adjoining Carbonaceous Material and Iron Ore. ISIJ International, vol 44 (2004), №12, pp. 2073-2078. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.2073>
22. A Numerical Study on the State of the Blast Furnace Thermal Reserve Zone under Different Starting Temperatures of Coke Solution Loss Reaction. Fanchao Meng, Lei Shao, Wenjie Ni, Zongshu Zou. 2022. <https://doi.org/10.1002/srin.202100823>
23. ISIJ International/Volume 52 (2012) Issue 11. Decrease in Carbon Consumption of a Commercial Blast Furnace by Using Carbon Composite Iron Ore. Hirokazu Yokoyama, Kenichi Higuchi, Takashi Ito, Akiyoshi Oshio. JOURNAL OPEN ACCESS. Pages 2000-2006 DOI <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.2000>
24. ISIJ International/Volume 44 (2004) Issue 12. Lowering of Thermal Reserve Zone Temperature in Blast Furnace by Adjoining Carbonaceous Material and Iron Ore. Akito Kasai, Yoshiyuki Matsui. JOURNAL FREE ACCESS. Pages 2073-2078 DOI <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.2073>

REFERENCES

1. M.A. Pavlov. Metalurhiia chavunu. M. 1949 r.-628 s.
2. B.I. Kytaiev. Teploobmin u shakhtnykh pechakh, M., Metallurhyzdat, 1945 r.
3. B.I. Kytaiev, Skhema teploobminu v domennii pechi i pidhotovka rud do plavky // Stal - 1944 - №7-8.
4. B.I. Kytaiev, Yu.H. Yaroshenko i B.L. Lazariiev. Teploobmin u domennii pechi // M. Metalurhiia, 1966 -355 s.
5. D.H. Pisi, V.H. Davenport. Domennyi protses - Teoriia i praktyka- M. Metalurhiia. 1984 - s. 27.
6. I.H. Tovarovskyi, V.P. Lialiuk. Evoliutsiia domennoi plavky. Dnipropetrovsk, Porohy 2001. S. 61-69, 424s.
7. S.V. Shavrin, A.V. Chentsov. Vybir rivnian dlia analizu teploobminu v domennykh pechakh // Forsuvannia domennoi plavky / pratsi naukovykh konferentsii z teorii vyp. metalurhii chavunu. metalurhii. metalurhvydav. 1963 - s169-172.
8. A.N. Ramm. Suchasnyi domennyi protses M. / Metalurhiia - 1980. 304 s.
9. Vvedennia v suchasnyi domennyi protses. Heerdes M., Toksopeus Kh. 2004. ISBN: 572379871318
10. Doslidzhennia vzaiemozviazku rozpodilu temperatury ta khimichnoho skladu hazovoho potoku za radiusom domennoi pechi / V.I. Bolshakov, V.V. Lebed // Fundamentalni ta prykladni problemy chornoj metalurhii. Lebid // Fundamentalni ta prykladni problemy chornoj metalurhii: Zb. nauk. tr. - Dnipropetrovsk.: IChM NAN Ukrainy, 2006. Vyp. 13. S.27-35. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/21625>
11. M.I. Krasavtsev, V.F, Kuzmenko. Doslidzhennia teploobminnykh protsesiv u shakhti domennoi pechi obiemom 2300 m3// Metalurhiia chavunu: Zbirnyk prats. Vypusk 18. DonNDICherMet. M.: Metalurhiia, 1970. S. 91-102.
12. M.M. Babarykin. Vplyv vidnovliuvalnykh protsesiv na teploobmin u domennii pechi // Stal. 1981 №3. S.5-9.
13. Treatise on Process Metallurgy. Volume 3: Industrial Processes. 2014, Pages 2-88. Chapter 1.1 – Ironmaking. Yongxiang Yang, Kalevi Raipala, Lauri Holappa. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00017-1>
14. STACHURA, R. Determination of the reserve zone localization in the working area of blast furnace. HutnikWiadomoci Hutnicze vol. 80, No. 11 2013 pp.752-756.
15. Hirokazu Yokoyama, Kenichi Higuchi, Takashi Ito, Akiyoshi Oshio. Decrease in Carbon Consumption of a Commercial Blast Furnace by Using Carbon Composite Iron Ore. ISIJ

