

УДК 669.162.21:669.782:669.16.04

М. Г. Іванча¹, с.н.с., ORCID 0000-0002-5366-9328**О. С. Нестеров**¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-0183-0327**І. Г. Муравйова**¹, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-5926-7787**Л. І. Гармаш**¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-9540-3037**В. І. Вишняков**¹, н.с., ORCID 0000-0002-5538-6962**В. Р. Щербачов**¹, м.н.с., аспірант, ORCID 0000-0002-6734-0451**К. П. Єрмоліна**¹, пров. інж., ORCID 0000-0001-6819-9886¹ *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИМОГ ДО РОЗПОДІЛУ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ГАЗОВОГО ПОТОКУ ПРИ РОБОТІ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ КРЕМНІЮ У ЧАВУНІ ТА ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ НА СУЧАСНИХ ДОМЕННИХ ПЕЧАХ

Анотація. Зниження вмісту кремнію у чавуні – один з найбільш ефективних шляхів зменшення витрат палива та відновників у доменному процесі. Складнощі технології виплавки чавуну з низьким вмістом кремнію пов'язані з високим рудним навантаженням та низькою витратою твердого палива, що проявляється у зменшенні товщини «кокових вікон» з відповідним погіршенням газопроникності стовпа шихти та зниженням стабільності ходу плавки, а також зі зниженням теплового рівня в'язко - пластичної зони, зміщенням її кордонів у напрямку верху печі та збільшенням її розмірів у цілому. Крім того, зменшення кількості твердого палива у складі шихти та посилення вимог до якості та стабільності характеристик залізорудних матеріалів може зумовити зменшення запасу тепла у горні. Мета досліджень - удосконалення технологічних вимог до розподілу шихтових матеріалів і газового потоку, як основних положень, що визначають параметри режиму завантаження доменної печі у конкретних умовах з урахуванням особливостей та технологічних обмежень доменної плавки з низьким вмістом кремнію у чавуні. Виконано узагальнення результатів аналітичних і лабораторних досліджень, а також досвіду промислових плавок в умовах виробництва низькремнистого чавуну. Розроблені технологічні вимоги до розподілу рудного навантаження, що забезпечує стійкий осьовий хід доменної печі у специфічних умовах плавки, до розподілу залізорудних компонентів шихти, виходячи із задач забезпечення стабільності гарнісажного шару та збереження футерівки, а також до розподілу різних видів заміників залізорудних шихтових матеріалів та коксу з урахуванням їх властивостей та технологічних характеристик. Рекомендовані параметри проведення «м'якого» профілактичного промивання доменних печей з метою забезпечення необхідної газопроникності стовпа шихти, дифузійної здатності коксової насадки та підтримки стійкого осьового характеру розподілу газового потоку.

Виконана оцінка можливостей реалізації удосконалених технологічних вимог до розподілу шихти та газового потоку в умовах виплавки низькокремнистого чавуну на сучасних доменних печах.

Ключові слова: доменна піч, низькокремниста плавка, технологічні вимоги, шихтові матеріали, рудне навантаження, коксові «вікна», газовий потік, розподіл, осьовий хід, компоненти, замінники, коксова насадка, газопроникність, дифузійна здатність, промивання.

Посилання для цитування: Удосконалення технологічних вимог до розподілу шихтових матеріалів та газового потоку при роботі доменних печей з низьким вмістом кремнію у чавуні та оцінка можливості їх реалізації на сучасних доменних печах / М. Г. Іванча, О. С. Нестеров, І. Г. Муравйова, Л. І. Гармаш, В. І. Вишняков, В. Р. Щербачов, К. П. Єрмоліна // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 76-104. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-76-104>

Постановка проблеми

Технологічні вимоги до розподілу шихтових матеріалів і газового потоку є основними положеннями, що визначають параметри режиму завантаження доменної печі в конкретних технологічних умовах [1-3]. До технологічних особливостей, якими характеризується робота доменної печі з низьким вмістом кремнію в чавуні, у першу чергу, відносяться високе рудне навантаження та низька витрата твердого палива [4-6]. При традиційному підході до регулювання теплового стану доменної печі – зміною маси коксу в подачі – це проявляється, перш за все, у зменшенні товщини «коксівих вікон» з відповідним погіршенням газопроникності стовпа шихти та зниженням стабільності ходу плавки. Складнощі технології виплавки чавуну з низьким вмістом кремнію також пов'язані зі зниженням теплового рівня в'язко-пластичної зони, зміщенням її кордонів у напрямку верху печі та збільшенням її розмірів у цілому. Крім того, зменшення кількості твердого палива у складі шихти може зумовити зменшення запасу тепла у горні, що посилює вимоги до якості та стабільності характеристик залізорудних матеріалів. У свою чергу використання високоякісної залізорудної сировини може супроводжуватися зменшенням виходу шлаку, що посилює негативні наслідки зменшення запасу тепла.

З урахуванням наведених особливостей роботи доменних печей з низьким вмістом кремнію в чавуні низка положень технологічних вимог до розподілу шихтових матеріалів і газового потоку потребує уточнень та корегування.

Мета роботи

Удосконалення та систематизація технологічних вимог до розподілу шихтових матеріалів та газового потоку при роботі

доменних печей з низьким вмістом кремнію у чавуні.

Аналіз останніх публікацій

Технологічні вимоги до розподілу шихтових матеріалів, дотримання яких у процесі завантаження шихти у доменну піч забезпечує високий рівень виробництва чавуну та економічність її роботи, змінюються та удосконалюються у відповідності до розвитку рівня технології плавки, змін у складі та якості шихти, удосконалення обладнання та систем управління доменною плавкою. У дослідженнях В. К. Грузинова, В. І. Большакова, В. П. Тарасова, В. І. Логинова, В. М. Ковшова, І. Ф. Курунова, М. М. Френкеля, К. М. Бугайова, В. О. Доброскока, Й. Бухвальдера та ін., а також у роботах, що виконувалися у останні десятиріччя [7-10] у різному виді та обсязі сформульовані вимоги до розподілу залізородної частини шихти та коксу у цілому, тобто, вимоги до радіального розподілу рудного навантаження. Роботи [9, 10] також присвячені дослідженням розподілу рудного навантаження, але разом з тим досить значну увагу приділено обґрунтуванню доцільності завантаження «осьових» порцій коксу.

У зв'язку з розвитком технології та збільшенням виробництва окатишів і масштабним введенням їх у шихту доменних печей на основі результатів численних досліджень та практичного досвіду, у тому числі, негативного, що виражався у прискореному зносі кладки шахти та спонтанному сході гарнісажу, були сформульовані перші технологічні вимоги до розподілу основних залізородних компонентів шихти – агломерату та окатишів [11-17]. Подальше рішення задачі запобігання (зменшення) агресивного впливу розплавів окатишів та забезпечення формування стабільного гарнісажу знайшло відображення у роботах О. С. Нестерова, М. М. Можаренко, Ф. М. Шутилева, С. Т. Шуліко та ін. [18-23], результати яких дозволили зробити висновки про необхідність розробки технологічних прийомів завантаження агломерату та окатишів з забезпеченням формування їх сумішей заданого складу у різних кільцевих зонах колошника.

Зростаючий дефіцит паливних ресурсів і, у першу чергу, коксу обумовив пошуки більш дешевих замінників, найбільш застосовуваними з яких, стали фракції коксу, що відсівалися, але раніше не використовувалися безпосередньо в доменній плавці («кокс – горіх» - фракція «25-40 мм», «кокс – горішок» - фракція «10-25 мм» та «коксик» - фракція «0-10 мм»). У роботах [24-32] рекомендовані кількісні показники відносно використання цих замінників у шихті доменних печей різного об'єму, які визначені, переважно, виходячи з результатів промислового освоєння завантаження фракцій коксу, що відсіваються. У публікаціях

В. П. Лялюка, Й. Г. Товаровського та ін. [33-36] наведені результати досліджень та промислових випробувань, а також узагальнення досвіду завантаження антрациту у доменну піч у якості замітника коксу. Разом з тим, у більшості випадків, визначення параметрів технологічних прийомів завантаження твердих заміників коксу, що використовувалися на практиці, базувалися на спрощених уявленнях про розподіл шихтових матеріалів безпосередньо на поверхні засипу. Вважалося, що вивантаження шихтового матеріалу у будь-яку кільцеву зону колошнику забезпечує переважну його концентрацію у цій зоні. Як показали аналітичні та експериментальні дослідження, виконані ІЧМ, без формування профілю засипу спеціальної конфігурації центр ваги вивантаженого шару може бути зміщений на дві та більше кільцеві зони по відношенню до тієї, в яку проводилося вивантаження. У зв'язку з цим, рекомендації та положення технологічних інструкцій, щодо завантаження твердих заміників коксу, потребували суттєвого корегування з урахуванням результатів експериментальних досліджень та математичного моделювання процесу завантаження доменних печей. Роботи [37, 38] присвячені утилізації вторинних залізovмісних ресурсів – різних видів руд і шлаків та містять результати дослідних та промислових плавок з наведенням досягнутих кількісних показників використання цих компонентів у складі доменної шихти. Слід відзначити також розробки в галузі використання відсіву основних залізovрудних компонентів шихти – агломерату та окатишів, як у непідготовленому вигляді, включаючи дрібні та пилоподібні фракції, так і з попереднім калібруванням відсіву шляхом додаткового просіювання [39-42].

У частині завантаження промивних подач наявні результати містять рекомендації щодо складу промивних сумішей та тривалості промивок, які розроблено на базі лабораторних досліджень миючих властивостей окремих шихтових матеріалів та їх сумішей, а також підsumків промислових промивань доменних печей [34, 43-45].

Результати вказаних вище робіт являють собою значний внесок у теорію та практику доменного виробництва, зокрема в розвиток та удосконалення режимів та технологічних прийомів завантаження доменних печей, однак, не можуть розглядатися, як цілісні технологічні вимоги через недостатній рівень їх узагальнення та систематизації.

