

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 622.781:622.788.3

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226183

© Чупринов Є.В.¹, Журавльов Ф.М.², Лялюк В.П.³,
Кассім Д.О.⁴, Шмельцер К.О.⁵**ОФЛЮСОВАНІ ЛОКАЛЬНІ СПЕКИ – ОГРУДКОВАНА ЗАЛІЗОРУДНА
МОНОСИРОВИНА ДЛЯ СУЧАСНОЇ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ**

Розроблено і випробувано технології отримання нових видів огрудкованого залізорудного матеріалу і моносировини для доменної плавки, що володіють кращими металургійними характеристиками агломерату і окатишів та мають в своєму складі підвищений вміст заліза і залишковий вуглець. Використання цього матеріалу в доменному виробництві дозволить істотно поліпшити техніко-економічні показники виплавки чавуну.

Ключові слова: агломерат, окатиші, локальні спеки, моносировина, залишковий вуглець.

E.V. Chuprinov, F.M. Zhuravlev, V.P. Lyalyuk, D.O. Kassim, K.O. Shmeltser. Fluxed local cakes - lumped mono-raw materials for modern blast furnace. The technology of obtaining fluxed local cakes from iron ore concentrates of different degree of separation has been developed and tested. It has been shown that from one concentrate with different content of SiO₂ (1-10%) it is possible to produce fluxed local cakes consisting of a mixture of different basic raw pellets: low-basic – high-temperature and high-basic – low-temperature. Taking into account the positive effect of increasing the iron content in iron ore raw materials on the productivity of the blast furnace and the specific consumption of coke, a method for the production of fluxed local cakes with higher iron content than it is in the sinter and pellets, has been developed. The method is used for the production of fluxed local cakes with a high content of residual carbon due to the use of less scarce and cheap varieties of solid fuels instead of expensive and scarce metallurgical coke. Technological possibilities, indicators of production and metallurgical characteristics of fluxed local cakes have been analyzed. It has been shown that it is technologically possible to obtain a complex fluxed lumpy material with all these metallurgical characteristics, that is local cakes with high iron content and residual carbon. The technology for obtaining such material, which rationally and simultaneously used the above elements of technologies with some technological simplifications has been developed and tested. At the last stage the technology of obtaining mono-raw materials in the form of fluxed local cakes with rolling of a certain thickness shell from high-temperature charge on pieces of anthracite and metallized pellets to prevent their oxidation, which significantly reduces the oxidation of carbon in solid fuels and metallization, was developed.

¹ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-8605-3434, itcupa@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг

³ д-р техн. наук, професор, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-7258-2079, vitalij.lyalyuk@gmail.com

⁴ д-р техн. наук, професор, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-1750-1237

⁵ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-6830-8747

Keywords: *agglomerate, metallized pellets, local cakes, mono-raw materials, residual carbon.*

Постановка проблеми. Традиційні способи вдосконалення технології доменної плавки для підвищення продуктивності печі і зниження питомої витрати коксу в значній мірі вичерпані. Найбільш значимі з них були: збільшення обсягу доменних печей; вдування в фурми печей природного і коксового газів, мазуту, ПВП; збагачення дуття киснем; нагрів дуття до максимально необхідної температури; підвищення тиску газу на колошнику; заміна частини металургійного коксу кусковим антрацитом; автоматизація технології виплавки чавуну; поліпшення металургійних характеристик коксу і залізородного огрудкованого матеріалу та інші менш значущі чинники. Всі зазначені способи вдосконалення технології доменної плавки практично реалізовані в доменному виробництві за винятком одного – створення огрудкованої залізородної моносировини з необхідними для доменної плавки показниками комплексу металургійних характеристик [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними традиційними огрудкованими залізородними матеріалами в доменній плавці є офлюсований (основністю 0,1-1,8 одиниць) агломерат і неофлюсований або офлюсований (основністю 0,1-1,25 од.) окатиші. Кожен з цих матеріалів має позитивні і негативні, стосовно до використання в доменній плавці, характеристики в комплексі їх металургійних властивостей [2]. Принциповою відмінністю в технологіях виробництва агломерату та окатишів, що впливає на їх металургійні характеристики, є склад шихти і наявність в кінцевій структурі кількості продуктів, що утворилися при охолодженні різної кількості розплаву (30-60% при спіканні агломерату і 4-20% при обпаленні окатишів) в процесі термозміцнення.

Багатьма дослідниками розроблялися технології, що дозволяють поліпшити металургійні характеристики агломерату і обпалених окатишів, зокрема у роботах [3, 4]. Однак досягти металургійних характеристик, котрі б повністю відповідали вимогам доменної плавки, а також забезпечити оптимальні технологічні параметри їх промислового виробництва на працюючих потужностях, не представлялося можливим.

Для ефективної роботи доменної печі потрібен однорідний за хімічним складом і крупністю повністю офлюсований ($\text{CaO/SiO}_2 = 1,2-1,5$ од. для різних умов плавки) огрудкований (розміром 10-60 мм) залізородний матеріал з максимально високим економічно доцільним вмістом заліза, бажано з максимально допустимим для виробництва матеріалу вмістом залишкового вуглецю, мінімальним вмістом кремнезему і шкідливих домішок, а також з необхідними корисними добавками. Крім того, цей огрудкований залізородний матеріал повинен володіти всіма позитивними металургійними характеристиками агломерату та окатишів як в процесі механічних навантажень при складуванні, перевантажень і транспортування, так і в процесі фізико-хімічних перетворень при відновленні в доменній печі. Крім того, цей матеріал не повинен мати негативних металургійних характеристик агломерату та окатишів [5].

Мета статті – розробка технології отримання огрудкованої залізородної моносировини для сучасної доменної плавки.

