Ю.С. Семенов¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр., ст. наук. співр., e-mail: yuriy.semenov.isi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2299-5742>, Web of Science ResearcherID: S-4494-2017

О.Л. Подкоритов², генеральний директор

В.В. Горупаха¹, наук. співр., e-mail: viktor.horupakha@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0531-1871>

І.Ю. Семіон², директор з якості – начальник управління якості продукції

А.Ю. Оробцев², канд. техн. наук, начальник технічного управління

О.С. Нестеров¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу, e-mail: asn.dnepr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0183-0327>

Є.І. Шумельчик¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: ievgen.shumelchik@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5350-6425>

С.М. Пустовой², головний доменщик

О.А. Гапоненко², начальник доменного цеху

В.В. Соловйов², провідний інженер технічного управління

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

²ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» (Кам'янське, Україна)

Нові наукові і прикладні результати досліджень ефективності використання пиловугільного палива при виробництві чавуну і випалі вапняку

У статті представлено основні результати співробітництва Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України та ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» у 2017–2019 рр. за тематикою доменного виробництва та освоєння технології вдування пиловугільного палива у обертові печі випалу вапняку. Висвітлено результати комплексу заходів щодо забезпечення раціонального розподілу пиловугільного палива по повітряним фурмам доменних печей для вирівнювання теплового стану фурменої зони по окружності доменних печей; результати використання технології спільного використання пиловугільного палива і природного газу; рекомендації щодо задувок доменних печей після зупинки на термін, що перевищує допустимий, без попереднього випуску залишкового чавуну, завдяки яким доменні печі було безаварійно введено в експлуатацію з досягненням планових показників; результати використання інформації зондів, що вимірюють температуру газового потоку над поверхнею шихти для подальшого обґрунтованого коригування режимів завантаження печі за допомогою розробленого експертного модуля, що генерує коригувальні дії режиму завантаження для підтримки прийняття управляючих дій технологічного персоналу; результати застосування комплексу заходів щодо запобігання порушень ходу доменної печі при використанні пиловугільного палива у кількості більше 140 кг/т чавуну без використання спеціальних промивних матеріалів; результати ефективності відпрацьованої технології використання в складі доменної шихти марганцевмісних матеріалів на постійній основі та результати впровадження методу діагностики працездатності механізмів установки вдування пиловугільного палива у обертові печі випалу вапняку з подальшою розробкою рекомендацій щодо коригування параметрів роботи механізмів установки вдування.

Ключові слова: доменна піч, пиловугільне паливо, природний газ, витрата коксу, задувка доменної печі, термозонд, випуск продуктів плавки, марганцевмісні матеріали, обертова піч випалу вапняку.

Співробітництво Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ) та Дніпровського металургійного комбінату (ДМК), насамперед, за тематикою доменного виробництва було поновлено після тривалої перерви у вересні 2017 р. До доменного цеху ДМК входять три доменні печі: ДП № 1М (корисний об'єм 1500 м³, конусний завантажувальний пристрій (КЗП), 20 повітряних фурм), № 9 (корисний об'єм 1386 м³, КЗП, 18 повітряних фурм) та № 12 (корисний об'єм 1386 м³, КЗП, 16 повітряних фурм). Робота доменних печей ДМК у нестабільних шихтових і паливних умовах при використанні пиловугільного палива (ПВП) у кількості 140–160 кг/т чавуну вимагала розробки нових та вдосконалення існуючих методів діагностики та управління доменною плавкою [1–3].

Крім цього, у 2018 р. розпочато новий напрям досліджень ІЧМ – освоєння технології вдування ПВП у обертові печі випалу вапняку. Цей напрям є новим і для галузі в цілому, оскільки перехід обертових печей з природного газу на ПВП тільки розпочинається.

За більш ніж два роки виконання науково-дослідних робіт на ДМК було отримано наступні основні науково-практичні результати.

1. На першому етапі, з урахуванням тривалої роботи доменних печей цеху без футерівки ІЧМ було рекомендовано: проведення шоткретування шахти для можливості використання великих витрат ПВП і установка зондів, що вимірюють температуру газового потоку над поверхнею шихти, для подальшого ефективного управління завантаженням печі. Для проведення даних заходів у жовтні 2017 р. було обрано ДП № 9, що за підсумком наступного 2018 р. виразилося в економії питомої витрати коксу 2,6 % (або 10,8 кг/т чавуну) в порівнянні з ДП № 1М і ДП № 12, в середньому. Для ДП № 9 за підсумком 2018 р. було також встановлено оптимальну витрату ПВП для максимально ефективної заміни коксу та для досягнення максимально можливого виробництва, яка склала 145 кг/т чавуну (рис. 1), з урахуванням існуючих залізородних умов (вміст Fe в залізородній частині шихти – 55 %) і стану повітрянагрівачів (температура гарячого дуття – до 1050 °С).

2. Вперше в Україні розроблено та впроваджено комплекс заходів щодо забезпечення раціонального розподілу ПВП по повітряним фурмам.

В результаті раніше виконаних в ІЧМ досліджень при використанні в дутті природного газу було встановлено тісний зв'язок між тепловими навантаженнями на водоохолоджувані сопла фурмених приладів і нерівномірністю розподілу дуття, вимірюваної іншими способами, тобто доведено, що кількість теплоти, що втрачається на водоохолоджуваних елементах фурмених приладів, однозначно залежить від кількості фізичної теплоти і газодинамічного режиму руху дуття, що приходить на повітряну фурму [4–6]. В сучасних умовах водоохолоджувані сопла практично не застосовуються, а на доменних печах Єнакієвського металургійного заводу раніше авторами статті від ІЧМ було доведено, що елементами фурмених приладів, що працюють в порівнянних умовах, є водоохолоджувані фланці рухомого коліна. У зв'язку з повною або частковою відмо-

Рис. 1. Залежності витрати коксу і добової продуктивності ДП № 9 від витрати ПВП у 2018 р.