Найбільш вагомий внесок у розробку та систематизацію технологічних вимог до розподілу шихтових матеріалів зроблено В. І. Большаковим на основі багаторічного досвіду теоретичних та експериментальних досліджень, що виконувалися безпосередньо ним та очолюваним ним колективом [2, 3, 46, 47], однак, при цьому більшість технологічних вимог формулювалася в умовах обмеженої

кількості компонентів шихти. Окрім того не розглядалися окремо технологічні вимоги (або ж корегування їх положень) щодо завантаження доменних печей в умовах їх роботи при зниженні вмісту кремнію у чавуні.

Результати досліджень

Основною особливістю доменної плавки з низьким вмістом кремнію у чавуні, як вказувалося вище, є робота печі з високою рудним навантаженням та, відповідно, зниженим запасом тепла. У таких умовах відповідних змін зазнає структура стовпа шихти і, у першу чергу, шари коксу – «коксіві вікна». Слід також враховувати трансформацію коксових вікон у процесі руху їх у напрямку горну. При опусканні шихти геометричні та газодинамічні параметри «коксівих вікон» зазнають суттєвих змін – маса коксової частини подачі перерозподіляється на більшій площі відповідно до збільшення площі поперечного перерізу доменної печі. При роздільному завантаженні коксової та залізородної частин подачі та припущенні про сталість об'єму коксової частини подачі в процесі опускання до рівня розпару, взаємозв'язок висот коксових шарів на рівні колошника та рівні розпару визначатиметься співвідношенням квадратів діаметрів доменної печі на цих рівнях d_k^2/d_p^2 (d_k – діаметр колошника, м; d_p – діаметр розпару, м). Як правило, відношення цих величин на доменних печах України становить 0,65-0,68, що навіть при прийнятих припущеннях, які багато у чому ідеалізують умови трансформації коксових шарів при опусканні, зумовлює зменшення їх висоти на рівні розпару у два і більше разів по відношенню до вхідної величини. Слід також враховувати, що в процесі опускання коксового шару в горн середній діаметр його шматків зменшується – це обумовлено їх механічним руйнуванням та хімічною взаємодією з газовим середовищем та залізородними матеріалами. Тобто, на рівнях розташування кореня в'язко-пластичної зони газопроникна здатність коксового шару (або «коксівих вікон») суттєво знижується. Погіршення газопроникності коксових вікон впродовж опускання в горн печі погіршується проникненням дрібних частинок залізородних матеріалів з вищих шарів. Згідно з результатами досліджень газопроникності шару «кокс – агломерат», отриманими Інститутом хімічної технології та палива Технічного університету в м. Клаусталі (ФРН), глибина проникнення дрібних фракцій агломерату у шар коксу в основному визначається діапазоном крупності коксу у шарі і може становити 75-150 мм. При цьому відповідне підвищення втрат напору в шарі «кокс – агломерат» у холодному стані (до початку плавлення) зі збільшенням глибини проникнення дрібних фракцій агломерату у шар коксу може досягати 33% [48]. Власний досвід

багатократних відборів проб фурменого коксу показав також, що середній діаметр шматків коксу у процесі його руху до рівня фурм суттєво зменшується (зменшення може досягати 100-130% по відношенню до початкового). Це, відповідно, знижує порізність шару та зменшує товщину коксових шарів. Зниження порізності приблизно можна оцінити 25-30%, а відповідну зміну насипної ваги – у 5-10%. Аналіз результатів техніко-економічних показників доменної печі, яка протягом тривалого періоду працювала зі змінною масою подачі, і, відповідно, з різною товщиною коксового шару показав, що при зменшенні цього параметра до величини меншої за 500 мм відбувається суттєве зниження витрати дуття та погіршення характеристик газодинамічного режиму загалом, що супроводжується ослабленням технологічної стійкості плавки. При роботі доменної печі з низьким вмістом кремнію в чавуні вплив факторів, що погіршують параметри «кокових вікон» та газопроникність стовпа шихти у цілому посилюється, внаслідок підвищення загального рівня рудного навантаження.

Поліпшення структури стовпа шихти є одним із суттєвих резервів підвищення ефективності доменної плавки. Оскільки, коксова частина подачі (коксова порція) є основним елементом цієї структури, що забезпечує проходження газу від фурм до поверхні засипу і його розподіл по всьому радіусу доменної печі, при розробці режимів завантаження, які застосовуються при виплавці чавуну з низьким вмістом кремнію, необхідно виходити з вимоги забезпечення мінімально допустимої товщини шару коксу з урахуванням необхідності регулювання теплового стану доменної печі та можливих коливань складу і якості шихтових матеріалів.

Як зазначалося вище, умовою отримання чавуну зі зниженим вмістом кремнію, якісного за вмістом сірки, є робота доменної печі на стійких за температурою плавлення та в'язкістю шлаках. Проте, у реальних змінних шихтових умовах важко домогтися стабільного, рівного ходу доменних печей через значну відмінність фізико-хімічних властивостей завантажуваних залізрудних матеріалів, що зумовлює нестабільний шлаковий режим та зміну складу і властивостей шлаків (в'язкості, температури плавлення та десульфуратійної спроможності). Звідси слідує висновок про необхідність розробки та застосування спеціальних прийомів завантаження багатокомпонентної шихти, що забезпечують змішування компонентів залізрудної частини шихти задля уникнення їх локального зосередження в будь-яких зонах доменної печі з подальшим можливим розривом полів шлакоутворення та збільшенням вертикальних розмірів в'язко-пластичної зони.

Як зазначають дослідники Японії, для погіршення умов

відновлення та переходу кремнію в чавун доцільно підтримувати високе рудне навантаження у периферійній зоні та виражений осьовий хід доменної печі з чітко обмеженою осьовою віддушиною [49]. Промисловий досвід роботи доменної печі, що виплавляє чавун з низьким вмістом кремнію, показав, що раціональний розподіл рудних навантажень при виробництві низькокремнистого чавуну може виглядати наступним чином (рис. 1).

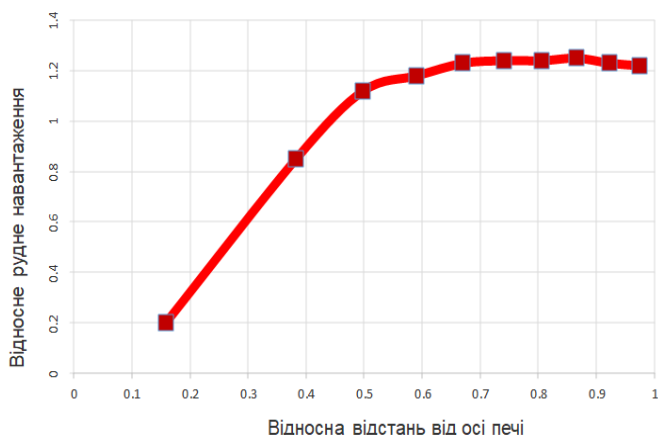


Рисунок 1 – Раціональний розподіл відносних рудних навантажень на колошнику доменної печі при виплавці чавуну з низьким вмістом кремнію.

Характерними рисами цього режиму є відносно рівномірний розподіл рудних навантажень у периферійній (10-й – 8-й), проміжній (7-й – 4-й) та крайній приосьовій (3-й) кільцевих зонах з максимумом на ділянці 8-ї – 6-ї зон, що на 10-30% перевищує середнє значення, та явно вираженою осьовою віддушиною, яка формується досить різким лінійним зменшенням рудного навантаження від 3-ї кільцевої зони у напрямку осі печі. Однак при розробці та виборі параметрів режиму завантаження для реального об'єкта слід враховувати, що технологічні вимоги містять рекомендації щодо загального характеру розподілу шихтових матеріалів та обмежень можливих діапазонів параметрів, але в кожному випадку робочі значення цих параметрів повинні прийматися на підставі детального аналізу конкретних технологічних умов плавки.

Одним із ефективних напрямів зниження вмісту кремнію в чавуні на підставі результатів раніше виконаних досліджень було визначено зниження розкиду вмісту SiO_2 в агломераті. У зв'язку з цим, при

використанні двох і більше видів агломерату в шихті раціональним є застосування технологічних прийомів усереднення характеристик агломерату у складі подачі (порції).

Виходячи з положень теорії рівноваги та кінетики реакцій, забезпечення низького вмісту кремнію при збереженні необхідної температури рідкого чавуну пов'язують також зі зменшенням вертикальних розмірів зони когезії в печі та тривалості перебування матеріалів [49], чому сприяє формування максимально однорідних сумішей з агломерату та окатишів у кожній кільцевій зоні колошника. При цьому вміст цих компонентів в окремих кільцевих зонах, як правило, через наявність інших технологічних вимог і конкретних властивостей матеріалів може суттєво відрізнятись.

Оптимізація форми та геометричного положення в'язко-пластичної зони також сприяє зниженню вмісту кремнію в чавуні. Коригування параметрів в'язко-пластичної зони здійснюється шляхом регулювання розподілу компонентів шихти, зокрема складових її залізородної частини [51, 52].

Як відомо, вміст агломерату і окатишів визначає температури початку розм'якшення і плавлення суміші залізородних компонентів, які, у свою чергу, багато в чому, визначають положення поверхні плавлення і товщину в'язко - пластичної зони [53, 54].

Як зазначалося вище, визначальне значення задля забезпечення виплавки чавуну зі зниженим вмістом кремнію має стабільність процесу – рівний схід шихти, сталість витрати дуття, раціональний графік випусків продуктів плавки, що забезпечує їх своєчасне і, по можливості, рівномірне видалення з горна. Стабільність плавки суттєво залежить від стану захисного гарнісажного шару шахти, заплечиків та горна доменної печі. Гарнісаж шахти та заплечиків повинен забезпечувати задані характеристики теплообміну та температурного рівня холодильників і кожуха печі, а також захист внутрішньої поверхні робочого простору печі від агресивних термічних, хімічних та механічних впливів. При цьому гарнісаж повинен мати властивість самооновлення при відносно постійній товщині, що забезпечується плавним сповзанням шарів гарнісажу у горн із заміщенням їх новоутвореними. Небезпечним збуренням для нормального ходу плавки є лавиноподібний схід гарнісажу з приходом у горн великих мас тугоплавких конгломератів. Не менш небезпечними є локальні або кільцеві нерухомі тугоплавкі та важкорозчинні утворення на стінках шахти з тенденцією до збільшення їх розмірів внаслідок зниження температури їхньої поверхні. При цьому порушується розподіл та схід шихти, спотворюється розподіл газового потоку. Наведені випадки

негативних збурень ходу плавки є наслідком порушення заданих параметрів температурного та шлакового режимів у пристінковій зоні доменної печі, які, у свою чергу, викликаються неправильними реалізацією та/або вибором складу шихти, параметрів режиму її завантаження та тепло - відновлювальної обробки.