Виклад основного матеріалу. Технологія отримання такого огрудкованого матеріалу розроблялася на основі формування шару сирих окатишів, що складається з двох шихт: з однієї шихти виготовляються окатиші з відносно високою (вище 1500°C) температурою плавлення, кількість яких в суміші має становити від 60 до 95%; з іншої шихти виготовляються окатиші з відносно низькою (нижче 1250°C) температурою плавлення, кількість яких в суміші має становити від 40 до 5%. Окатиші з високою температурою плавлення служать каркасом, що формує міцність окускованого матеріалу. Окатиші з низькою температурою плавлення є джерелом утворення розплаву, що рівномірно розподіляється в певних обсягах високотемпературних окатишів та скріплює їх після охолодження і формує шматки заданих розмірів [6, 7].

Всі технологічні випробування проводили з використанням напівпромислової установки, в яку входили бункера з дозаторами компонентів шихти, змішувач і огрудкувач шихти, футерована обпалювальна чаша корисними діаметром 300 мм і висотою 500 мм, з розробленою універсальною схемою газопотоків теплоносія, що дозволяє обробляти шар матеріалу з заданими температурою і вмістом в ньому кисню (рис.).

На першому етапі розробки нового продукту випробувана технологія отримання офлюсованих локальних спеків із залізорудних концентратів різного ступеня збагачення. Окаатиші з високою температурою плавлення отримували або з концентрату, що містить 1-10% SiO_2 і офлюсованого магнієвмісним вапняком до основності 0,1-0,7 од., або з концентрату, що містить 1-5% SiO_2 і офлюсованого магнієвмісним вапняком до необхідної основності готового продукту $\text{CaO/SiO}_2 = 1,2-1,5$ од. [6]. Окаатиші з низькою температурою плавлення отримували або з концентрату, що містить 1-10% SiO_2 і офлюсованого вапняком до основності $\text{CaO/SiO}_2 = 4,3-8,7$ од., що забезпечує задану основність всього огрудкованого матеріалу, або з концентрату, що містить 6-10% SiO_2 і офлюсованого вапняком до основності готового продукту $\text{CaO/SiO}_2 = 1,2-1,5$ од. Необхідну основність, крупність і міцність локальних спеків отримували шляхом вибору певного співвідношення високотемпературних і низькотемпературних (відповідно, 71-95% і 29-5%) сирих окаатишів в суміші перед їх термозміцненням. Крупність високотемпературних сирих окаатишів була 14-20 мм, а низькотемпературних – 8-14 мм. Суміш низько- і високотемпературних сирих окаатишів завантажувалася в агрегат для термообробки згідно наступного режиму: сушка – 350-450°C, нагрівання – 600-1200°C, високотемпературне обпалення – 1250-1350°C і охолодження – до 100-130°C. Швидкості нагріву до максимальної температури обпалення і охолодження до 100-130°C становили до 100°C/хв. Таким чином, з одного концентрату з різним вмістом SiO_2 (1-10%) можна виробляти офлюсовані локальні спеки з суміші різноосновних сирих окаатишів: низькоосновних – високотемпературних і високоосновних – низькотемпературних.

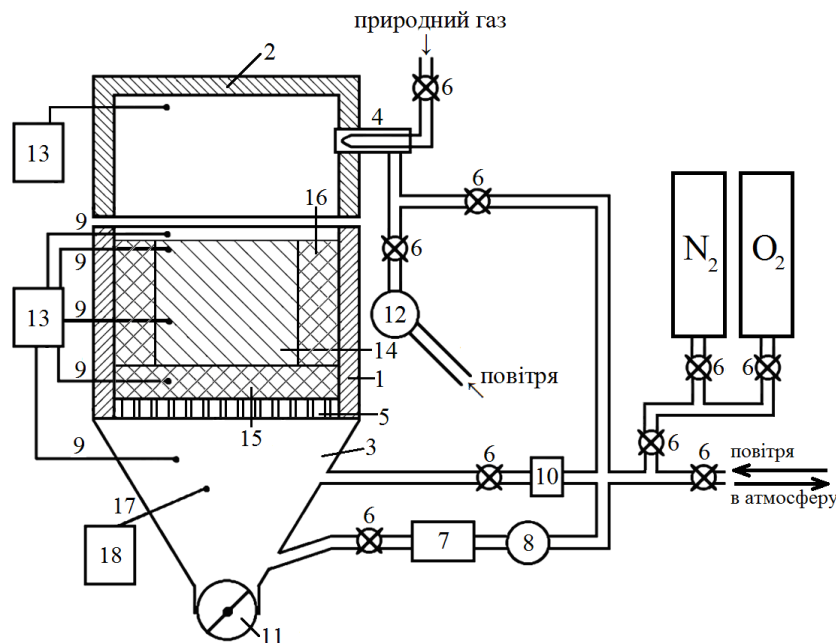


Рисунок – Технологічна схема установки для обпалення окаатишів: 1 – чаша для обпалення окаатишів; 2 – горн чаші; 3 – вакуум-камера чаші; 4 – пальник для спалювання газу; 5 – колосникова решітка чаші; 6 – запірні газова арматура; 7 – апарат для тонкої очистки та охолодження відпрацьованого газу, що відсмоктується; 8 – вакуум-насос; 9 – термопари для вимірювання температури; 10 – вентилятор для подачі в вакуум-камеру холодних повітря або відпрацьованих газів; 11 – затвор вакуум-камери для випуску твердих частинок; 12 – вентилятор повітря для пальника; 13 – потенціометр для вимірювання температури; 14 – шар окаатишів і локальних спеків, що обпалюються; 15 – донна постіль; 16 – бортова постіль; 17 – патрубок для відбору газу з вакуум-камери; 18 – вимірювач розрідження/тиску в вакуум-камері і газоаналізатор

Технологічні параметри та металургійні характеристики отриманих офлюсованих локальних спеків 1 показали, що при приблизно однаковій з виробництвом агломерату та окаатиша-