вою від природного газу з переходом на ПВП та при наявній можливості регулювання витратою ПВП по окремим фурмам в умовах ДМК актуальною задачею стала можливість забезпечення рівномірного розподілу теплового стану фурменої зони, який оцінюється за показником теоретичної температури горіння.

Впроваджений на ДМК комплекс включає: визначення розподілу витрат дуття на фурмах за тепловими навантаженнями, вимірюваними на водоохолоджуваних елементах (фланцях рухомих колін) фурмених приладів; визначення окружного розподілу теплового стану фурменої зони; видачу рекомендацій щодо забезпечення спрямованої нерівномірності витрати ПВП по фурмам для вирівнювання теплового стану фурменої зони (теоретичної температури горіння) [7, 8]. Ефективність тривалого промислового впровадження комплексу заходів склала: на ДП № 12 (у 2018 р., рис. 2) 4,7 % економії питомої витрати коксу при зменшенні на 12 % коливання вмісту кремнію в чавуні на випуску та 3,9 % економії питомої витрати коксу на ДП № 1М (у 2019 р., рис. 3) при зменшенні температури периферійного газового потоку на 100–120 °С. При цьому ефективність впровадження нерівномірності розподілу ПВП на ДП № 12 спостерігалась при роботі з кількістю ПВП в дутті до 120 кг/т чавуну [7], що в тому числі, сприяло в подальшому впровадженню за рекомендацією ІЧМ збільшення діаметру повітряних фурм від 140 до 150 мм. На ДП № 1М тенденція зниження температури периферійного газового потоку спостерігалась до періоду роботи печі без збагачення дуття киснем, що було обґрунтовано економічними чинниками, згодом така робота привела до порушення газодинаміки плавки (рис. 4).

Для ефективного контролю розподілу дуття по повітряним фурмам доменної печі і подальшої зміни роз-

Рис. 2. Фактичний розподіл ПВП (відн. од.) на ДП № 12 до коригування (17.08–13.09.2018) і після створення спрямованої нерівномірності ПВП (15.09–09.10.2018)

поділу ПВП по окружності печі з метою вирівнювання або створення заданої нерівномірності теплового стану фурменної зони ІЧМ рекомендовано реалізувати відповідну систему автоматизованого контролю, що включає установку на кожен фурменний прилад витратоміра води, що надходить на охолоджувані елементи фланців рухомого коліна фурменного приладу, термодатчиків на ділянці зливного трубопроводу після охолодження і підсистеми візуалізації інформації зміни теплових навантажень, витрат ПВП, фактичної і рекомендованої теоретичної температури горіння, а також інших показників потоку дуття і фурмених осередків по окружності доменної печі.

3. В умовах браку коксівного і слабкоспіктивного вугілля у галузі влітку 2019 р. відпрацьовано технологію спільного використання пиловугільного палива і природного газу. Практично доведено ефективність цієї

Рис. 3. Фактичний розподіл ПВП (відн. од.) на ДП № 1М до коригування (01–05.11.2019) і після створення спрямованої нерівномірності ПВП (07.11.2019–05.01.2020)

технології, яка сприяє збільшенню температури вугільного пилу за рахунок більш раннього його займання і виділення теплоти від спалювання [9, 10].

У зв'язку з конструктивними особливостями повітряних фурм в доменному цеху (один підвід природного газу з максимально можливою витратою 360 м³/год) було прийнято рішення на ДП № 1М природний газ подавати через одну повітряну фурму на спис введення ПВП (580 м³/год), на інші фурми подавалося 360 м³/год через наявний підвід і 1,0 т/год ПВП. На ДП № 12 на всі повітряні фурми подавалося до 360 м³/год природного газу і 0,7 т/год ПВП. На рис. 5 показано графік витрат ПВП і природного газу по повітряним фурмам на ДП № 1М в період нестачі вугілля для виробництва ПВП. В результаті промислового впровадження технології спільного використання ПВП і природного газу встановлено оптимальне співвідношення паливних добавок в

Рис. 4. Динаміка зміни температури периферійного газового потоку та вмісту кисню в дутті в період роботи ДП № 1М з направленою нерівномірністю розподілу ПВП по окружності печі

Розподіл ПВП (кг/год) і природного газу (м³/год) по окружності ДП №1М

Рис. 5. Розподіл витрат ПВП і природного газу по повітряним фурмам ДП № 1М в період нестачі вугілля для виробництва ПВП

дутьї: ПВП – 110–120 кг/т чавуну, та природного газу – 40–50 м³/т чавуну. Ефективність цієї технології склала 3 % економії питомої витрати коксу при збільшенні коефіцієнтів заміни коксу природним газом від 0,80 до 0,93 од. Слід зазначити, що ефективність спільного використання ПВП та природного газу була отримана при погіршенні якості вугілля, що використовувалося для ПВП, за рахунок використання антрацитового вугілля. Так, в середньому, кількість летючих речовин вугілля зменшилася від 19,4 до 16,5 % при збільшенні стандартного відхилення цього показника від 0,24 до 0,38 %.