- International, Vol. 52 (2012), No. 11, pp. 2000–2006.
<http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.52.2000>
16. K. Higuchi, K. Kunitomo and S. Nomura. Reaction Behaviors of Various Agglomerates in Reducing the Temperature of the Thermal Reserve Zone of the Blast Furnace : ISIJ International, V 60, (2020), №11, pp.2366-2375.
DOI:10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-115
17. D.A. Kovalov, B.P. Krykunov, A.A. Vaniukov. Efektyvnist zastosuvannya hranulovanoho vuhletsevmisnogo zalizofliusu v domennii plavtsi. /VAT «Chermetinformatsiia». Biulliten «Chorna metalurhiia» - 2012 №7 -s.49-54.
18. Kovalov D. A., Vaniukova N. D., Vaniukov A. A. Vyrobnystvo i vykorystannia samovidnovliuvalnykh okatyshiv u domennii plavtsi iz zastosuvanniam pylovuhilnoho palyva // Metalurhiina i hirnychorudna promyslovist. - 2013 - №1 - S. 13-15.
19. Kovalov D.A., Vaniukov A.A., Krykunov B.P. Vyrobnystvo vysokoosnovnykh samovidnovliuvalnykh okatyshiv na tsementnii zviatzi ta domenna plavka z yikh vykorystanniam. // «Metalurhiina ta hirnychorudna promyslovist». - 2014. -№5. - S. 2-4.
20. ISIJ International. Volume 41 (2001). Issue 8. Reaction Behavior of Facing Pair between Hematite and Graphite: A Coupling Phenomenon of Reduction and Gasification. Yoshiaki Kashiwaya, Motomichi Kanbe, Kuniyoshi Ishii. JOURNAL FREE ACCESS. 2001. Volume 41. Issue 8. Pages 818-826. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.818>
21. A. Kasai and Y. Matsui. Lowering of thermal Reserve Zone Temperature in Blast Furnace by Adjoining Carbonaceous Material and Iron Ore. ISIJ International, vol 44 (2004), №12, pp. 2073-2078. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.2073>
22. A Numerical Study on the State of the Blast Furnace Thermal Reserve Zone under Different Starting Temperatures of Coke Solution Loss Reaction. Fanchao Meng, Lei Shao, Wenjie Ni, Zongshu Zou. 2022. <https://doi.org/10.1002/srin.202100823>
23. ISIJ International/Volume 52 (2012) Issue 11. Decrease in Carbon Consumption of a Commercial Blast Furnace by Using Carbon Composite Iron Ore. Hirokazu Yokoyama, Kenichi Higuchi, Takashi Ito, Akiyoshi Oshio. JOURNAL OPEN ACCESS. Pages 2000-2006
DOI <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.2000>
24. ISIJ International/Volume 44 (2004) Issue 12. Lowering of Thermal Reserve Zone Temperature in Blast Furnace by Adjoining Carbonaceous Material and Iron Ore. Akito Kasai, Yoshiyuki Matsui. JOURNAL FREE ACCESS. Pages 2073-2078
DOI <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.2073>

Received 11.02.2024.

Accepted 15.03.2024.

UDC 622.778.873.6

A. A.Vanyukov, L.V.Kamkina, V.P.Ivashchenko, Ya.V.Myanovska, P.O.Sazonov

**ANALYSIS OF THE CONDITION OF THE THERMAL RESERVE ZONE OF
THE BLAST FURNACE WHEN USING COAL COMPOSITIONS
IN THE CHARGE**

The emergence and existence of zones in the blast furnace due to the laws of heat exchange are considered. In the middle zone of the blast furnace, the temperature of the

outgoing gas stream remains relatively constant and no chemical processes occur in it. This is the "thermal reserve zone", the upper part of this zone - the "chemical reserve zone" is represented by wustite, which is not restored. The reserve of this zone is the formation of a gas phase. When additives are added to the charge of ore-coal compositions, iron oxides are reduced ($t=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) by the reaction $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{C}=\text{Fe}_3\text{O}_4+\text{CO}_2$ and carbon gasification $\text{CO}_2+\text{C}=2\text{CO}$ (Boudoir reaction). The resulting gas phase (CO) intensively reduces iron oxides. Composites for blast furnace smelting are produced from a mixture of blast furnace slurries with cement additives. The mixture is processed into coal pellets or briquettes. Blast furnace smelting at metallurgical plants in Ukraine, South Korea, and Japan has shown that the use of ore-coal composites is an effective additive to the charge of blast furnace smelting to reduce coke consumption. The coal-coal composite effect is based on the theory of "Coupling Phenomenon" between carbon and iron-containing materials in the composite pellet. Their interaction takes place, as research has shown, at temperatures of $250\text{-}420^{\circ}\text{C}$ in a CO atmosphere. Taking into account the Boudoir reaction, the temperature in the thermal reserve zone of the blast furnace decreases by $80\text{-}200^{\circ}\text{C}$. Thus, in the chemical reserve zone, the recovery of wustite does not occur at 1000°C , but at $920\text{-}800^{\circ}\text{C}$, and it moves closer to the zones of iron and slag formation. The article analyzes thermograms in a blast furnace taking into account red coal deposits. Chemically, the reserve zone is located in the middle of the mine (from the slag surface) 11.2 m. With an increase in the consumption of composite in the charge (30%), the position of the reserve zone decreases from 11.2 to 6.2 m. The width between the thermograms of 1200°C - 1400°C is a characteristic zone of cohesion, with an increase in the consumption of the composite, it decreases from 2.1 m t (without loading the composite) to 0.9 m with a consumption of the composite of 30%.

Keywords: blast furnace, ore-coal composite, recovery of iron oxides, carbon gasification, thermograms in a blast furnace, thermal reserve zone of a blast furnace, cohesion zone.

Ванюков А.А., Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна.

Камкіна Л.В., Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна.

Іващенко В.П., Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна.

Мяновська Я.В., Український державний університет науки і технологій,
Дніпро, Україна.

Сазонов П.О., ДП «Дніпростандартметрологія», Дніпро, Україна.

Vanyukov A. A., Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine

Kamkina L.V., Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine

Ivashchenko V.P., Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine

Myanovska Ya.V., Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine

Sazonov P.O., SE "Dniprostandartmetrologiya", Dnipro, Ukraine