За результатами лабораторних досліджень та проплавок сумішей залізородних матеріалів різного складу та властивостей, виконаних ГЧМ, встановлено, що для доменної печі, що виплавляє чавун з низьким вмістом кремнію, склад залізородної суміші в пристінковій зоні при задовільній порізності коксової насадки повинен визначатися, виходячи з вимог забезпечення кількості первинного шлакового розплаву в діапазоні 6-12% та вмісту FeO у ньому в діапазоні 10-15%. Зі збільшенням кількості матеріалу, «завислого» на коксовій насадці, збільшується кількість металу з високим вмістом вуглецю і кремнію, а підвищення вмісту FeO обумовлює посилення агресивності первинного шлакового розплаву і може призвести до порушення процесу утворення гарнісажу, його сходу і виходу розплаву на контакт з футеруванням. Послабити агресивний вплив продуктів плавки на футерування доменної печі можна шляхом формування раціонального складу шлакового розплаву і його розподілу по перерізу доменної печі, що досягається реалізацією заданого розподілу шихтових матеріалів на колошнику, в першу чергу, зниженням кількості окатишів в пристінковій зоні до технологічно обґрунтованого рівня [22, 50, 51, 54].

Слід зазначити, що у зв'язку із суттєвим збільшенням компонентів шихти, різноманіттям та нестабільністю їх властивостей, перманентними змінами умов доменної плавки у цілому, рекомендовані на основі відомих технологічних вимог та попереднього досвіду параметри шлакового режиму та режиму завантаження доменної печі перед застосуванням у промисловій практиці повинні бути уточнені за результатами попередніх аналітичних розрахунків високотемпературних властивостей конкретних шихтових матеріалів, їх сумішей та розплавів, які із них утворюються.

Найбільш широко використовуваним у практиці доменного виробництва резервом підвищення ефективності плавки нині є використання різних заміників коксу. У складі шихти використовуються такі вуглецевмісні матеріали: фракції коксу, що відсіваються («кокс – горіх», «кокс – горішок», «коксік»), антрацит, шунгіт, пековий кокс та ін. Фракції коксу, що відсіваються, є природним продуктом підготовки металургійного коксу і тому завантаження їх в якості твердого заміника коксу застосовується

найширше і є штатним технологічним прийомом у складі технології завантаження доменної печі. Разом з тим, підвищені вимоги до стабільності ходу плавки при виробництві чавуну з низьким вмістом кремнію, у свою чергу, зумовлюють кількісні обмеження щодо завантаження відсіяних фракцій коксу, більш жорсткі вимоги до їх гранулометричного складу, вибору технологічних прийомів їх завантаження, а також до вибору та організації превентивних заходів, що запобігають засміченню коксової насадки та «тотермана», шляхом спрямованого проведення «м'яких» та «цілових» промивань доменної печі. Промивання доменної печі – необхідна складова технології низькокремнистої плавки, оскільки встановлено, що покращення газопроникності, як коксової насадки, так і стовпа шихти по всій висоті шахти є суттєвим резервом зменшення вмісту кремнію в чавуні. При підвищенні порізності коксового «тотермана» з 0,36 до 0,42 прогнозний вміст кремнію в чавуні, за даними розрахунків, знизився з 0,31% до 0,19%, відповідно.

Підвищенню газопроникності стовпа шихти може сприяти завантаження «коксу – горішка» фракції «10-25 мм» у складі залізородних порцій (частин подачі), особливо в суміші з низькоосновними залізородними матеріалами (окатишами). Цей технологічний прийом може ефективно застосовуватися для покращення газодинамічних властивостей залізородних шарів [56].

Щодо кількісних обмежень завантаження фракцій коксу, які відсіваються, на підставі експертної оцінки можна сказати, що меншою мірою це стосується добре підготовленого сухого «коксу-горіха» фракції «25-40 мм». Доменні печі об'ємом до 1500 м³ взагалі можуть працювати на 100% коксі цієї фракції, який, крім підвищеного по відношенню до інших фракцій показника гарячої міцності CSR, має хорошу газопроникність шару, обумовлену звуженим діапазоном крупності шматків.

Кількість «коксу – горішка» фракції «10-25 мм», використовуваного при виплавці низькокремнистого чавуну, доцільно обмежити рівнем 70-75% від максимальної кількості цього компонента (80-100 кг/т чавуну), що завантажується при виплавці передільного чавуну з традиційним вмістом кремнію > 0,5%. Надмірна кількість дрібних класів коксу в окремих секторах печі призводить до неповного їх витрачання впродовж опускання у горні печі і внаслідок цього – до погіршення дренажної здатності коксової насадки.

Завантаження «коксика» при виплавці чавуну з низьким вмістом кремнію, по можливості, слід уникати.

В цілому, в умовах низькокремнистої плавки при використанні твердих заміників коксу у складі шихти, розробці та виборі

технологічних прийомів їх завантаження слід враховувати необхідність забезпечення мінімально допустимої товщини коксового шару і технологічно достатньої газо - і рідинопроникності коксової насадки, а також дренажну здатність розплаву. Тому, раціональний, гнучкий режим завантаження твердих заміників коксу при виплавці чавуну з низьким вмістом кремнію, повинен являти собою сукупність технологічних прийомів, що включають їх завантаження, як у вигляді окремих порцій, так і в суміші з іншими компонентами. При цьому, слід враховувати, що змішування різних видів коксу з суттєво відмінними характеристиками гранулометричного складу, гарячої і холодної міцності перед завантаженням або в процесі завантаження в доменну піч призводить до утворення «кокових вікон» зі зниженою газопроникною здатністю і може обумовити загальне погіршення газопроникності шихти, особливо, у в'язко-пластичній зоні.

Удосконалення технологічних вимог до розподілу шихтових матеріалів та газового потоку при роботі доменних печей з низьким вмістом кремнію у чавуні

З урахуванням викладених вище особливостей доменної плавки з низьким вмістом кремнію у чавуні та обумовлених обмежень, удосконалені технологічні вимоги до розподілу шихтових матеріалів та газового потоку можуть бути сформульовані у наступному вигляді.

Радіальний розподіл рудних навантажень:

- рудне навантаження має бути відносно рівномірно розподілене у периферійній (10-й – 8-й), проміжній (7-й – 4-й) та крайній приосьовій (3-й) зонах;
- відносне рудне навантаження на більшій частині площі колошника, обмеженої 10-й – 3-й зонами, доцільно підтримувати у діапазоні $\approx 1,0-1,20$;
- значення максимуму відносного рудного навантаження не повинно перевищувати 1,30 і перебувати в проміжній кільцевій зоні (орієнтовно – в районі 8-й – 6-й зон) на відстані $\approx 0,20-0,30$ радіуса колошника від стінки шахти;
- у напрямку периферії від максимуму відносне рудне навантаження повинне плавно знижуватися з кроком 0,01-0,10 до рівня $\approx 1,10-1,20$ у 10-й зоні та у напрямку осі з кроком 0,01-0,13 до рівня $\approx 0,90-1,10$ у 3-й зоні. У промисловій практиці при технологічній необхідності запобігання розвитку надмірно активного периферійного газового потоку допускається робота з практично рівномірним розподілом рудного навантаження з 3-ї по 10-у зони;
- від 3-ї зони в напрямку осі печі відносне рудне навантаження повинне практично лінійно знижуватися з кроком $\approx 0,3-0,5$ до рівня

0,05-0,30 у 1-й (осьовій зоні).

При виплавці чавуну зі зниженим вмістом кремнію в чавуні доцільно у периферійній зоні підтримувати рудне навантаження на 10-20% вище, а в осьовій зоні – на 10-20% нижче, ніж при виплавці чавуну з традиційним вмістом кремнію ($> 0,5\%$).

Розподіл рудних навантажень, що формується застосовуваним режимом завантаження, при роботі доменної печі зі зниженим вмістом кремнію в чавуні необхідно вибирати з урахуванням вимоги забезпечення мінімально допустимої товщини коксового шару (0,5 м). З урахуванням цих обмежень доцільнішим є регулювання теплового стану зміною маси залізорудної частини подачі (порції) зі збереженням сталості маси коксової частини подачі (порції) на рівні, що забезпечує потрібну в технологічних умовах, що склалися, товщину «кокових вікон».

Радіальний розподіл компонентів шихти

Розподіл окатишів:

- у пристінковій зоні доменної печі вміст окатишів повинен обмежуватися рівнем, що забезпечує вміст FeO у первинному шлаку не вище рівня 12-15%, при якому агресивність розплаву не становить небезпеки по відношенню до футерівки печі;

- основна маса окатишів повинна змішуватися з агломератом і зосереджуватися у проміжній зоні колошника з максимумом в зоні, що знаходиться на відстані 0,70-0,80 радіуса колошника, і зменшенням їх вмісту у напрямку приосьових та осьових зон;

- за наявності в шихті неофлюсованих окатишів параметри режиму завантаження повинні унеможливити попадання технологічно значущої кількості цього компонента в периферійну зону;

- в осьовій зоні для запобігання погіршенню її газопроникності вміст окатишів має бути мінімальним;

- збільшення концентрації окатишів в осьовій зоні допускається при спрямованому їх завантаженні в цю зону з використанням спеціальних режимів для збільшення кількості рідких фаз з підвищеним вмістом закису заліза, що очищають центральний стовп малорухомих матеріалів від «кокового сміття».

Заданий розподіл окатишів по радіусу колошника досягається шляхом вибору раціональних параметрів формування залізорудних змішаних порцій (залізорудної частини подачі), в першу чергу, послідовності вивантаження доз компонентів залізорудної частини шихти на конвеєри та/або завантаження їх в скіпи.