ми питомій продуктивності агрегатів і основності готового продукту, питома витрата енергоресурсів (теплоти і електроенергії) у виробництві локальних спеків 1 нижча ніж у агломерату і однакова з окатишами (табл. 1). Вміст заліза в локальних спеках 1 вище ніж в агломераті і однаковий з окатишами при однаковій основності. Гранулометричний склад готового продукту краще, а вміст дріб'язку нижче ніж у агломераті. Барабанна міцність в початковому стані і міцність при відновленні у локальних спеків 1 порівнянна з окатишами і вище ніж у агломерату. Показники газопроникності і усадки шару під час відновлення у локальних спеків 1 порівнянні з агломератом і краще ніж у окатишів. Середня кінцева ступінь відновлення всіх вивчених огрудкованих залізородних матеріалів (агломерат, окатиші, локальні спеки 1) практично однакова. Кут природного укосу у локальних спеків 1 аналогічний агломерату і коксу і вище ніж у окатишів.

Таблиця 1

Технологічні показники виробництва і металургійні характеристики промислових і розроблених огрудкованих залізородних матеріалів

| Показники | Промислові офлюсовані агломерати в різних країнах | Промислові неофлюсовані і офлюсовані окатиші в різних країнах | Спеки 1. З концентратів з різним вмістом кремнезему, різною і однаковою основністю | Спеки 2. З підвищеним вмістом заліза без оболонки з високотемпературної шихти на металізованих окатишах |
|--|---|---|--|---|
| Питома продуктивність, т/(м ² ·год) | 1,1-1,4 ¹ | 0,8-1,2 ² | 0,9-1,2 ² | 1,0-1,3 ² |
| Питома витрата теплоти, МДж/т | 1947-2452 | 367-840 | 427-760 | 392-743 |
| Питома витрата електроенергії, кВт·год/т | 43,1-71,3 | 38,7-69,5 | 40,7-63,1 | 36,2-60,4 |
| Вміст, %: Fe _{заг.} | 51,2-64,1 ³ | 61,5-65,8 ³ | 63,5-64,8 ³ | 63,4-74,7 ³ |
| FeO | 9,1-15,6 ³ | 1,3-5,4 ³ | 7,6-15,2 ³ | 2,1-3,8 ³ |
| SiO ₂ | 3,7-10,4 | 0,9-7,7 | 7,1-4,3 | 2,2-4,2 |
| вуглецю | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Основність (CaO/SiO ₂) готового продукту, од. | 1,2-1,8 | 0,03-1,25 | 0,8-1,5 | 1,25-1,5 |
| Вміст класів, %: | | | | |
| 60-100 мм | 23,7-35,6 | 0 | 0 | 0 |
| 20-60 мм | 34,3-55,9 | 0 | 82,4-73,5 | 85,3-72,4 |
| 5-20 мм | 12,3-7,8 | 94,8-98,2 | 15,8-24,2 | 12,6-24,4 |
| 0-5 мм | 20,4-8,1 | 5,2-1,8 | 1,8-2,3 | 2,1-3,2 |
| Міцність на стиснення, кН/ок (ДСТУ ISO 4700:2005) | – | 1,8-3,8 | – | – |
| Міцність в барабані, % (ДСТУ ISO 3271:2005): | | | | |
| на удар (+5 мм) | 57,4-93,1 | 92,4-97,1 | 94,6-97,1 | 93,1-96,7 |
| стиранність (0-0,5 мм) | 13,6-2,6 | 5,8-1,1 | 3,2-2,6 | 3,8-2,9 |
| Міцність при відновленні, % (ДСТУ 3202-95): | | | | |
| міцність (+5 мм) | 37,8-62,2 | 53,5-95,8 | 86,5-83,7 | 73,1-92,8 |
| стиранність (0-0,5 мм) | 10,4-9,8 | 4,7-2,1 | 6,3-4,8 | 4,3-3,6 |
| Газопроникність і усадка шару при відновленні, (ДСТУ 3205-95): | | | | |
| усадка шару, % | 15-18 | 12-67 | 18,3-25,7 | 14-26 |
| перепад тиску, Па | 68-71 | 108-154 | 66-87 | 58-73 |
| Кінцевий ступінь відновлення, % (ДСТУ 3204-95) | 65,1-96,0 | 72,8-91,4 | 71,3-94,6 | 87,2-93,4 |
| Кут природного укосу, град. | 38-41 | 23-32 | 37-41 | 36-41 |