4. В умовах кризи металургійної галузі у 2019 р. дві доменні печі комбінату були зупинені на термін, що перевищує допустимий (45 діб) без попереднього випуску залишкового («козлового») чавуну. Так, доменна піч № 9 була зупинена на 147 діб, доменна піч № 12 – на 110 діб. Завдяки використанню розроблених ІЧМ рекомендацій щодо задувок [1, 11, 12], доменні печі наприкінці 2019 р. було безаварійно введено в експлуатацію з досягненням планових показників. Далі наведено рекомендації щодо задувок доменних печей при різних особливостях зупинок.

4.1. Рекомендації щодо задувки доменної печі після тривалої стоянки без або з частковим вигрібанням матеріалів («лобова» задувка):

4.1.1. Уточнити розрахунок шихти з урахуванням корисного об'єму печі без футерівки шахти, розпару і заплечиків для забезпечення початку завантаження залізородних матеріалів з рівнів 8,0–8,5 м від осі фурм з метою запобігання приходу непідготовлених матеріалів до рівня фурм.

4.1.2. Швидкість дутьтя протягом задувки після формування фурмених осередків повинна становити не менше 150–175 м/с для забезпечення розвиненого центрального газорозподілу і формування стійких

фурмених осередків.

4.1.3. Рекомендується задувку здійснювати на 2–3 повітряні фурми над чавунною льоткою для посилення прогріву центральної зони і зменшення втрат тепла в периферійній. Подальше відкриття фурм рекомендується здійснювати по одній фурмі з кожного боку задувочного сектору. Інтервал між відкриттям наступних фурм повинен становити 8–12 годин. Низький темп на початку задувки, як правило, компенсується прискореною роздувкою після перезакриття фурм.

4.1.4. При досягненні 7–8 відкритих фурм при наявності нормального прогріву печі і сходу шихти провести закриття 3–4 працюючих фурм ні над робочою льоткою і зробити відкриття 8 фурм рівномірно по всій окружності печі. Даний захід дозволяє прогріти центральну зону стовпа шихти без збільшення інтенсивності спалювання коксу.

4.1.5. Температуру дутьтя слід збільшувати поетапно в темпі зі стійким збільшенням витрати дутьтя.

4.1.6. Використання ПВП у дутьті необхідно розпочинати через 2–3 тижні від початку задувки.

4.2. Рекомендації щодо задувки доменної печі після видувки і вигрібання матеріалів та після тривалої стоянки (задувка на всі фурми з подальшим закриттям частини фурм):

4.2.1. Проводити задувку на всі повітряні фурми для рівномірного окружного прогріву матеріалів, футерівки та системи охолодження.

4.2.2. Щоб уникнути негативних наслідків і посилення прогріву центральної зони при його зменшенні в периферійній, необхідно зупинити піч через 12–15 годин для закриття частини повітряних фурм (до 30–50 % в залежності від швидкості дутьтя і інтенсивності фурмених осередків, сходу шихти, втрати газодуттєвих параметрів). Такий прийом дозволяє: фактично провести «м'яку осадку» шихти в усьому об'ємі, перенаправити газовий потік до центру, на шкоду периферійному, забезпечити прогрів шихти по всьому перерізу печі, забезпечити цільову швидкість дутьтя на рівні 175 м/с, сформувати розвинені по осі фурм окислювальні осередки. Ознаками для прийняття рішення на зупинку для закриття повітряних фурм, є: уповільнення сходу шихти і зниження витрати дутьтя при збільшенні його тиску, зменшення швидкості дутьтя менше 150 м/с; збільшення витрат дутьтя при незначному збільшенні його тиску при повній відсутності сходу шихти (ознака утворення каналу з подальшим обривом шихти).

4.2.3. Для прогрівання каналу «фурми-льотка» при задувці слід підготовлену до перших випусків чавунну льотку тримати відкритою до стійкої появи рідких продуктів плавки, по можливості вставити «перфоровану» трубу на початковому етапі.

4.2.4. Температуру дутьтя слід збільшувати поетапно в темпі зі стійким збільшенням витрати дутьтя.

4.2.5. Замість застосування традиційного рівномірного розподілу шлакоутворюючих матеріалів по всій висоті першої шихти в суміші з коксом, розділених невеликими по висоті коксовими вікнами, забезпечити укладання шлакоутворюючих матеріалів широкими шарами по висоті, тому що це дозволяє збільшити час нагрівання шару в період прогріву стовпа шихти і по-

Рис. 6. Відеокادر експертного модуля з управління завантаженням ДП № 9 ДМК: K_1 – відношення температури периферійної зони до середньої температури газового потоку

чатку його плавлення.

4.2.6. Для запобігання приходу непідготовлених матеріалів до фурм необхідно проводити розрахунок задувочної шихти, виходячи з початку завантаження шлакоутворюючих і залізородних матеріалів з рівнів не менше 8,0–8,5 м від осі фурм.

4.2.7. Використання ПВП у дутті необхідно розпочинати через 5–7 діб від початку задувки.

При використанні в задувочній шихті плавикового шпату рекомендується вантажити його по 1,0 т в подачу першої шихти та по 0,5–0,6 т в подачу наступних задувочних шихт. Плавиковий шпат не є шлакоутворюючим матеріалом та дозволяє збільшити рухливість шлаків. При завантаженні шпату в малій кількості збільшується його газопроникність, значна частина фтору при цьому випарується через взаємодію фтору з вологою і сіркою коксу при низьких температурах в задувочному періоді.