Розподіл добавок, що використовуються для економії палива та

ВІДНОВНИКІВ:

- технологічно обґрунтовано завантаження фракцій коксу, які відсіваються (у меншій мірі - антрациту), у складі залізорудної частини подачі (залізорудних змішаних порцій), що забезпечує збільшення газопрозорності рудного шару та інтенсифікацію процесів відновлення залізородних матеріалів.;

- найбільш ефективний вплив відсіяних фракцій коксу на показники відновлюваності залізорудного шару проявляється при введенні зазначеного компонента у кількості 1,0-7,0% (від загальної маси суміші) у суміш з низькоосновними залізородними матеріалами;

- залежно від гранулометричного складу та високотемпературних характеристик відсіяних фракцій коксу встановлена дослідним шляхом максимальна раціональна кількість «коксу – горіха» та «коксу – горішка» у шихті становить 100 кг/т чавуну та 50 кг/т чавуну, відповідно. В окремих випадках при високій якості «коксу – горіха» допускається робота доменних печей об'ємом до 1500 м³ з використанням його, як основного компонента паливної частини шихти;

- суміш залізородних матеріалів та відсіяних фракцій коксу (або антрациту), що утворюється на колошнику після вивантаження порції цих компонентів, повинна розташовуватися переважно у проміжній зоні з максимумом вмісту відсіяних фракцій коксу (або антрациту) у проекції області фурменого вогнища;

- на доменних печах, оснащених безконусними завантажувальними пристроями (БЗП), параметри формування залізородних змішаних порцій (залізородної частини подачі), що включають дозу фракцій коксу, що відсіваються (або антрациту), повинні забезпечувати розміщення цієї дози в бункері БЗП після завантаження 65,0-90,0% об'єму порції. На доменних печах зі скіповим завантаженням дози цих компонентів доцільно завантажувати в останній скіп залізородної частини подачі (порції). Рекомендоване розташування доз фракцій коксу, що відсіваються (або антрациту), в об'ємі залізородної частини подачі (порції) передбачає вивантаження і розподіл їх у проміжній зоні колошника;

Додаткові технологічні вимоги до завантаження антрациту:

- маса антрациту, що завантажується у циклі подачі, повинна бути, по можливості, максимально розосереджена по всіх подачах циклу, тобто, завантаження його малими дозами у кожній подачі є більш доцільним по відношенню до завантаження укрупненими дозами з інтервалом у кілька подач. Це пояснюється необхідністю запобігання скупченню дрібних фракцій, що утворюються при руйнуванні антрациту, і утворенню у стовпі шихти локальних зон

значних розмірів зі зниженою газопроникністю;

- завантаження антрациту повинно здійснюватися у складі залізорудної частини подачі (порції), що запобігає забиванню «міжкускових» каналів і зниженню газопроникності коксових шарів та сприяє підвищенню відновлюваності залізорудних матеріалів, яке відбувається при змішуванні їх з компонентами, що містять вуглець. Доцільно, щоб основна маса антрациту знаходилася в шарі з переважуючим вмістом окатишів;

- програма розподілу та параметри формування порцій повинні забезпечувати концентрацію основної маси антрациту у проміжній зоні колошника, переважно в області проекції фурменого вогнища;

- кількість антрациту, яка може завантажуватися у складі шихти без істотного погіршення газпроникності стовпа шихти, дифузійної здатності коксової насадки та загалом показників плавки, при виробництві чавуну з низьким вмістом кремнію доцільно обмежити рівнем 30-35 кг/т чавуну.

У реальній практиці кількість антрациту, що завантажується, залежить, в першу чергу, від якості застосовуваних основних компонентів шихти – агломерату, окатишів і коксу: чим вища їх якість, зокрема, високотемпературні характеристики основних шихтових матеріалів, тим більше антрациту може бути завантажено у складі шихти без помітного погіршення показників газодинамічного режиму плавлення.

Розподіл залізовмісних добавок:

- залізовмісні добавки (великокускові залізні та марганцеві руди, калібровані, збагачені конверторний, мартенівський і зварювальний шлаки, збагачений сталеплавильний скрап), що завантажуються з метою заміни та економії окускованої залізорудної сировини, повинні розміщуватися на поверхні засипу таким чином, щоб основна маса їх була зосереджена у проміжній зоні доменної печі:

- залізорудні добавки з вищою температурою початку фільтрації бажано завантажувати в область проміжної зони, що відповідає положенню проекції зони горіння, добавки з меншою температурою початку фільтрації – ближче до осі в межах проміжної зони;

- чим більше лужне навантаження, тим бажаніше розташування компонента з підвищеним вмістом SiO_2 ближче до осі печі в межах проміжної зони;

- чим вище вміст заліза у добавці, тим більше розподіл її в проміжній зоні має бути зміщений до периферії;

- залізовмісний матеріал з високою температурою втрати газопроникності доцільно розташовувати в області, близької до закінчення зони горіння (1,0-2,0 м від стінки шахти);

- чим вище температура краплинної течії добавки, тим ближче до периферії має бути зона переважного розташування цього компонента;
- параметри режиму завантаження повинні мінімізувати попадання у пристінкову зону добавок, в первинних шлакових розплавах яких, міститься значна кількість $\text{FeO}_{\text{плв}}$, і забезпечувати максимальну концентрацію таких компонентів у проміжній зоні;
- залізвмісні добавки спеціального призначення (гарнісажоутворювальні, промивні, що регулюють газопроникність заданої зони) завантажуються в зони, що відповідають їх технологічному призначенню.

Завантаження фракцій залізорудних матеріалів, що відсіваються:

- завантаження відсіву залізорудних матеріалів крупністю від 0 до 6 мм (рідко – до 10 мм) або каліброваного відсіву, що отримується після додаткового розсівання первинного відсіву та вилучення з нього фракцій « - 3 мм», « - 4 мм» або « - 5 мм», здійснюється у периферійну (частіше пристінкову) зону доменної печі з метою регулювання її газопроникності та, як наслідок, інтенсивності периферійного газового потоку;
- для забезпечення попадання відсіву залізорудних матеріалів до пристінкової зони доменної печі доза цього компонента повинна розташовуватися в нижньому шарі шихтових матеріалів у бункері БЗП або міжконусного простору;
- фракції залізорудних матеріалів, які відсіваються, завантажуються в кількості 2-15% від маси залізорудної частини подачі (порції);
- періодичність завантаження відсіву залізорудних матеріалів встановлюють обернено пропорційно до його кількості в інтервалі зміни від кожної до кожної п'ятої подачі.

Завантаження промивальних подач (порцій):

- для підтримки необхідної газопроникності стовпа шихти та збереження дифузійної здатності коксової насадки при виплавці чавуну з низьким вмістом кремнію доцільне профілактичне періодичне завантаження промивних подач зменшеної маси. Маса подач промивної суміші зменшується для запобігання контакту значної кількості високоагресивного промивного розплаву з футерівкою (гарнісажним шаром) печі;
- зменшена маса промивної подачі становить 30-40% робочої маси;
- періодичність завантаження промивних подач зменшеної маси визначається обмеженням - не більше двох таких подач у стовпі шихти;
- параметри режиму завантаження промивних подач зменшеної

маси повинні, по можливості, забезпечувати концентрацію промивної суміші в основному у приосьовій і осьовій зонах;

- при явних ознаках погіршення газопроникності стовпа, «засмічення» коксової насадки, зони малорухомих матеріалів та/або горна доменної печі завантажуються промивні подачі масою, що дорівнює масі робочої подачі. Періодичність завантаження промивних подач визначається ступенем погіршення ходу плавки. При необхідності допускається завантаження доменної печі виключно промивними подачами із загальним зниженням основності шихти (цільове промивання);

- склад промивної подачі, як правило, включає шихтові матеріали, що використовуються у поточному виробництві чавуну. При необхідності до складу промивних подач вводяться спеціальні компоненти, що підвищують м'яку здатність розплаву.

Для ефективної роботи доменної печі, поряд з реалізацією заданого радіального розподілу шихтових матеріалів, необхідно також забезпечити рівномірний розподіл рудних навантажень, об'ємів і мас компонентів шихти по колу печі або цілеспрямоване створення нерівномірності у певних секторах колошника. Стабілізація окружного розподілу шихти та газів у печі здійснюється шляхом зміни напрямку та порядку обертання розподільника на доменних печах з конусним завантажувальним пристроєм. На доменних печах з БЗП для цього застосовується послідовне зміщення точок початку вивантаження порцій по колу печі та почергова зміна виду матеріалів у бункерах БЗП [47].

Формування спрямованої окружної нерівномірності розподілу залізорудної та паливної частини шихти або окремих компонентів допускається для реалізації спеціальних задач, наприклад, послаблення або інтенсифікації газового потоку у заданому секторі колошника, змивання «настилі» або інших тугоплавких утворень на обмеженій ділянці шахти.

Оцінка можливості реалізації технологічних вимог до розподілу шихтових матеріалів та газового потоку на сучасних доменних печах

Сучасні доменні печі при будівництві або реконструкції оснащуються системами завантаження, що мають широкі можливості реалізації розподілу шихтових матеріалів. Як правило, такі системи включають розвинену систему шихтоподачі з досить великою кількістю каналів накопичення та дозування різних компонентів шихти, конвеєрний або скіповий підйомник для доставки шихти на колошник, безконусний завантажувальний пристрій та систему

автоматизованого управління завантаженням доменної печі у складі експертної системи управління процесом доменної плавки. Обладнання та системи управління таких доменних печей дозволяють практично в повному обсязі реалізувати технологічні вимоги до розподілу шихтових матеріалів, забезпечити розподіл газового потоку в об'ємі печі відповідно до технологічних умов, що склалися, а також реалізувати раціональне розташування та конфігурацію зони в'язко – пластичного стану, заданий розподіл властивостей шлакових розплавів, підтримувати необхідну дифузійну спроможність коксової насадки, зони малорухомих матеріалів та стійкий працездатний стан горна доменної печі.