Продовження таблиці 1

| Показники | Спеки 3. З підвищеним вмістом залишкового вуглецю ⁴ | Спеки 4. З підвищеним вмістом заліза і залишкового вуглецю без оболонки з шихти | Спеки 5. З підвищеним вмістом заліза і залишкового вуглецю з оболонкою з шихти ⁴ |
|--|--|---|---|
| Питома продуктивність, т/(м ² ·год) | 1,0-1,5 ² | 1,1-1,67 ² | 1,1-1,7 ² |
| Питома витрата теплоти, МДж/т | 402-816 | 391-728 | 393-725 |
| Питома витрата електроенергії, кВт·год/т | 39,1-58,7 | 37,4-59,5 | 37,2-59,3 |
| Вміст, %: Fe _{заг.} | 63,3-64,2 ³ | 63,5-74,8 ³ | 65,3-75,6 ³ |
| FeO | 3,8-5,7 ³ | 8,4-15,7 ³ | 7,6-13,2 ³ |
| SiO ₂ | 6,3-3,8 | 2,3-4,1 | 2,1-4,3 |
| вуглецю | 1,8-3,5 | 1,6-2,5 | 1,9-3,8 |
| Основність (CaO/SiO ₂) готового продукту, од. | 1,25-1,5 | 1,25-1,5 | 1,25-1,5 |
| Вміст класів, %: | | | |
| 60-100 мм | 0 | 0 | 0 |
| 20-60 мм | 80,7-75,2 | 83,9-71,8 | 84,5-74,1 |
| 5-20 мм | 16,8-21,5 | 13,9-24,8 | 13,1-22,7 |
| 0-5 мм | 2,5-3,3 | 2,2-3,4 | 2,4-3,2 |
| Міцність на стиснення, кН/ок (ДСТУ ISO 4700:2005) | – | – | – |
| Міцність в барабані, % (ДСТУ ISO 3271:2005): | | | |
| на удар (+5 мм) | 91,3-93,2 | 96,0-96,5 | 95,8-96,6 |
| стиранність (0-0,5 мм) | 4,2-2,5 | 3,2-2,7 | 2,8-3,1 |
| Міцність при відновленні, % (ДСТУ 3202-95): | | | |
| міцність (+5 мм) | 79,5-94,6 | 90,7-93,1 | 89,9-93,2 |
| стиранність (0-0,5 мм) | 4,9-3,0 | 6,2-4,1 | 6,3-3,9 |
| Газопроникність і усадка шару при відновленні, (ДСТУ 3205-95): | | | |
| усадка шару, % | 16-21 | 13-19 | 14-19 |
| перепад тиску, Па | 62-73 | 60-72 | 61-70 |
| Кінцевий ступінь відновлення, % (ДСТУ 3204-95) | 90,1-93,3 | 85,3-87,1 | 85,8-87,4 |
| Кут природного укусу, град. | 38-41 | 36-42 | 37-42 |

¹ – робоча площа агломашини включає тільки зону спікання, без зони охолодження;

² – робоча площа обпалювальної машини включає зони сушки, нагріву, випалу і охолодження;

³ – вміст заліза в залізовмісній частині огрудкованого матеріалу;

⁴ – оболонка з високотемпературної шихти накочується на шматочки антрациту і металізовані окатиші.

На другому етапі випробувань, враховуючи позитивний вплив збільшення вмісту заліза в залізородній сировині на продуктивність доменної печі і питому витрату коксу, розроблений спосіб виробництва офлюсованих локальних спеків з підвищеним, ніж в агломераті і окатишах, вмістом заліза. Суть методу полягала в роздільному дозуванні компонентів в дві шихти з відповідно високою і низькою температурами їх плавлення. Високотемпературна частина шихти складалася з металізованих окатишів або металізованої кускової руди зі ступенем металізації від 5% до 95% і розміром 10-20 мм при їх масовій кількості в суміші з другою частиною шихти (низькотемпературними сирими окатишами), рівній 60-80%. Температура плавлення цієї частини шихти становить понад 1500°C. Використання металізованих залізовмісних матеріалів

дозволяє підвищити вміст заліза в офлюсованому огрудкованому матеріалі без залежності від вмісту заліза в вихідному залізистому (залізородному концентраті, руді) матеріалі, а ступінь їх металізації і кількість в суміші визначається економічною доцільністю процесу виробництва чавуну.

Шихта для отримання сирих офлюсованих окатишів з низькою температурою плавлення складалася з тонкоподрібнених залізородного концентрату, флюсу, сполучної добавки і, при необхідності, твердого палива. Основність (CaO/SiO_2) в цій частині шихти підтримували понад 2,1 од., використовуючи в якості флюсу вапняк та враховуючи основність металізованих окатишів, що забезпечує задану основність всього одержуваного огрудкованого матеріалу (1,2-1,5 од.), необхідну для доменної плавки. З цієї шихти отримували сирі окатиші, причому крупність цих сирих окатишів з низькою температурою плавлення була 8-14 мм, а їх масова кількість в суміші з металізованими окатишами становила 40-20%. Температура плавлення цієї частини шихти в окислювальній або безокисній атмосфері становила 1140-1180°C. Перед термозміцненням високотемпературні (металізовані) і низькотемпературні сирі окатиші змішували, завантажували у обпалювальну чашу і піддавали термозміцненню за описаним вище режимом. Причому, при нагріванні, високотемпературному обпаленні і охолодженні готового продукту для оберігання від окислення металізованих окатишів використовувався газоподібний забаластований теплоносій з мінімальним вмістом кисню, що отримується в обпалювальній чаші, із спеціально реконструйованою для цієї мети схемою газопотоків теплоносія (див. рис.).

Таким чином, результати випробувань показали, що розроблені офлюсовані локальні спеки 2 володіють кращими металургійними характеристиками агломерату та окатишів (див. табл. 1) і мають при цьому більш високий вміст заліза, що задовольняє сучасним вимогам доменної плавки [6, 7].

При аналізі змін показників плавки часто користуються зведеннями нормованих коефіцієнтів підрахунку витрати коксу і продуктивності печі, складеними за різними даними. Недоліком таких зведень є невзаємопов'язаність коефіцієнтів, що призводить до погрешностей в їх абсолютних значеннях і повторному обліку окремих компонентів ефектів при перерахунку відповідно до різних факторів. Для правильного обліку чинників при аналізі показників доменної плавки необхідно використовувати спеціальні прийоми, які є складовою частиною методики, представленої в роботі [8]. Методика призначена для аналізу змін питомої витрати коксу і продуктивності доменних печей під впливом змін технологічних параметрів доменної плавки. Такий аналіз виконується при зіставленні періодів роботи доменних печей з різними значеннями технологічних параметрів доменної плавки, що визначають величини питомої витрати коксу і продуктивності (пофакторний аналіз). В основі цього аналізу лежать кількісні співвідношення між зміненими параметрами (факторами) і питомою витратою коксу (продуктивністю доменних печей), які визначаються емпірично або аналітично. Характер його визначається загальними принципами взаємозв'язку параметрів доменної плавки, виходячи з яких, оцінка величини впливу кожного параметра на витрату коксу і продуктивність повинна проводитися в залежності від абсолютного значення величини параметра (чим вона вища, тим менше величина впливу), поєднання з іншими параметрами (одні підсилюють, інші – послаблюють вплив), загально-го рівня досконалості процесу (чим він вищий, тим менше величина впливу всіх параметрів).