5. Для умов доменної печі № 9 ДМК виконано комплекс досліджень по використанню інформації зондів, що вимірюють температуру газового потоку над поверхнею шихти, для подальшого обґрунтованого використання отриманої зондами інформації [13, 14].

Встановлено оптимальні діапазони зміни розроблених ІЧМ раніше [1, 15–17] температурних показників оцінки розподілу газового потоку по радіусу печі за інформацією зондів. Температурні показники розподілу газового потоку, що визначаються за відношеннями температур в різних зонах перерізу печі, характеризують чотири основні характеристики температури газового потоку над поверхнею шихти: розвиток периферійного газового потоку; розвиток осьового газового потоку; газопроникність проміжної зони і ширину осрової коксової віддушини.

Розроблено і пройшов дослідно-промислове випробування експертний модуль, що генерує коригувальні дії режиму завантаження для підтримки прийняття управляючих дій технологічного персоналу (рис. 6) [1, 17]. Експертний модуль включає розрахунок і відображення у вигляді графіків показників розподілу газового потоку і видачу рекомендацій щодо коригування режиму завантаження в режимі реального часу при

стійкому виході показників розподілу з оптимального діапазону [1, 16, 17]. При роботі експертного модуля в режимі реального часу відбувається коригування меж оптимальних діапазонів температурних показників, яке здійснюється при істотних змінах технології доменної плавки, зокрема, після капітальних ремонтів з шоткретуванням шахти доменної печі та (або) після заміни холодильних плит системи охолодження, після заміни зондів, при зміні дуттєвих добавок, при кардинальній зміні складу шихтових матеріалів. Використання експертного модуля дозволило обґрунтовано та оператив-но коригувати режими завантаження печі.

6. До застосування на ДМК промивних матеріалів на постійній основі розроблено та впроваджено заходи щодо запобігання порушень ходу доменної печі при використанні пиловугільного палива у кількості 140–160 кг/т чавуну [18] та розроблено рекомендації при виробництві агломерату для поліпшення його якості:

6.1. Проведення профілактичних м'яких промивок від флюсових залишків і коксового сміття в проміжній зоні доменної печі сумішшю залізородних матеріалів основністю 0,65–0,85 од. [19]. Для промивок поверхні коксової насадки і області під зоною в'язко-пластичного стану над фурменою зоною необхідно раз на годину (або раз в 8 подач) один скіп суміші матеріалів основністю 0,65–0,85 од., який складається з окатишів (або кускової руди) і агломерату, вантажити у проміжну зону доменної печі без компенсації основності в цій подачі.

6.2. Після неповного випуску передбачити заходи для недопущення неповного випуску продуктів плавки на наступному випуску. Для запобігання переповнення горна при порушенні ходу печі і затримки випуску відстань від поверхні розплаву в горні до осі повітряних фурм повинна бути не менше 0,8–1,0 м для печей малого об'єму. Відповідно до цього, у зв'язку з відсутністю запасу для накопичення продуктів плавки на доменних печах ДМК, рекомендовано зменшити час між випусками при нормальному ході печі. При передбачуваній тривалій відсутності зливу чавуну в конвертерному цеху доцільно зупинити одну з доменних печей цеху, в залежності від частоти неповних випусків і стану печі,

Рис. 7. Зміна вмісту марганцевмісних матеріалів в шихті, вмісту марганцю в чавуні і ступеня використання відновлювальної здатності CO на ДП № 9 ДМК у 2019 р.

при цьому форсувати роботу іншої доменної печі цеху при повному випуску продуктів плавки. При значному дисбалансі доменного газу на комбінаті необхідно здійснити задувку зупиненої печі з закриттям частини повітряних фурм на час відсутності потреби в чавуні.

6.3. При появі ознак похолодання скорочувати витрати ПВП з попереднім зменшенням рудного навантаження.

6.4. При переході на стриманий хід і зменшенні витрати і тиску дуття необхідно скорочувати витрату ПВП в більшій мірі, ніж дуттьові параметри, з урахуванням зменшення розмірів фурменого осередку і погіршення умов спалювання вугілля, перед цим необхідно скоригувати склад шихти зі зменшенням рудного навантаження і з урахуванням збільшення виходу золи.

6.5. Після усунення перших ознак похолодання форсувати хід печі. При появі ознак похолодання необхідно забезпечити на доменній печі повні випуски і продування льотки наприкінці випуску, при відсутності необхідної кількості ковшів тимчасово перевести інші печі цеху в режим роботи на стриманому ході.

6.6. Для покращення умов використання ПВП у кількості більше 140 кг/т чавуну необхідна якісна залізорудна сировина. Для дотримання цієї вимоги, на основі виконаних в ІЧМ лабораторних досліджень, було розроблено наступні рекомендації щодо підвищення якості агломерату виробництва місцевої аглофабрики.

6.6.1. При виробництві агломерату основності 1,18 ± 0,1 од. доцільно підтримувати рівень вмісту FeO в діапазоні 10–14 %. Зменшення вмісту FeO нижче 10,0 % призводить до зниження швидкості спікання на 13,0 % (відн.). При цьому міцність агломерату в початковому стані за показником Б+5 знижується на 6,8 % (відн.).

6.6.2. Підвищення вмісту FeO в агломераті з 14,5 до 18,0 % призводить до оплавлення агломерату, зни-

ження його пористості і, як наслідок, до зниження відновлюваності на 2,6 % і підвищення вмісту FeO в первинному шлаку на 1,6 %, що супроводжується збільшенням маси високосакісного первинного шлаку, який відновлюється тільки прямим шляхом, що призводить до збільшення витрат коксу на 0,3–0,5 % на кожен відсоток відновлюваності.