Режим завантаження сучасних доменних печей, обладнаних БЗП, включає наступні основні параметри:

- склад та послідовність подач у циклі завантаження;
- склад порцій шихтових матеріалів та маси окремих компонентів у них;
- послідовність вивантаження доз компонентів на конвеєри або завантаження їх у скіпи для формування порцій;
- рівень засипу;
- програму розподілу мас порцій шихтових матеріалів за кутовими позиціями лотка БЗП при вивантаженні порцій на колошнику;
- послідовність зміщення точок початку вивантаження порцій по колу печі;
- періодичність зміни виду матеріалу в бункерах БЗП (для двобункерних БЗП).

Зміна та реалізація цих параметрів припускають можливість регулювання характеристик розподілу, як загалом залізвмісної та паливної частини шихти, так і окремих компонентів та їх сумішей, у широких межах, забезпечуючи тим самим, гнучку адаптацію режиму завантаження до поточних умов плавки.

Розподіл рудних навантажень формується, головним чином, програмою розподілу мас порцій шихтових матеріалів за кутовими позиціями лотка БЗП при вивантаженні порцій на колошнику. Реалізація заданого розподілу окремих компонентів та їх сумішей досягається шляхом зміни розміщення доз компонентів у об'ємі порції (подачі). У цьому відношенні найбільш широкі можливості мають сучасні доменні печі з БЗП і конвеєрною доставкою шихти на колошник.

Приклад реалізації технологічних вимог до розподілу агломерату та окатишів на колошнику сучасної доменної печі наведено на рис. 2.

Як бачимо з прикладу на рис. 2, відповідно до технологічних вимог

вміст окатишів у пристінковій кільцевій зоні колошника істотно нижче, ніж у проміжній, максимум вмісту окатишів знаходиться на відстані 0,2-0,3 радіусу колошника від стінки доменної печі. У периферійній зоні превалює агломерат - матеріал з більш високими, по відношенню до окатишів, температурами розм'якшення і плавлення, що обумовлює зниження положення кореня в'язко - пластичної зони, в осьовій зоні вміст окатишів знижено.

Технологічні вимоги до розподілу залізородних компонентів у системах завантаження зі скіповою доставкою шихти на колошник та оснащених БЗП реалізуються на технологічно прийнятному рівні. Проте ефект регулюючих впливів, спрямованих на регулювання розподілу окремих шихтових матеріалів, у ряді випадків, може бути виражений слабше. Це стосується окатишів при високому вмісті їх у складі шихти та завантаженні частини їх у складі першого скіпа, а також добавок. Вказана особливість розподілу компонентів у системах зі скіповою доставкою шихти на колошник пояснюється додатковим перемішуванням шихтових матеріалів при повороті скіпа у розвантажувальних кривих та вивантаженні в бункер БЗП, що вносить свої зміни в послідовність надходження компонентів шихти в бункер та розподілу їх мас в об'ємі порції (подачі). Приклад розподілу агломерату та окатишів відповідно до технологічних вимог на доменній печі зі скіповою доставкою шихти на колошник і БЗП показаний на рис. 3.

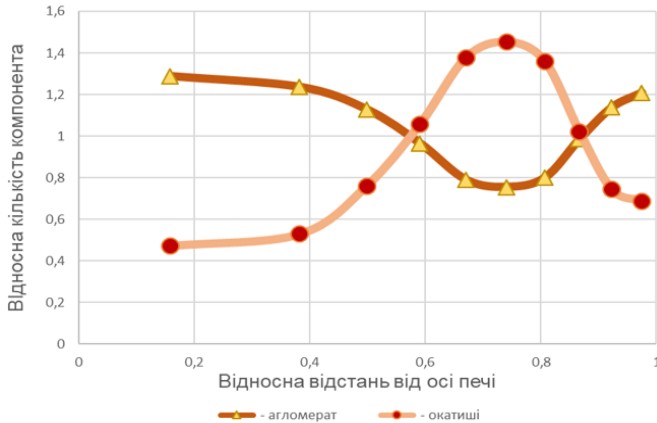


Рисунок 2 – Розподіл відносної кількості (відносно середнього вмісту компонента у порції) основних залізородних компонентів шихти по радіусу колошника доменної печі з конвеєрною доставкою шихти на колошник та БЗП.

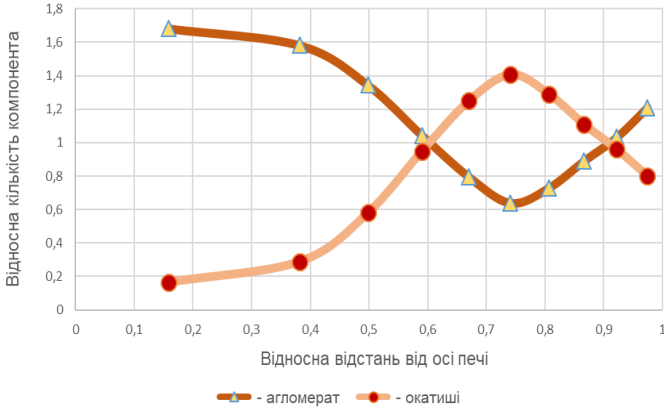


Рисунок 3 – Розподіл відносної кількості (відносно середнього вмісту компонента у порції) основних залізрудних компонентів шихти по радіусу колошника доменної печі зі скіповою доставкою шихти на колошник та з БЗП.

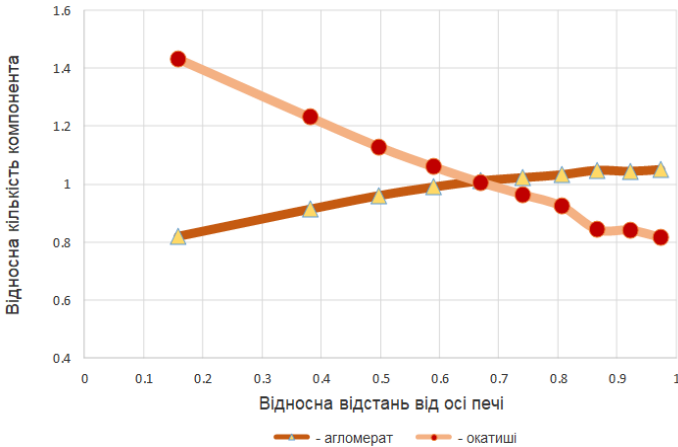


Рисунок 4 – Розподіл відносної кількості (відносно середнього вмісту компонента у порції) основних залізрудних компонентів шихти по радіусу колошника доменної печі зі скіповою доставкою шихти на колошник та з конусним завантажувальним пристроєм.

Доменні печі зі скіповою доставкою шихти на колошник та конусним завантажувальним пристроєм мають обмежені можливості реалізації заданого розподілу рудних навантажень. Конструктивні

особливості обладнання, їх параметри та відповідні алгоритми можуть забезпечити, в основному, якісно виражений переважний розподіл залізовмісної або паливної частини шихти в тому, чи іншому напрямку по радіусу колошника.

Можливі коригування розподілу окремих компонентів ще більш обмежені: зміною послідовності набору компонентів у скіпи можна домогтися зміщення деякого переважного вмісту компонента в тій чи іншій половині радіуса колошника. Як приклад, на рис. 4 показано розподіл агломерату та окатишів на доменній печі об'ємом 1000 м³ зі скіповою доставкою шихти на колошник і конусним завантажувальним пристроєм.

Висновки

Оцінка можливості реалізації технологічних вимог до розподілу шихтових матеріалів та газового потоку на доменних печах з різною структурою та складом обладнання систем завантаження показує, що технологія виплавки чавуну з низьким вмістом кремнію може бути ефективно реалізована на доменних печах з БЗП та системами управління завантаженням, що включають алгоритми гнучкого управління характеристиками розподілу компонентів шихти.

Перелік посилань

1. Большаков В. И. Теория и практика загрузки доменных печей. М. : Металлургия, 1990. 256 с.
2. Доменное производство «Криворожстали» / В. И. Большаков, А. В. Бородулин, В. С. Листопадов [и др.] Монография под ред. В. И. Большакова. КГГМК-ИЧМ, Днепропетровск, 2004. 378 с.
3. Большаков В. И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. К. : Наук. думка, 2007. 412 с.
4. Условия доменной плавки с низким содержанием кремния в чугуна / С. В. Филатов, И. Ф. Курунов, Л. А. Смирнов и др. Сталь. 2013. №8. С. 7-10.
5. Типовая инструкция по доменному производству. М. : Металлургия. 1990. 84 с.
6. Технология получения низкокремнистого и низкосернистого чугуна в доменных печах за рубежом / Р. М. Жак, Н. И. Савелов // Черметинформация : М., 1991. Сер. Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна. Вып. 3. 29 с.
7. Gupta P. K., Rao A. S., Sekhar V. R., Ranjan M., Naha T. K. Burden Distribution Control and its Optimization under High Pellet Operation. Ironmaking & Steelmaking. 2010. Vol. 37. P. 235 - 239.
8. Nag S., Gupta A., Paul S., Gavel D. J., B. Aich. Prediction of Heap Shape in Blast Furnace Burden Distribution. ISIJ International. 2014. Vol. 54. P. 1517-1520.
9. Mitra T. Modeling of Burden Distribution in the Blast Furnace. Doctor of Technology The-sis. Thermal and Flow Engineering Laboratory Faculty of Science and Engineering Åbo Akad-emi University. Turku/Abo, Finland, 2016. 89 p.

10. Li Z., Kuang S., Liu S., Gan J., Yu A., Li Y., Mao X. Numerical Investigation of Burden Dis-tribution in Ironmaking Blast Furnace. Powder Technol. 2019. Vol. 353. P. 385–397. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.05.047>.

11. О причинах ускоренного износа кладки и холодильников доменных печей ММК / Н. Л. Жило, Р. Ф. Першина, А. А. Белова // Сталь. 1977. №4. С. 300–304.

12. Об улучшении газодинамических характеристик шихтовых материалов в процессе загрузки доменных печей/ Е. Г. Донсков, А. Д. Учитель, И. Г. Ризницкий, Ф. М. Журавлев, В. И. Бондаренко // Сталь. 1980. № 7. С. 552-559.

13. Об улучшении распределения на колошнике шихты содержащей окатыши / И. И. Коробов, А. И. Галаганов, В. Н. Ковшов // Metallургическая и горнорудная промышленность. 1977. № 3. С. 1–4.