Результати розрахунку показників доменної плавки згідно описаної вище методики при використанні цієї сировини (табл. 2, спеки 2) показали збільшення продуктивності доменної печі в порівнянні з базовим періодом на 20,1% і зниження питомої витрати коксу на 72 кг/т.

На третьому етапі випробувань, враховуючи позитивний вплив вмісту залишкового вуглецю в залізородній сировині на зниження питомої витрати коксу в доменній плавці, розроблений спосіб виробництва офлюсованих локальних спеків з підвищеним вмістом в них залишкового вуглецю за рахунок використання менш дефіцитних і дешевих сортів твердого палива замість дорогого і дефіцитного металургійного коксу.

Високотемпературна технологія отримання огрудкованого залізородного матеріалу з максимально можливою кількістю всередині нього залишкового вуглецю може бути здійснена при неодмінному дотриманні двох основних технологічних умов: ефективному накопчуванні гідрофільних тонкоподрібнених компонентів шихти на гідрофобну поверхню шматочків твердого палива, що є зародками, із забезпеченням необхідної міцності отриманих сирих окатишів,

а також мінімальним вигоранням вуглецю цього твердого палива в процесі термічного зміцнення і охолодження огрудкованого матеріалу в газовій атмосфері з різним окислювальним потенціалом. Сутність цієї технології, як і попередніх, полягає в роздільному дозуванні компонентів в дві шихти, відповідно, з високою і низькою температурами їх плавлення. В якості твердого палива використовувався антрацит, як найменш реакційне з природного вугілля. Виділена фракція антрациту (0-10 мм) оброблялася водним розчином лігносульфонату натрію в кількості 2,4-15,1 кг/т сухого антрациту за розробленою технологією [11] для додання антрациту гідрофільної здатності.

Таблиця 2

Розрахункові технологічні показники роботи доменної печі об'ємом 5000 м³ при використанні в шихті офлюсованих локальних спеків різного складу

| Показники | Періоди ¹ | | | | | |
|---|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Б ² | P ₁ | P ₂ | P ₃ | P ₄ | P ₅ |
| Локальні спеки | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Продуктивність, т/доб. | 9826 | | | | | |
| Приведена продуктивність, т/доб. | 9826 | 11624 | 12587 | 11546 | 12607 | 12862 |
| Витрата коксу, кг/т чав. | 426,8 | | | | | |
| Приведена витрата коксу, кг/т чав. | 426,8 | 380 | 355 | 352 | 331 | 315 |
| Вміст вуглецю в локальних спеках ³ , % | 0 | 0 | 0 | 2,65 | 2,05 | 2,85 |
| Витрата залишкового вуглецю в локальних спеках, кг/т чав. | 0 | 0 | 0 | 43,1 | 33,3 | 46,4 |
| Вміст заліза у всій шихті ⁴ , % | 55,0 | 64,15 | 69,05 | 63,75 | 69,15 | 70,45 |
| Витрата, кг/т: агломерат АЦ №1 | 134,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| агломерат АЦ №2 | 1192 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| окатиші ПівніГЗК | 300,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| локальні спеки | 0 | 1626,7 | 1626,7 | 1626,7 | 1626,7 | 1626,7 |
| вапняк | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

¹ – Б – базовий період, P₁-P₅ – розрахункові періоди роботи доменної печі (приведення за методикою [8]) з використанням спеків 1-5 відповідно; ² – кращий період роботи печі з 2000 р. до впровадження на печі технології ПВП в 2016 р. [9] (повністю показники роботи печі наведені в [10]); ³ – середні дані за вмістом вуглецю в локальних спеках з табл. 1; ⁴ – середні дані за вмістом заліза в локальних спеках з табл. 1.

В ході дослідження готувалось дві шихти для отримання сирих окатишів з високою і низькою температурами плавлення згідно описаних вище технологій. Шихта для отримання сирих окатишів з високою температурою плавлення складалася з залізородного концентрату, магнієвмісного флюсу, сполучної добавки, і була низькоосновною, якщо використовувався один концентрат, або із заданою основністю готового продукту і багатим (1-5% SiO₂) концентратом, якщо використовувалося два концентрати. Ця шихта змішувалася з антрацитом виділеної крупності (0-10 мм), попередньо обробленого реагентом, і піддавалася огрудкуванню. Шихта для отримання сирих окатишів з низькою температурою плавлення складалася з залізородного концентрату, вапняку, сполучної добавки і була високоосновною, якщо використовувався один концентрат, або із заданою основністю готового продукту і бідним (6-10% SiO₂) концентратом, якщо використовувалося два концентрати. З кожної шихти отримували сирі окатиші необхідної крупності: з високою температурою плавлення діаметром 14-20 мм, а з низькою температурою плавлення діаметром 8-14 мм. Обидва види сирих окатишів змішувалися, уникаючи їх руйнування. Співвідношення кількості високотемпературних і низькотемпературних окатишів в суміші (відповідно, 60-85% і 40-15%) і їх основність забезпечували отримання у всього огрудкованого продукту задану основність з необхідною кількістю розплаву, для формування заданого гранулометричного складу локальних спеків.