6.6.3. Встановлено, що з підвищенням витрати агломераційної руди з 250 до 360 кг/т агломерату вертикальна швидкість спікання зростає на 13,8 і 7,0 % для агломерату основності 1,1 і 1,6 од., вихід придатного при цьому знижується на 4,8 і 3,7 %, питома продуктивність зростає на 1,25 і 3,15 % (відн.), відповідно.

6.6.4. Міцність агломерату за показником Б+5 для агломератів основності 1,1 і 1,3 зі збільшенням частки агломераційної руди збільшується на 1–2 %. Для агломерату основності 1,6 од., при збереженні такої ж витрати палива в складі агломераційної шихти, міцність агломерату знижується на 1,5 %.

6.6.5. Високотемпературні властивості агломерату зі збільшенням витрати агломераційної руди від 250 до 360 кг/т агломерату знижуються. Так, температури повної втрати газопроникності шару залізорудної сировини і початку фільтрації рідких фаз для агломератів різної основності, в середньому, знижуються на 10–15 °С, скорочуючи суху зону в доменній печі. Вміст FeO в первинному шлаковому розплаві, в середньому, збільшується на 2,0–2,5 %, підвищуючи витрату коксу на пряме відновлення.

Ефективність використання комплексу заходів з червня 2018 р. виражена в стабілізації роботи доменних печей, чому сприяли: профілактичні промивки горна на постійній основі, стабільне відпрацювання режиму випусків продуктів плавки і використання раціональних систем завантаження при поетапному їх

Рис. 8. Схема установки вдування ПВП у обертові печі: 1 – силос зберігання матеріалу; 2, 3 – електромагнітні клапани шиберних засувки розвантаження силосу; 4, 5 – електромагнітні клапани шиберних засувки завантаження розподільників для дозування і вдування ПВП; 6, 7 – пневмомеханічні клапани системи регулювання максимального тиску; 8, 9 – електромагнітні клапани скидання тиску при порожньому розподільнику; 10, 11 – компенсатори між шиберними засувками; 12, 13 – розподільники для дозування і вдування ПВП; 14, 15 – електромагнітні клапани системи регулювання максимального тиску; 16, 17 – клапани флюїдизації розподільників; 18, 19 – клапани випуску матеріалів; 20, 21 – конуса флюїдизації (F); 22 – транспортувальний трубопровід до пальника

коригуванні за потребою.

7. За рекомендаціями ІЧМ з березня 2019 р. відпрацьовано технологію використання в складі доменної шихти марганцевмісних матеріалів (середньорічний вміст 10,8 кг/т чавуну), що надає один з найбільших промивних ефектів при їх раціональному формуванні при завантаженні в піч і сприяє підтримці технологічної стійкості роботи доменної печі в умовах низької і нестабільної якості шихтових матеріалів і при вдуванні великої кількості ПВП, а також розширює можливості застосування технологічних прийомів і заходів для зниження витрати коксу [20]. Використання цієї технології дозволило збільшити вміст марганцю в чавуні у 3,4 рази (від 0,084 до 0,284 %), збільшити у 3,1 рази (від 10,7 до 33,1 кг/т чавуну) кількість використаного коксу дрібної фракції. Тепловий стан, що оцінюється за вмістом кремнію в чавуні на випуску продуктів плавки,

після введення в шихту марганцю стабілізувався, середньоквадратичне відхилення зменшилося від 0,27 до 0,20 %. Встановлено, що з введенням в шихту марганцю зменшується питома витрата коксу на 4 %. При виробництві чавуну раціональним діапазоном вмісту марганцю в чавуні є 0,25–0,35 % (рис. 7) [20]. Крім цього, поліпшились умови сталеплавильного виробництва при використанні чавуну, збагаченого на марганець, який виконує функцію розкислювача та десульфурізатора.

8. Для умов ДМК за результатами виконаної діагностики роботи установки вдування ПВП у обертові печі розроблено рекомендації щодо проведення відповідних ремонтних робіт та коригування параметрів роботи механізмів установки. Схему установки вдування ПВП у обертові печі показано на рис. 8.

На рис. 9 представлено графіки зміни відхилення по абсолютній величині фактичної витрати ПВП від заданої при вдуванні у обертові печі, а на рис. 10 та 11 – фрагменти циклограм роботи розподільників для дозування і вдування ПВП (тиск та вага, робота нижніх затворів випуску матеріалів) до (рис. 9, травень 2018 р. та рис. 10) і після (рис. 9, квітень 2019 р. та рис. 11) діагностики установки, проведення ремонтних робіт та використання розроблених рекомендацій. Як випливає з рис. 9, після виконання вказаних робіт відхилення по абсолютній величині фактичної витрати ПВП від заданої на обертовій печі № 1 зменшилися від 12,5 до 5,4 %, на обертовій печі № 2 – від 14,8 до 3,9 %. На рис. 10 показано приклад незадовільної роботи дозаторів до проведення діагностики: відсутність стабілізації ваги в розподільнику перед випуском матеріалів (піч № 1, розподільник № 2), що було наслідком вставки спеціальної трубки, яка стравлювала тиск в компенсаторі, в умовах відсутності гумових вставок шиберних засувки, а також відхилення ваги пилу в процесі її дозування в трубопровід (піч № 2, розподільник № 1), при цьому в моменти стрибкоподібних уявних завищень ваги відбувалося повне відкривання клапанів випуску матеріалів, що призводило до пульсації полум'я на пальнику і подальшої неефективності якості випалу вапняку.