14. Об эффективности использования окатышей в доменном производстве в странах – членах СЭВ / Н. А. Гладков, А. Г. Савелов, А. Г. Ульянов // Сталь. 1982. № 12. С. 39–41.

15. Самойлович С. Д., Куличенко Е. М. Система подачи шихты для современных доменных печей. Сталь. 1981. № 8. С. 23–26.

16. Опыт эксплуатации доменной печи №6 объемом 3200 м³ на НЛМЗ / Н. С. Антипов, В. В. Капорулин, Э. А. Шепетовский, Е. М. Визлов // Сталь. 1983. № 5. С. 31–33.

17. Технологические особенности работы мощных доменных печей / Ю. С. Юсфин, Р. М. Жак, Е. Н. Сафонова, П. И. Черноусов. – М. : ВИНТИ. Сер. Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производству чугуна. Обзорная информация. 1986. Вып. 3, 31 с.

18. А.с. 1061469 СССР. Способ загрузки шихтовых материалов бесконусным загрузочным устройством в доменную печь / В. И. Большаков, Ф. М. Шутылев, Н. М. Можаренко и др. Заявл. 04.12.80; зарег. 15.08.83.

19. Эффективность распределения окатышей в шихте доменных печей / В. И. Большаков, Н. А. Гладков, Ф. М. Шутылев и др. // Metallургическая и горнорудная промышленность. 2002. № 6. С. 11–15.

20. Влияние режимов загрузки смешанных порций шихтовых материалов на выход из строя воздушных фурм доменной печи / В. И. Большаков, С. Т. Шулико, Н. Г. Иванча, В. В. Лебедь, В. И. Вишняков, В. С. Листопадов // Metallургическая и горнорудная промышленность. 2007. № 4. С. 6–13.

21. Большаков В. И., Иванча Н. Г. Формирование смешанных порций шихтовых материалов на доменном конвейере. Metallургическая и горнорудная промышленность. 2002. №6. С. 79–83.

22. Формирование жидких фаз и их физико–химическая интерпретация / Н. А. Гладков, Д. Н. Тогобицкая, А. С. Нестеров // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Вып. 2. 1998. С. 83–87.

23. Влияние состава и свойств материалов гарнисажа на его образование и стойкость / В. Ф. Мороз, Д. Н. Тогобицкая, Н. М. Можаренко, А. С. Нестеров, А. И. Белькова, Д. А. Степаненко // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Днепропетровск : ИЧМ НАНУ, 2010. Вып. 22. С. 85-95.

24. Доброскок В. А. Специальные системы загрузки доменных печей. Черные металлы. 2007. № 9. С. 13–21.

25. Разработка режима загрузки и опыт применения мелкофракционного кокса в мощной доменной печи / В. А. Доброскок, Ю. В. Липухин, И. Ф. Курунов [и др.] // Сталь. 1998. №8. С. 7–13.

26. Пат. № 2042714 Российская Федерация, С 1, С21В 5/00. Способ доменной плавки / Доброскок В. А., Курунов И. Ф., Липухин Ю. В., Агарышев А. И., Логинов В. Н., Карабасов Ю. С.; заявитель и патентообладатель АОЗТ «Эконтех». Заявл. 26.07.1993; опубл. 27.08.1995, Бюл. №24.

27. Оценка влияния на доменную плавку кокса фракции менее 40 мм / Н. П. Сысоев, С. К. Сибигагуллин, В. К. Кропотов и др. // Труды междунар. конгр. доменщиков, 7-12 июня 1999 г., Днепропетровск–Кривой Рог. С. 216–218.

28. Эффективность использования кокса фракции менее 40 мм в доменной плавке / С. Л. Ярошевский, В. А. Ноздрачев, А. П. Чеботарев, В. А. Руденко, С. А. Фещенко, А. М. Кузнецов, В. П. Падалка, Н. С. Хлапонин, А. В. Кузин // Metallurg. 2000. № 12. С. 32–35.

29. Эффективность технологии доменной плавки при загрузке в печь коксового орешка в смеси с железорудной шихтой / Л. Ф. Литвинов, С. Л. Ярошевский, А. М. Кузнецов, В. П. Падалка, Н. С. Хлапонин, А. В. Кузин // Metall и литье Украины. 2004. № 12. С. 5–9.

30. Аналитическое исследование влияния кокса мелких фракций на газопроницаемость сухой зоны доменной печи / А. В. Кузин, С. Л. Ярошевский, Н. С. Хлапонин // Сб. трудов междунар. научно–техн. Конференции «Теория и практика производства чугуна». Кривой Рог. 24–27 мая 2004. С. 369–374.

31. А.с. 1585337 СССР, С21 В 7/20. Способ ведения доменной плавки / Гладков Н. А., Пухов А. П., Нестеров А. С. и др. (СССР). Заявл. 15.04.88, опубл. 15.08.90. Бюл. № 30.

32. Технология и эффективность использования кокса мелких фракций в доменной плавке / А. Н. Рыженков, В. Е. Попов, А. И. Ковалев, [и др.] // Сб. трудов междунар. научно–техн. конференции «Теория и практика производства чугуна». Кривой Рог. 24–27 мая 2004. С. 374–377.

33. Антрацит и термоантрацит в шихте доменной плавки / В. П. Лялюк, И. Г. Товаровский, Д. А. Демчук [и др.]. Днепропетровск : Пороги, 2008. 245 с.

34. Лялюк В. П. Современные проблемы технологии доменной плавки / Днепропетровск : Пороги, 1999. 164 с.

35. Коксозамещающие технологии в доменной плавке / В. П. Лялюк, И. Г. Товаровский, Д. А. Демчук, В. А. Шеремет, А. В. Кекух, А. В. Сокуренок, Г. И. Орел, Г. П. Костенко, В. С. Листопадов. Днепропетровск : Пороги, 2006. 276 с.

36. Лялюк В. П., Товаровський Й. Г., Кассім Д. О., Ляхова І. А. Теоретичні та практичні основи використання кускового антрациту в доменній плавці. Кривий Ріг : Дионат, 2016. 312 с.

37. Утилизация пылей и шламов в черной металлургии / А. И. Толочко, В. И. Славин, Ю. М. Супрун, Р. М. Хайрутдинов. М. : Металлургия, Челябинское отд., 1990. – 152 с.

38. Большаков В. И. Оценка влияния обогащенного шлака различного состава на результаты его использования в доменных печах / В. И. Большаков, Н. А. Гладков, А. С. Нестеров // «Фундаментальные и прикладные проблемы

черной металлургии». Вып. 16. 2008. С. 328–336.

39. Массовое использование мелкокускового агломерата при работе доменной печи с высокой производительностью / Т. Ватанабэ, А. Маки, А. Сакаи [и др.] // Дзайре то пуросесу. 1995. Т.8. №4, С. 1063. Новости черной металлургии за рубежом. 1996. №3. С. 41–42.

40. Современные технологии загрузки доменных печей / Й. Бухвальдер, В. А. Доброскок, Э. Лонарди, [и др.] // Черные металлы. 2008. №9. С. 21 – 25.

41. Доброскок В. А. Специальные системы загрузки доменных печей. Черные металлы. 2007. №9. С. 13 – 21.

42. Декларационный патент Украины на полезную модель. №14621, С 21 В 5/00. Способ промывки горна доменной печи / Шеремет В. А., Костенко Г. П., Огорвин П. И. и др. Заявл. 09.12.05; опубл. 15.05.2006 г., Бюл. №5.

43. Декларационный патент 14621 Украины на полезную модель. Спосіб промивання горна доменної печі/ Шеремет В. О., Костенко Г. П., Огорвін П. І., Голобокий О. І., Кекух А. В., Орел Г. І., Нинь С. В., Большаков В. І., Нестеров О. С., Можаренко М. М., Якушев В. С. // Заявл. 09.12.2005 р.; опубл. 15.05.2006 р. Бюл. №5.

44. Теоретические предпосылки и практические решения по организации промывок доменных печей / Можаренко Н. М., Гладков Н. А., Нестеров А. С., Абросимов Н. И. // Металл и литье Украины. 1994. № 4-5. С. 2-5.

45. Разработка мероприятий по продлению кампании доменных печей путем усовершенствования технологии загрузки шлакового режима и автоматизированного контроля параметров доменной плавки в условиях нестабильности качества шихтовых материалов / Большаков В. И., Иванча Н. Г., Нестеров А. С., Муравьева И. Г., Тогобицкая Д. Н., Семенов Ю. С. // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Збірник наукових статей. Київ: Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2015. 816 с. URL: www.patonpublishinghouse.com/rus/compilations#winresurs2015

46. Большаков В. И. Совершенствование способов загрузки доменных печей в СССР и за рубежом / В. И. Большаков, В. Л. Покрышкин, Ф. М. Шутылев // Обзорная информация института «Черметинформация», сер. «Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производству чугуна». 1983, Вып. 2. 32 с.

47. Большаков В. И. Теория и практика загрузки доменных печей. М.: Металлургия, 1990. 256 с.

48. Тайхерт Э., Гупта В. Н. Влияние различной крупности кокса на режим работы доменной печи с горном диаметром 7,8 м. Черные металлы, 1976, № 14-15. С. 19–23.

49. Камитани Т., Канэко К., Есида К. Работа доменной печи с низким содержанием кремния. Тэцу то хагане. 1985. Т. 71. С. 80.

50. К вопросу о качестве железорудных материалов / Н. М. Можаренко, Н. А. Гладков, А. С. Нестеров // Сталь. 1997. №8. С. 3–5.

51. Повышение энергоэффективности доменной плавки за счет выбора рациональных параметров режима загрузки многокомпонентной шихты / Иванча Н. Г., Муравьева И. Г., Вишняков В. И., Щербачев В. Р., Ермолина К.

П. // Проблемы региональной энергетики, Молдавия. 2022. №2. С. 53 – 62.

52. Predictive-analytical evaluation of high temperature properties of iron-ore materials with respect to their distribution in the blast furnace zones / I.G. Murav'eva, D. N. Togobitskaya, A.I. Bel'kova, N.G. Ivancha, A. S. Nesterov // *Steel in Translation*. - 2021. - Vol. 51. - №3. - pp. 195 - 200.