Суміш сирих окатишів завантажувалася шаром висотою 300 мм в обпалювальну чашу (див. рис.) і піддавалася термообробці, що включає сушку, нагрів, високотемпературне обпа-

лення і охолодження. У процесі термообробки суміші окатишів змінювали швидкості нагріву (від 100 до 500°C/хв.) і охолодження (від 100 до 600°C/хв.), а також вміст кисню в теплоносії. Тривалість високотемпературного обпалення в усіх дослідах була постійною. Випробування показали, що при однаковому вмісті закатаного всередину високотемпературних окатишів вуглецю збільшення швидкості нагріву висушених окатишів і швидкості охолодження отриманих спеків в зазначених межах призводить до зниження ступеня вигорання вуглецю в процесі термообробки з 43,5% до 10,3%, причому найбільше зниження спостерігалось при зростанні швидкостей нагріву і охолодження від 100 до 300-350°C/хв. При подальшому збільшенні швидкостей нагріву і охолодження до 500-600°C/хв. ступінь вигорання вуглецю в спеках зменшувалася не настільки значно. При використанні в період нагрівання та охолодження теплоносія зі зменшеним вмістом кисню характер зниження ступеня вигорання вуглецю при збільшенні швидкості нагріву і охолодження практично не змінювався, однак абсолютні значення були істотно нижче (з 25,6 до 5,1%).

Порівняльні результати випробувань визначення металургійних характеристик різних огрудкованих матеріалів показали, що в отриманих офлюсованих локальних спеках 3 із залишковим вуглецем вміст заліза вище, ніж в промисловому агломераті і приблизно на тому ж рівні, що в промислових окатишах (див. табл. 1). Проведений розрахунок показників роботи доменної печі з використанням в шихті локальних спеків із залишковим вуглецем показав зниження питомої витрати коксу на 75 кг/т і збільшення продуктивності на 17,5% в порівнянні з базовим періодом роботи доменної печі (див. табл. 2, спеки 3).

Продовжуючи розробку нової залізородної моносіровини для доменної плавки і проаналізувавши технологічні можливості, показники отримання і металургійні характеристики описаних вище офлюсованих локальних спеків 1-3, автори прийшли до висновку, що технологічно можливо отримати комплексний офлюсований огрудкований матеріал з усіма зазначеними металургійними характеристиками – це локальні спеки 4 з підвищеним вмістом заліза і залишковим вуглецем. Виходячи з цього, була розроблена і випробувана технологія отримання такого матеріалу, в якому раціонально і одночасно використані представлені вище елементи технологій з деякими технологічними спрощеннями.

В якості високотемпературної частини шихти для отримання локальних спеків використовували спільне введення металізованих окатишів, металізованих руд або їх сумішей зі ступенем металізації 5-95% крупністю 10-20 мм в кількості 50-80%, а також тверде паливо (антрацит) розміром 0-12 мм в кількості 15-3%, без накочування на перші і другі оболонки з високотемпературної шихти для запобігання їх від окислення. В якості низькотемпературної частини шихти використовувалися застосовані раніше сирі високоофлюсовані окатиші з низькою температурою плавлення розміром 8-14 мм в кількості 35-17%. Отримані складові шихти змішувалися, після чого суміш піддавалася термообробці газоподібним теплоносієм з окислювальним або слабоокислювальним потенціалом з наступними температурами: сушка – 350-450°C, нагрівання до максимальної температури з різними швидкостями, обпалення при температурі 1250-1350°C і охолодження з різними швидкостями до температури 100-130°C.

Питома продуктивність обпалювального агрегату і питомі витрати енергоресурсів (теплоти і електроенергії) при виробництві огрудкованої моносіровини 4 залишилися практично ідентичними при виробництві описаних вище локальних спеків (див. табл. 1). Результати розрахунку показників доменної плавки при використанні в її шихті огрудкованої офлюсованої моносіровини з підвищеним вмістом заліза і вуглецю при відсутності оболонки з високотемпературної шихти на металізованих окатишах і твердому паливі показали збільшення продуктивності печі на 28,3% і зниження питомої витрати коксу на 96 кг/т (табл. 2, спеки 4).

Додаткові численні випробування локальних спеків 4 показали, що при відсутності накочування високотемпературної шихти на металізовані окатиші та тверде паливо їх захист тільки розплавом низькотемпературних окатишів не дозволяє істотно знизити ступінь окислення металізованих окатишів і ступінь вигорання вуглецю з оброблюваного матеріалу при всіх швидкостях нагріву в окислювальному теплоносії. Слід зазначити, що ступінь окислення металізованих окатишів в процесі термообробки через неточності оперативного контролю використовуваних їх вихідних технологічних значень (крупності, ступеня металізації, співвідношення з твердим паливом) однозначно визначити було складніше. Однак, можна з певною вірогідністю

передбачити аналогічний вплив накочування оболонки на ступінь окислення металізованого матеріалу в процесі його термообробки.

На наступному етапі розробки моносіровини для доменної плавки і в зв'язку з необхідністю істотного зниження ступеня окислення вуглецю твердого палива і металізованих окатишів в процесі термозміцнення попередньої моносіровини 4 через неповний захист низькотемпературним розплавом їх поверхні розроблена технологія отримання моносіровини у вигляді офлюсованих локальних спеків 5 з накочуванням оболонки певної товщини з високотемпературної шихти на шматочки антрациту і металізовані окатиші для запобігання їх від окислення.

Сутність технології полягала в підготовці трьох компонентів, що вводяться в шихту для отримання локальних спеків: двох компонентів шихти з високою і одного з низькою температурами плавлення. Високотемпературними компонентами шихти (з температурою плавлення вище 1500°C) були металізовані окатиші і руди або їх суміш зі ступенем металізації 5-95% крупністю 0-18 мм і тверде паливо (антрацит) розміром 0-18 мм, попередньо оброблене реагентом для підвищення гідрофільності його поверхні в співвідношенні між ними 10-90% металізованого матеріалу і 90-10% антрациту в залежності від заданих вмістів заліза і вуглецю в готовому продукті. На їх поверхню накочувалась оболонка товщиною 8-4 мм з низькоосновної високотемпературної шихти, офлюсованої магнієвмісним флюсом, до досягнення крупності сирих окатишів 8-25 мм.