Крім цього, відзначалася вкрай нестабільна робота клапанів флюїдизації (імпульсний режим роботи «відкритий-закритий»). Дані клапана повинні були знаходитися постійно у відкритому стані при розвантаженні пилу з розподільників. Викликано це було встановленим в результаті діагностики зносом вузла установки – конуса флюїдизації (F) (рис. 8).

Виходячи з фрагментів циклограм, представлених на рис. 11, після проведення заміни клапанів, ремонту конуса флюїдизації та використання рекомендацій щодо вибору параметрів роботи установки, проблеми роботи дозаторів було усунено. Виконані ремонтні роботи за результатами діагностики та дотримання відповідних рекомендацій дозволили скоротити витрату палива на 1,7–2,0 кг/т вапна, стабілізувати якість вапна та поліпшити екологічне становище ділянки цеху.

Розроблено і рекомендовано до впровадження метод діагностики працездатності механізмів установки вдування ПВП у обертові печі випалу вапняку, який

Відхилення по абсолютній величині фактичних витрат ПВП на пальнику від заданого, %
до ремонтних робіт: обертова піч №1 - 12,5 %, обертова піч №2 - 14,8 %;
після ремонтних робіт: обертова піч №1 - 5,4 %, обертова піч №2 - 3,9 %

Рис. 9. Зміна відхилення по абсолютній величині фактичної витрати ПВП від заданої при вдуванні у обертові печі до (травень 2018 р.) і після (квітень 2019 р.) діагностики установки, проведення ремонтних робіт та використання розроблених рекомендацій

Рис. 10. Фрагменти циклограм роботи дозаторів-розподільників установки ПВП до діагностики та проведення ремонтних робіт

Рис. 11. Фрагменти циклограм роботи дозаторів-розподільників установки ПВП після діагностики, проведення ремонтних робіт та використання розроблених рекомендацій

дозволяє формувати звіти про роботу механізмів в табличному вигляді і у вигляді циклограм за заданий користувачем проміжок часу, на підставі яких генеруються рекомендації з проведення відповідних ремонтних робіт.

Представлені в статті результати свідчать про ефективність тісної співпраці науки і виробництва та важли-

вість впровадження спільних розробок, незважаючи на кризу металургійної галузі України, яка працює в умовах імпортозалежності від коштовних енергоносіїв, що приводить до нестабільності їх поставок, обмеженості капіталовкладень в модернізацію виробничих потужностей, а також інших несприятливих факторів на ринку збуту готової продукції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Семенов Ю.С., Шумельчик Є.І., Горупаха В.В. Діагностика та управління доменною плавкою в змінних паливно-сировинних умовах. Дніпро: Домінанта Прінт, 2018. 260 с.
2. Семенов Ю.С. Разработка и реализация новых подходов к диагностике и управлению доменной плавкой. «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». 2020. № 2. С. 123–131.

3. Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И., Горупаха В.В. Розробка і впровадження нових підходів до діагностики та управління доменною плавкою. *Сб. науч. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. 2019. Вып. 33. 13 с.
4. Канаев В.В., Кобеза И.И., Бузоверя М.Т. и др. Контроль распределения дутья по воздушным фурмам доменной печи. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1995. № 2. С. 69–71.
5. Bol'shakov V.I., Shuliko S.T., Kanaev V.V., Shutylev F.M., Loginov V.N. Study of the charge and gas-flow distributions in a large blast furnace with a bell-less charging apparatus. *Metallurgist*. December 1997. Vol. 41. Issue 12. P. 389–390. <https://doi.org/10.1007/BF02768853>
6. Большаков В.И., Шулико С.Т., Лебедь В.В., Семенов Ю.С., Дмитренко К.А., Попов В.Н. Распределение дутья по окружности в доменной печи объемом 5000 м³ при ее работе и выдувке. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2005. № 2. С. 10–13.
7. Semenov Yu.S., Horupakha V.V., Semion I.Yu., Orobtssev A.Yu., Shumelchik E.I. Effectiveness of implementation of the circumferential uneven pulverized coal distribution on the blast furnace air tuyeres. *Chernye Metally*. 2019. Vol. 10. P. 11–16.
8. Патент України на винахід. Спосіб управління окружним розподілом дуття в доменній печі / Ю.С. Семенов, В.В. Горупаха, Е.І. Шумельчик, заявл. № а201908461 від 14.08.2019 р.
9. Geerdes M. Co-Injection of Coal and Gas in Blast Furnaces: Are There Hidden Benefits? *Iron & Steel Technology*. 2016. № 4. P. 82–89.
10. Чайка А.Л., Корнилов Б.В., Сохацкий А.А., Шостак В.Ю., Васильев Л.Е., Фоменко А.П. Оценка влияния совместного вдувания пылеугольного топлива и природного газа на полноту сжигания угольных частиц в фурменном очаге доменной печи. *Сталь*. 2018. № 6. С. 6–10.
11. Кузнецов А.М., Коваленко А.Г., Зубенко А.В., Горупаха В.В., Нестеров А.С., Можаренко Н.М., Семенов Ю.С. Основные положения задувок доменных печей после остановок различной продолжительности. *Сб. науч. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. 2015. Вып. 30. С. 90–109. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/143948>
12. Semenov Yu.S., Horupakha V.V., Shumelchik E.I. The basic conditions of blowing of a blast furnace after its durable stopping for more than 80 days without tapping of freezing iron. *Chernye Metally*. 2017. Vol. 11. P. 28–36.
13. Semenov Yu.S., Shumel'chik E.I., Gorupakha V.V. Efficient Management of the Charging of Blast Furnaces and the Application of Contemporary Means of Control Over the Variable Technological Conditions. *Metallurgist*. March 2018. Vol. 61. Issue 11–12. P. 950–958. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0591-4>
14. Большаков В.И., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И., Горупаха В.В., Наследов А.В. Использование информации о температуре над поверхностью засыпи шихты для контроля доменной плавки. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 3. С. 2–7.
15. Semenov Yu.S., Shumelchik E.I., Horupakha V.V., Kuznetsov A.M., Zubenko A.V., Kovalenko A.G. Using Thermal Probes to Regulate the Batch Distribution in a Blast Furnace with Pulverized-Coal Injection. *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. No. 6. P. 389–393. <https://doi.org/10.3103/S0967091217060092>
16. Семенов Ю.С. Использование информации термозондов для управления загрузкой доменной печи. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2018. № 7. С. 208–215.
17. Semenov Yu.S., Shumelchik E.I., Horupakha V.V. Expert Module of the Thermal Probe System for Blast Furnace Charging Control. *Steel in Translation*. 2018. Vol. 48. No. 12. P. 802–806. <https://doi.org/10.3103/S0967091218120136>
18. Semenov Yu.S., Horupakha V.V., Shumelchik Ye.I. Measures for Preventing Disruption in the Blast Furnace Operation under Use of Pulverized Coal. *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50. No. 2. P. 100–106. <https://doi.org/10.3103/S0967091220020096>
19. Vinogradov E.N., Kal'ko A.A., Volkov E.A., Nesterov A.S., Ivancha N.G. Improvement of blast furnace smelting at PAO Severstal. *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46. No. 1. P. 49–53. <https://doi.org/10.3103/S0967091216010162>
20. Semenov Yu.S., Gorupakha V.V., Kuznetsov A.M., Semion I.Yu., Shumel'chik E.I., Vashchenko S.V., Khudyakov A.Yu. Experience of Using Manganese-Containing Materials in Blast Furnace Charge. *Metallurgist*. January 2020. Vol. 63. Issue 9–10. P. 1013–1023. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00920-1>