53. Метод визначення положення і форми пластичної зони в доменній печі з використанням показників розподілу температури газового потоку / Муравйова І. Г., Іванча М. Г., Щербачов В. Р., Вишняков В. І., Єрмоліна К. П., Білошапка О. О., Ходогова Н. Є. // *Фундаментальні і прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Випуск 36. С. 95–108. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-95-108.>]

54. Improvement of the Burden Column Structure by Controlling the Multicomponent Burden Loading Mode into the Blast Furnace/ Myrav'yova I. G., Ivancha N. G., Shcherbachov V. R., Vishnyakov V. I., Ermolina E. P.// *Problemele Energeticii Regionale (Moldova)*. 2023. Vol. 2, No. 58. P. 138–149. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.2-58-12.>

55. Формирование рационального столба шихтовых материалов в доменной печи / [В. И. Большаков, Н. А. Гладков, С. Т. Шулико, Ф. М. Шутьлев, В. С. Листопадов] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2004. № 5. С. 7–12.

56. Сравнение качества коксового орешка различного вида/ С. К. Сибатуллин, А. С. Харченко и др. // *Кокс и химия*. 2012. № 2. С. 29–32.

References

1. Bolshakov, V. Y. (1990). *Teoriya y praktyka zahruzky domennykh pechei*. Metallurhiya

2. Bolshakov, V. Y. (Ed.). (2004). *Domennoe proyzvodstvo "Kryvorozhstaly"*. КННМК – YChM

3. Bolshakov, V. Y. (2007). *Tekhnolohiya vysokoeffektyvnoi enerhosberehaishehei domennoi plavky*. Nauk. dumka

4. Fylatov, S. V., Kurunov, Y. F., Smyrnov, L. A. et al. (2013). Usloviya domennoi plavky s nyzkym sodержanyem kremnyia v chuhune. *Stal*, (8), 7-10

5. *Typovaia ynstruktsiia po domennomu proyzvodstvu*. (1990). Metallurhiya

6. Zhak, R. M., & Savelov, N. Y. (1991). Tekhnolohiya polucheniya nyzkokremnystoho y nyzkoserystoho chuhuna v domennykh pechakh za rubezhom. *Chermetynformatsiia. Ser. Podhotovka syrevykh materyalov k metallurhicheskomuperedelu y proyzvodstvo chuhuna*, 3

7. Gupta, P. K., Rao, A. S., Sekhar, V. R., Ranjan, M., & Naha, T. K. (2010). Burden Distribution Control and its Optimization under High Pellet Operation. *Ironmaking & Steelmaking*, 37, 235-239

8. Nag, S., Gupta, A., Paul, S., Gavel, D. J., & Aich, B. (2014). Prediction of Heap Shape in Blast Furnace Burden Distribution. *ISIJ International*, 54, 1517-1520

9. Mitra, T. (2016). *Modeling of Burden Distribution in the Blast Furnace*. Doctor of Technology. Thesis. Thermal and Flow Engineering Laboratory Faculty of Science and Engineering. Abo Akad-emi University. Turku/Abo, Finland

10. Li, Z., Kuang, S., Liu, S., Gan, J., Yu, A., Li, Y., & Mao, X. (2019). Numerical Investigation of Burden Distribution in Ironmaking Blast Furnace.

"Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії". 2023. Випуск 37
"Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy". 2023. Collection 37

Powder Technol., 353, 385-397. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.05.047>.

11. Zhylo, N. L., Pershyna, R. F., & Belova A. A. (1977). O prychnakh uskorennoho yznosa kladky y kholodylnykov domennykh pechei MMK. *Stal*, (4), 300-304

12. Donskov, E. H., Uchytel, A. D., Ryznytskyi, Y. H., Zhuravlev, F. M., & Bondarenko, V. Y. (1980). Ob uluchshenyy hazodynamycheskykh kharakterystyk shykhtovykh materyalov v protsesse zahruzky domennykh pechei. *Stal*, (7), 552-559

13. Korobov, Y. Y., Halahanov, A. Y., & Kovshov, V. N. (1977). Ob uluchshenyy raspredeleniya na koloshnyke shykhty sodержashchei okatyshy. *Metallurhycheskaia y hornorudnaia promyshlennost*, (3), 1-4

14. Hladkov, N. A., Savelov, A. H., & Ulianov, A. H. (1982). Ob efektyvnosti yspolzovaniya okatyshy v domennom proyzvodstve v stranakh – chlenakh SEV. *Stal*, (12), 39-41

15. Samoilovych, S. D. & Kulychenko, E. M. (1981). Systema podachy shykhty dlia sovremennykh domennykh pechei. *Stal*, (8), 23-26

16. Antypov, N. S., Kaporulyn, V. V., Shepetovskiy, E. A., & Vyzlov, E. M. (1983). Opyt ekspluatatsyy domennoi pechy №6 ob'omom 3200 m³ na NLMZ. *Stal*, (5), 31-33

17. Yusfyn, Iu. S., Zhak, R. M., Safonova, E. N., & Chernousov, P. Y. (1986). Tekhnolohycheskye osobennosti raboty moshchnykh domennykh pechei. *VYNYTY. Ser. Podhotovka syrevykh materyalov k metallurhycheskomu peredelu y proyzvodstvo chuhuna. Obzornaia ynformatsiya*, 3

18. Bolshakov, V. Y., Shutylev, F. M., Mozharenko, N. M. et al. (1983). A. s. 1061469 SSSR. Sposob zahruzky shykhtovykh materyalov beskonusnym zahruzochnym ustroystvom v domennuiu pech

19. Bolshakov, V. Y., Hladkov, N. A., Shutylev, F. M. et al. (2002). Efektyvnost raspredeleniya okatyshy v shykhte domennykh pechei. *Metallurhycheskaia y hornorudnaia promyshlennost*, (6), 11-15

20. Bolshakov, V. Y., Shulyko, S. T., Yvancha, N. H., Lebed, V. V., Vyshniakov, V. Y., & Lystopadov, V. S. (2007). Vliyanye rezhymov zahruzky smeshannykh portsyi shykhtovykh materyalov na vykhod yz stroia vozdushnykh furn domennoi pechy. *Metallurhycheskaia y hornorudnaia promyshlennost*, (4), 6-13

21. Bolshakov, V. Y., & Yvancha, N. H. (2002). Formyrovanye smeshannykh portsyi shykhtovykh materyalov na domennom konveiere. *Metallurhycheskaia y hornorudnaia promyshlennost*. (6), 79-83

22. Hladkov, H. A., Tohobytskaia, D. N., & Nesterov, A. S. (1998). Formyrovanye zhydkykh faz y ykh fizyko-khymycheskaia ynterpretatsiya. *Fundamentalnye y prykladnye problemy chernoi metallurhyi*, 2, 83–87

23. Moroz, V. F., Tohobytskaia, D. N., Mozharenko, N. M., Nesterov, A. S., Belkova, A. Y., & Stepanenko, D. A. (2010). Vliyanye sostava y svoistv materyalov harnysazha na eho obrazovanye y stoikost. *Fundamentalnye y prykladnye problemy chernoi metallurhyi*, 22, 85-95

24. Dobroskok V.A. Spetsyalnye systemy zahruzky domennykh pechei / V.A. Dobroskok // Chernye metally. –2007. –№9. S. 13 – 21.

25. Dobroskok, V. A., Lypukhyn, Yu. V., Kurunov, Y. F. et al. (1998). Razrabotka rezhyma zahruzky y opyt prymeneniya melkofraktsyonnoho koksa v

moshchnoi domennoi pechy. *Stal*, (8), 7–13

26. Dobroskok, V. A., Kurunov, Y. F., Lypukhyn, Yu. V., Aharyshev, A. Y., Lohynov, V. N., & Karabasov, Yu. S. (1995). Pat. № 2042714 Rossiyskaia Federatsiia, S 1, S21V 5/00. Sposob domennoi plavky. *Biul.* 24

27. Sysoev, N. P., Sybahatullyn, S. K., Kropotov, V. K. et al (1999). Otsenka vliyaniia na domennuiu plavku koksa fraktsyy menee 40 mm. *Trudy mezhdunarod. konhr. domenshchykov*, 216–218

28. Yaroshevskiy, S. L., Nozdrachev, V. A., Chebotarev, A. P., Rudenko, V. A., Feshchenko, S. A., Kuznetsov, A. M., Padalka, V. P., Khlaponyn, N. S., Kuzyn, A. V. (2000). Effektyvnost yspolzovaniia koksa fraktsyy menee 40 mm v domennoi plavke. *Metallurh*, (12), 32–35

29. Lytvynov, L. F., Yaroshevskiy, S. L., Kuznetsov, A. M., Padalka, V. P., Khlaponyn, N. S., & Kuzyn, A. V. (2004). Effektyvnost tekhnolohyy domennoi plavky pry zahruzke v pech koksovoho oreshka v smesy s zhelezorudnoi shykhtoi. *Metall y lyte Ukrainy*, (12), 5–9

30. Kuzyn, A. V., Yaroshevskiy, S. L., & Khlaponyn, N. S. (2004). Analytycheskoe yssledovanye vliyaniia koksa melkykh fraktsiy na hazopronytsaemost sukhoi zony domennoi pechy. *Sb. trudov mezhdunar. nauchno–tekhn. Konferentsyy "Teoriya y praktyka proyzvodstva chuhuna"*, 369–374

31. Hladkov, N. A., Pukhov, A. P., Nesterov, A. S. et al. (1990). A. s. 1585337 SSSR, S21 V 7/20. Sposob vedeniia domennoi plavky. *Biul.* 30

32. Ryzhenkov A. N., Popov V. E., Kovalev A. Y. et al. (2004). Tekhnolohiia y efektyvnost yspolzovaniia koksa melkykh fraktsiy v domennoi plavke. *Sb. trudov mezhdunar. nauchno–tekhn. konferentsyy "Teoriya y praktyka proyzvodstva chuhuna"*, 374–377

33. Lialiuk, V. P., Tovarovskiy, Y. H., Demchuk, D. A. et al. (2008). *Anratsyt y termoanratsyt v shykhte domennoi plavky*. Porohy

34. Lialiuk, V. P. (1999). *Sovremennye problemy tekhnolohyy domennoi plavky*. Porohy

35. Lialiuk, V. P., Tovarovskiy, Y. H., Demchuk, D. A., Sheremet, V. A., Kekukh, A. V., Sokurenko, A. V., Orel, H. Y., Kostenko, H. P., & Lystopadov, V. S. (2006). *Koksozameshchaiushchye tekhnolohyy v domennoi plavke*. Porohy

36. Lialiuk, V. P., Tovarovskiy, Y. H., Kassim, D. O., & Liakhova, I. A. (2016). *Teoretychni ta praktychni osnovy vykorystannia kuskovoho anratsyту v domennii plavtsi*. Dyonat

37. Tolochko, A. Y., Slavyn, V. Y., Suprun, Yu. M., Khairutdynov, R. M. (1990). *Utylyzatsiia pyliei y shlamov v chernoi metallurhyy*. Metallurhiya, Cheliabynskoe otd.