Низькотемпературні окатиші крупністю 8-14 мм виготовлялися з концентрату будь-якого ступеня збагачення і офлюсовувались вапняком до високого ступеня, що забезпечує задану основність локальних спеків. Високо- і низькотемпературні сири окатиші змішувалися при утриманні в суміші, відповідно, суми перших 55-88%, а других – 45-12%.

З огляду на надзвичайну складність підтримки в газопотоках конвеєрних обпалювальних машин низького вмісту кисню в теплоносії суміш високотемпературних і низькотемпературних сирих окатишів піддавалася термообробці в звичайному, використовуваному в даний час окислювальному теплоносії і тепловому режимі, що включає сушку при температурі 350-450°C, нагрівання до максимальної температури зі швидкістю від 100°C/хв до 500°C/хв, обпалення при максимальній (1300-1350°C) температурі і охолодження повітрям зі швидкістю від 100°C/хв до 600°C/хв.

Мета істотного зниження окислення металізованих окатишів і вуглецю твердого палива в процесі термообробки при отриманні офлюсованих локальних спеків була досягнута за рахунок накочування на їх поверхню оболонки з високотемпературної шихти товщиною 8-4 мм. Окислення дрібних (0-1,5 мм) частинок твердого палива, що знаходяться в оболонці, або металізованих окатишів, які не є зародками окатишів, знижує вміст кисню в теплоносії, який дифундує всередину окатишів. Так, ступінь вигорання вуглецю при збільшенні швидкості нагріву і охолодження від 100 до 500-600°C/хв в окислювальній атмосфері знижувалася з 35,8 до 12,6%, тоді як за відсутності оболонки ступінь вигорання вуглецю знижувалася з 61,7 до 37,3%. Таким чином, вміст заліза і вуглецю в локальних спеках 5 цієї моносіровини становив, відповідно, 65,3-75,6% і 1,9-3,8%, тобто вище, ніж у всіх розроблених раніше спеках (див. табл. 1).

Результати розрахунку показників доменної плавки при використанні цієї огрудкованої моносіровини (табл. 2, спеки 5) показали збільшення продуктивності печі на 30,9% і зниження питомої витрати коксу з 427 до 315 кг/т в порівнянні з базовим періодом роботи доменної печі об'ємом 5000 м³.

Висновки

Розроблена технологія виробництва огрудкованої залізородної моносіровини для доменної плавки, що володіє кращим комплексом металургійних характеристик агломератів і окатишів та має в своєму складі одночасно підвищений вміст заліза і залишковий вуглець. Причому, цей матеріал може вироблятися в діючих цехах з виробництва обпалених окатишів при мінімальних витратах на реконструкцію технологічної схеми, основного технологічного обладнання; зміни технології одержання і термозміцнення. Використання нової залізородної моносіровини в доменному виробництві дозволить істотно поліпшити техніко-економічні показники виплавки чавуну. Однак, слід враховувати комплексну економічну доцільність виробництва і виплавки чавуну з цієї огрудкованої моносіровини з заданим вмістом заліза.

Перелік використаних джерел:

1. Теория и технология подготовки шихтовых материалов для доменной и бездоменной металлургии железа : учебник / Ф.М. Журавлев, В.П. Лялюк, Н.И. Ступник, В.С. Моркун, Е.В. Чупринов, Д.А. Кассим. – Кривой Рог : Издатель Чернявский Д.А., 2020. – 663 с.
2. Сравнительная характеристика металлургических свойств агломерата и окатышей разных предприятий / И.Ф. Дворниченко [и др.] // Сталь. – 1986. – № 10. – С. 21-23.
3. Влияние основности силикатной связки на прочность железорудных окатышей при восстановлении / Ф.М. Журавлев [и др.] // Metallurg. – 1977. – № 8. – С. 8-11.
4. Федоров С.А. Улучшение металлургических свойств окускованного железорудного сырья путем интенсификации процесса обжига / С.А. Федоров, Н.Н. Бережной // Бюллетень Черная металлургия. – 1976. – № 6. – С. 33-35.
5. Головний напрямок інноваційного вдосконалення доменної технології – використання одного виду залізородної сировини, що поєднує кращі властивості агломерату та окатишів / Д.О. Кассім, В.П. Лялюк, Ф.М. Журавльов, І.А. Ляхова, Є.В. Чупринов // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2018. – Вип. 36. – С. 7-15. – (Серія : Технічні науки). – Режим доступу: [DOI: 10.31498/2225-6733.36.2018.142462](https://doi.org/10.31498/2225-6733.36.2018.142462).
6. Improved Iron-Ore Sinter for Blast Furnaces / F.M. Zhuravlev, V.P. Lyalyuk, D.A. Kassim, I.A. Lyakhova, E.V. Chuprinov // Steel in Translation. – 2015. – № 4. – Pp. 270-274. – Mode of access: [DOI: 10.3103/S0967091215040154](https://doi.org/10.3103/S0967091215040154).
7. Improved Iron-Ore Pellets for Blast Furnaces / F.M. Zhuravlev, V.P. Lyalyuk, N.I. Stupnik, E.V. Chuprinov, I.A. Lyakhova // Steel in Translation. – 2016. – № 12. – Pp. 860-867. – Mode of access: [DOI: 10.3103/S0967091216120135](https://doi.org/10.3103/S0967091216120135).
8. Товаровский И.Г. Эволюция доменной плавки / И.Г. Товаровский, В.П. Лялюк. – Днепропетровск : Пороги. – 2001. – 424 с.
9. Возможности нормализации газодинамического режима доменной плавки при вдувании пуг / В.П. Лялюк, А.К. Тараканов, Д.А. Кассим, И.И. Кучер // Сталь. – 2020. – № 7. – С. 8-12.
10. Определение траектории потока газа при вдувании в доменную печь пылеугольного топлива / В.П. Лялюк [и др.] // Сталь. – 2017. – № 4. – С. 2-6.
11. Технология получения сырых окатышей с закатанным внутрь твердым топливом / Ф.М. Журавльов, В.П. Лялюк, И.А. Ляхова, Д.А. Кассим, Е.В. Чупринов // Гірничий вісник Криворізького національного університету. – 2014. – № 98. – С. 162-165.