Надійшла 12.02.2020

REFERENCES

1. Semenov, Yu.S., Shumelchik, E.I., Horupakha, V.V. (2018). Diagnostics and Control of Blast Furnace Melting under the Variable Fuel and Raw Material Conditions. Dnipro: Dominanta Print, 260 p. [in Ukrainian].
2. Semenov, Yu.S. (2020). Development and implementation of the new approaches to diagnostics and management of the blast-furnace smelting. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, no. 2, pp. 123–131 [in Russian].
3. Semenov, Yu.S., Shumelchik, E.I., Horupakha, V.V. (2019). Development and implementation of the new approaches to diagnostics and management of the blast furnace smelting. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy: Coll. Works IChM*, iss. 33, 13 p. [in Ukrainian].

4. Kanayev, V.V., Kobeza, I.I., Buzoverya, M.T. et al. (1995). Monitoring the distribution of blast over the air tuyeres of a blast furnace. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost'*, no. 2, pp. 69–71 [in Russian].
5. Bol'shakov, V.I., Shuliko, S.T., Kanaev, V.V., Shutylev, F.M., Loginov, V.N. (1997). Study of the charge and gas-flow distributions in a large blast furnace with a bell-less charging apparatus. *Metallurgist*. December 1997, vol. 41, iss. 12, pp. 389–390. <https://doi.org/10.1007/BF02768853>
6. Bol'shakov, V.I., Shuliko, S.T., Lebed', V.V., Semenov, Yu.S., Dmitrenko, K.A., Popov, V.N. (2005). Distributing of blowing on a circumference in a high furnace by volume of 5000 m³ during its work. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost'*, no. 2, pp. 10–13 [in Russian].
7. Semenov, Yu.S., Horupakha, V.V., Semion, I.Yu., Orobtssev, A.Yu., Shumelchik, E.I. (2019). Effectiveness of implementation of the circumferential uneven pulverized coal distribution on the blast furnace air tuyeres. *Chernye Metally*, vol. 10, pp. 11–16.
8. Semenov, Yu.S., Horupakha, V.V., Shumelchik, E.I. (2019). Patent of Ukraine for invention. Method for controlling district blast distribution in blast furnace, declared no. a201908461, 14.08.2019 [in Ukrainian].
9. Geerdes, M. (2016). Co-Injection of Coal and Gas in Blast Furnaces: Are There Hidden Benefits? *Iron & Steel Technology*, no. 4, pp. 82–89.
10. Chaika, A.L., Kornilov, B.V., Sokhatsky, A.A., Shostak, V.Yu., Vasiliev, L.E., Fomenko, A.P. (2018). Assessment of the effect of co-injection of pulverized coal fuel and natural gas on the completeness of burning of coal particles in the tuyere source of a blast furnace. *Stal'*, no. 6, pp. 6–10 [in Russian].
11. Kuznetsov, A.M., Kovalenko, A.G., Zubenko, A.V., Horupakha, V.V., Nesterov, A.S., Mozharensko, N.M., Semenov, Yu.S. (2015). Basic conditions of blowing blast furnaces after stoppages of different duration. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy: Coll. Works IChM*, iss. 30, pp. 90–109. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/143948> [in Russian].
12. Semenov, Yu.S., Horupakha V.V., Shumelchik E.I. (2017). The basic conditions of blowing of a blast furnace after its durable stopping for more than 80 days without tapping of freezing iron. *Chernye Metally*, vol. 11, pp. 28–36.
13. Semenov, Yu.S., Shumel'chik, E.I., Gorupakha, V.V. (2018). Efficient Management of the Charging of Blast Furnaces and the Application of Contemporary Means of Control over the Variable Technological Conditions. *Metallurgist*. March 2018, vol. 61, iss. 11–12, pp. 950–958. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0591-4>
14. Bol'shakov, V.I., Semenov, Yu.S., Shumelchik, E.I., Horupakha, V.V., Nasledov, A.V. (2015). The use of information on temperature over the surface of the charging bed to control blast furnace smelting. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost'*, no. 3, pp. 2–7 [in Russian].
15. Semenov, Yu.S., Shumelchik, E.I., Horupakha, V.V., Kuznetsov, A.M., Zubenko, A.V., Kovalenko, A.G. (2017). Using Thermal Probes to Regulate the Batch Distribution in a Blast Furnace with Pulverized-Coal Injection. *Steel in Translation*, vol. 47, no. 6, pp. 389–393. <https://doi.org/10.3103/S0967091217060092>
16. Semenov, Yu.S. (2018). Using of thermal probes information to control blast furnace charging. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost'*, no. 7, pp. 208–215 [in Russian].