38. Bolshakov, V. Y., Hladkov, N. A., & Nesterov, A. S. (2008). Otsenka vliyaniia obohashchennoho shlaka razlychnoho sostava na rezultaty eho yspolzovaniia v domennykh pechakh. *Fundamentalnye y prykladnye problemy chernoi metallurhyy*, 16, 328–336

39. Vatanabe, T., Maky, A., Sakay, A. et al. (1995). Massovoe yspolzovanye melkokuskovoho ahlomerata pry rabote domennoi pechy s vysokoi proyzvodytelnostiu. *Dzairе to purosesu*, 8(4), 1063

40. Bukhvalder, Y., Dobroskok, V. A., Lonardy, E. et al. (2008). *Sovremennye*

tekhnologyy zahruzky domennykh pechei. *Chernye metally*, (9), 21-25

41. Dobroskok, V. A. (2007). Spetsyalnye systemy zahruzky domennykh pechei. *Chernye metally*, (9),13-21

42. Sheremet, V. A., Kostenko, H. P., Otorvyn, P. Y. et al. (2006). Deklaratsyonnii patent Ukrainy na poleznuiu model. №14621, S 21 V 5/00. Sposob promyvky horna domennoi pechy. *Biul.* 5

43. Sheremet, V. O., Kostenko, H. P., Otorvin, P. I., Holobokyi, O. I., Kekukh, A. V., Orel, H. I., Nyn, S. V., Bolshakov. V. I., Nesterov. O. S., Mozharenko. M. M., & Yakushev V. S. (2006). Deklaratsiinyi patent 14621 Ukrainy na korysnu model. Sposib promyvannia horna domennoi pechi. *Biul.* 5

44. Mozharenko, N. M., Hladkov, N. A., Nesterov, A. S., & Abrosymov, N. Y. (1994). Teoretycheskye predposylky y praktycheskye resheniya po orhanyzatsyyi promyvok domennykh pechei. *Metall y lyte Ukrainy*, (4), 2-5

45. Bolshakov, V. Y., Yvancha, N. H., Nesterov, A. S., Muraveva, Y. H., Tohobytskaia, D. N., Semenov, Yu. S. (2015). Razrabotka meropriyatiy po prodleniyu kampany domennykh pechei putem usovershenstvovaniya tekhnologyy zahruzky shlakovoho rezhyma y avtomatyzirovannoho kontroliia parametrov domennoi plavky y usloviakh nestablynosti kachestva shykhtovykh materyalov. *Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsii konstruktssii, sporud ta mashyn: Zbirnyk naukovykh statei*. Instytut elektrozvariuvannia im. Ye. O. Patona NAN Ukrainy <http://www.patonpublishinghouse.com/rus/compilations#winsresurs2015>

46. Bolshakov, V. Y., Pokryshkyn, V. L., & Shutylev, F. M. (1983). Sovershenstvovanye sposobov zahruzky domennykh pechei y SSSR y za rubezhom. *Obzornaia ynfornatsyia ynstytuta "Chermetynformatsyia", ser. "Podhotovka syrevykh materyalov k metallurzhieskomu peredelu y proyzvodstvu chuhuna"*, 2

47. Bolshakov, V. Y. (1990). Teoriya y praktyka zahruzky domennykh pechei. *Metallurhiya*

48. Taikhert, E., & Hupta, V. N. (1976). Vlyianie razlychnoi krupnosti koksa na rezhym raboty domennoi pechy s hornom dyametrom 7,8 m. *Chernye metally*, (14-15), 19-23

49. Kamytany, T., Kaneko, K., & Esyda K. (1985). Rabota domennoi pechy s nyzkym sodержanem kremnyia. *Tetsu to khahane*, 71, 80

50. Mozharenko N. M., Hladkov N. A., & Nesterov A. S. (1997). K voprosu o kachestve zhelezorudnykh materyalov. *Stal*, (8), 3-5.

51. Yvancha, N. H., Muraveva, Y. H., Vyshniakov, V. Y., Shcherbachev, V. R., Ermolyna, K. P. (2022). Povyshenye enerhoeffektivnosti domennoi plavky za schet vybora ratsyonalnykh parametrov rezhyma zahruzky mnohokomponentnoi shykhty. *Problemy rehyonalnoi enerhetyky*, (2),53-62

52. Murav'eva, I. G., Togobitskaya, D. N., Bel'kova, A. I., Ivancha, N. G., & Nesterov, A. S. (2021). Predictive-analytical evaluation of high temperature properties of iron-ore materials with respect to their distribution in the blast furnace zones. *Steel in Translation*, 51(3),195-200

53. Muraviova, I. H., Ivancha, M. H., Shcherbachov, V. R., Vyshniakov, V. I., Yermolina, K. P., Biloshapka, O. O., Khodotova, N. Ye. (2022). Method of determining the position and shape of the cohezive zone in a blast furnace using gas flow temperature distribution indicators. *Fundamental and applied problems of*

ferrous metallurgy, 36, 95-108. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-95-108>

54. Myravyova, I. H., Ivancha, N. G., Shcherbachov, V. R., Vishnyakov, V. I., Ermolina, E. P. (2023). Improvement of the Burden Column Structure by Controlling the Multicomponent Burden Loading Mode into the Blast Furnace. *Problemele Energeticii Regionale*, 2(58), 138-149. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.2-58-12>

55. Bolshakov, V. Y., Hladkov, N. A., Shulyko, S. T., Shutylev, F. M., & Lystopadov, V. S. (2004). Formyrovanye ratsyonalnogo stolba shykhtovykh materialov v domennoi pechy. *Metallurhycheskaia y hornorudnaia promyshlennost*, (5), 7-12

56. Sybahatullyn, S. K., Kharchenko, A. S., et al. (2012). Sravnenye kachestva koksovoho oreshka razlychnoho vyda. *Koks y khymyia*, (2), 29-32

M. H. Ivancha¹, Senior Researcher, ORCID 0000-0002-5366-9328

O. S. Nesterov¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-0183-0327

I. H. Muravyova¹, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-5926-7787

L. I. Garmash¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-9540-3037

V. I. Vishnyakov¹, Researcher, ORCID 0000-0002-5538-6962

V. R. Shcherbachov¹, Junior Researcher, Ph. D. Student, ORCID 0000-0002-6734-0451

K. P. Yermolina¹, Senior Engineer, ORCID 0000-0001-6819-9886

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGICAL REQUIREMENTS FOR DISTRIBUTION OF BURDEN MATERIALS AND GAS FLOW IN THE OPERATION OF BLAST FURNACES WITH LOW SILICON CONTENT IN PIG IRON AND ASSESSMENT OF THEIR IMPLEMENTATION ON MODERN BLAST FURNACES

Abstract. Reducing the silicon content in pig iron is one of the most effective ways to reduce fuel and reductant consumption in the blast furnace process. The challenges of smelting pig iron with low silicon content are associated with high ore burden and low solid fuel consumption, resulting in a reduction in the thickness of "coke windows" with a corresponding deterioration of the gas permeability of the burden column and a decrease in the stability of the melt descent. Additionally, there is a decrease in the thermal level of the cohesive zone, shifting its boundaries upwards in the furnace and increasing its overall size. Moreover, reducing the amount of solid fuel in the burden and increasing the requirements for the quality and stability of the characteristics of iron ore materials can lead to a reduction in the heat reserve in the upper part of the furnace. Research Objective: To improve technological requirements for the distribution of burden materials and gas flow as fundamental principles that determine the parameters of the charging regime of the blast furnace under specific conditions, taking into account the peculiarities and technological constraints of blast smelting with low silicon content in pig iron. The study involves the consolidation of results from analytical and laboratory research,

"Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії". 2023. Випуск 37
"Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy". 2023. Collection 37

as well as the industrial experience of smelting low-silicon pig iron under production conditions. Technological requirements have been developed for the distribution of ore burden, ensuring stable axial movement of the blast furnace under specific melting conditions, the distribution of iron ore components of the burden, based on the tasks of ensuring the stability of the sinter layer and preserving the lining, as well as the distribution of various substitutes for iron ore burden materials and coke, taking into account their properties and technological characteristics. Recommended parameters for the "soft" preventive flushing of blast furnaces are provided to ensure the necessary gas permeability of the burden column, the diffusion capacity of the coke layer, and the support of a stable axial distribution of the gas flow. An assessment of the possibilities of implementing improved technological requirements for the distribution of burden and gas flow under conditions of smelting low-silicon pig iron in modern blast furnaces has been carried out.

Key words: blast furnace, low-silica melting, technological requirements, burden materials, ore burden, coke "windows", gas flow, distribution, axial stroke, components, substitutes, coke nozzle, gas permeability, diffusivity, washing.

For citation: Ivancha, M. H., Nesterov, O. S., Muravyova, I. H., Garmash, L. I., Vishnyakov, V. I., Shcherbachov, V. R., & Yermolina, K. P. (2023). Improvement of technological requirements for distribution of burden materials and gas flow in the operation of blast furnaces with low silicon content in pig iron and assessment of their implementation on modern blast furnaces. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 76-104. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-76-104>

*Стаття надійшла до редакції збірника 26.10.2023 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*