References:

1. Zhuravlev F.M., Lyalyuk V.P., Stupnik N.I., Morkun V.S., Chuprinov E.V., Kassim D.A. *Teoriya i tekhnologiya podgotovki shikhtovykh materialov dlya domennoy i bezdomennoy metallurgii zheleza: uchebnik* [Theory and technology of preparation of charge materials for blast-furnace and blast-furnace metallurgy of iron: textbook]. Krivoy Rog, Izdatel Chernyavskiy D.A. Publ., 2020. 663 p. (Rus.)
2. Dvorchenko I.F., Zhuravlev F.M., Astaf'ev V.D., Koshel' A.M. *Sravnitel'naya kharakteristika metallurgicheskikh svoystv aglomerata i okatyshey raznykh predpriyatiy* [Comparative characteristics of metallurgical properties of sinter and pellets from different enterprises]. *Stal' – Steel*, 1986, no. 10, pp. 21-23. (Rus.)
3. Zhuravlev F.M., Malysheva T.Ya., Merlin A.V. *Vliyaniye osnovnosti silikatnoy svyazki na prochnost zhelezorudnykh okatyshey pri vosstanovlenii* [Influence of the basicity of the silicate bond on the strength of iron ore pellets during reduction]. *Metallurg – Metallurg*, 1977, no. 8, pp. 8-11. (Rus.)
4. Fedorov S.A., Berezhnoy N.N. *Uluchsheniye metallurgicheskikh svoystv okuskovannogo zhelezorudnogo syria putem intensifikatsii protsessa obzhiga* [Improving the metallurgical properties of agglomerated iron ore raw materials by intensifying the roasting process]. *Biulleten' Chernaia metallurgiya – Bulletin Ferrous metallurgy*, 1976, no. 6, pp. 33-35. (Rus.)
5. Kassim D.O., Lyalyuk V.P., Zhuravlov F.M., Lyakhova I.A., Chuprinov Ye.V. *Golovniy napryamok innovatsiynogo vdoskonalennya domennoy tekhnologii – vikoristannya odnogo vidu zalizorudnoy sirovini, shcho poednuє krashchi vlastivosti aglomeratu ta okatishiv* [Main direction of the innovative improving of the blast furnace technologies – use of one type of iron raw materi-

- al, combining the best properties of agglomerate and pellets]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2018, iss. 36, pp. 7-15. doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142462. (Ukr.)
6. Zhuravlev F.M., Lyalyuk V.P., Kassim D.A., Lyakhova I.A., Chuprinov E.V. Improved Iron-Ore Sinter for Blast Furnaces. *Steel in Translation*, 2015, no. 4, pp. 270-274. doi: 10.3103/s0967091215040154.
 7. Zhuravlev F.M., Lyalyuk V.P., Stupnik N.I., Chuprinov E.V., Lyakhova I.A. Improved Iron-Ore Pellets for Blast Furnaces. *Steel in Translation*, 2016, no. 12, pp. 860-867. doi: 10.3103/S0967091216120135.
 8. Tovarovskiy I.G., Lyalyuk V.P. *Evolyutsiya domennoy plavki* [Blast furnace evolution]. Dnepropetrovsk, Porogi Publ., 2001. 424 p. (Rus.)
 9. Lyalyuk V.P., Tarakanov A.K., Kassim D.A., Kucher I.I. Vozmozhnosti normalizatsii gazo-dinamicheskogo rezhima domennoy plavki pri vduvanii PUT [Possibilities of normalizing the gas-dynamic regime of blast-furnace smelting during pulverized coal injection]. *Stal' – Steel*, 2020, no. 7, pp. 8-12.
 10. Lyalyuk V.P., Tarakanov A.K., Kassim D.A. Opredele niye trayektorii potoka gaza pri vduvanii v domennuyu pech pyleugolnogo topliva [Determination of the gas flow path when pulverized coal fuel is injected into a blast furnace]. *Stal' – Steel*, 2017, no. 4, pp. 2-6. (Rus.)
 11. Zhuravlev F.M., Lyalyuk V.P., Lyakhova I.A., Kassim D.A., Chuprinov E.V. Tekhnologiya polucheniya syrykh okatyshey s zakatannym vnutr tverdym toplivom [Technology of obtaining raw pellets with solid fuel rolled inside]. *Girnichii visnik Krivoriz'kogo natsional'nogo universitetu – Mining journal of Kryvyi Rih National University*, 2014, no. 98, pp. 162-165. (Rus.)

Рецензент О.Д. Учитель
д-р техн. наук, проф., ННТИ ДУЕТ

Стаття надійшла 15.10.2020

УДК 669.184

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226184

© Радько Н.Г.¹, Чупринов Є.В.², Лялюк В.П.³,
Коренко М.Г.⁴, Кривенко В.В.⁵

УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ ПО РОЗРАХУНКОВІЙ ТЕМПЕРАТУРІ РЕАКЦІЙНОЇ ЗОНИ

Отримано новий параметр киснево-конвертерного процесу (температура випромінювання поверхні реакційної зони), що дозволяє здійснювати контроль плавки протягом всієї її тривалості. В основі алгоритму, який розраховує цей параметр, лежить вимір потужності теплового потоку, що отримує охолоджуюча вода.

Ключові слова: виплавка сталі, технологічний процес, випромінювання, реакційна зона, окислення.

¹ ст. викладач, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг

² канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID ID: 0000-0001-8605-3434, itchupa@gmail.com

³ д-р техн. наук, професор, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID ID: 0000-0001-7258-2079, vitalij.lyalyuk@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID ID: 0000-0002-4582-1756

⁵ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID ID: 0000-0001-7822-6358