17. Semenov, Yu.S., Shumelchik, E.I., Horupakha, V.V. (2018). Expert Module of the Thermal Probe System for Blast Furnace Charging Control. *Steel in Translation*, vol. 48, no. 12, pp. 802–806. <https://doi.org/10.3103/S0967091218120136>.
18. Semenov, Yu.S., Horupakha, V.V., Shumelchik, Ye.I. (2020). Measures for Preventing Disruption in the Blast Furnace Operation under Use of Pulverized Coal. *Steel in Translation*, vol. 50, no. 2, pp. 100–106. <https://doi.org/10.3103/S0967091220020096>.
19. Vinogradov, E.N., Kal'ko, A.A., Volkov, E.A., Nesterov, A.S., Ivancha, N.G. (2016). Improvement of blast furnace smelting at PAO Severstal. *Steel in Translation*, vol. 46, no. 1, pp. 49–53. <https://doi.org/10.3103/S0967091216010162>
20. Semenov, Yu.S., Gorupakha, V.V., Kuznetsov, A.M., Semion, I.Yu., Schumel'chik, E.I., Vashchenko, S.V., Khudyakov, A.Yu. (2020). Experience of Using Manganese-Containing Materials in Blast Furnace Charge. *Metallurgist*. January 2020, vol. 63, iss. 9–10, pp. 1013–1023. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00920-1>

Received 12.02.2020

Summary

Yu.S. Semenov¹, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Senior Researcher, e-mail: yuriy.semenov.isi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2299-5742>, Web of Science ResearcherID: S-4494-2017

A.L. Podkorytov², Managing Director

V.V. Horupakha¹, Researcher, e-mail: viktor.horupakha@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0531-1871>

I.Yu. Semion², Director of Quality – Head of Product Quality Management

A.Yu. Orobtssev², PhD (Engin.), Head of the Technical Management

A.S. Nesterov¹, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Head of the Department, e-mail: asn.dnepr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0183-0327>

E.I. Shumelchik¹, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: ievgen.shumelchik@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5350-6425>

S.N. Pustovoi², Head of the Iron making Department

O.A. Gaponenko², Head of the Blast Furnace Department

V.V. Solovyov², Leading Engineer of the Technical Management

¹*Z.I. Nekrasov Iron & Steel Institute of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)*

²*PJSC “Dneprovsky Iron & Steel Integrated Works” (Kamianske, Ukraine)*

New scientific and applied results of studies efficiency use of pulverized coal in the production of cast iron and lime burning

The article presents the main results of cooperation of the Z.I. Nekrasov Iron & Steel Institute of the NAS of Ukraine and PJSC “Dneprovsky Iron & Steel Integrated Works” in 2017–2019 on the subject of blast furnace production and development of technology of injection of pulverized coal in rotary kilns of lime burning. There have been highlighted the results of a set of measures to ensure the rational distribution of coal dust in the blast furnace tuyeres to align the thermal state of the tuyere zone along the circumference of blast furnaces; the results of the use of the technology of sharing pulverized coal and natural gas; recommendations for blowing of blast furnaces after stopping for a period exceeding the allowable one, without prior release of freezing iron, due to which blast furnaces were accidentally put into operation with the achievement of the planned targets; the results of the use of information from probes that measure the gas flow temperature above the surface of the charge to further substantially adjust the furnace charging modes by means of a developed expert module that generates the charging mode corrective actions to support the decision-making of technological personnel; the results of applying a set of measures to prevent blast furnace malfunction when using pulverized coal in the amount of more than 140 kg/t of cast iron without the use of special flushing materials; results of efficiency of the spent technology of use in the composition of blast furnace charge of manganese-containing materials on a constant basis and results of implementation of the method of diagnostics of the efficiency of the mechanisms of installation of pulverized coal in a rotary kiln of lime with the further development of recommendations for adjusting the parameters of the operation of the setting mechanisms.

Keywords

Blast furnace, pulverized coal, natural gas, coke consumption, blast furnace blowing, thermal probe, melting products, manganese-containing materials, rotary kiln of lime burning.