**Реферат**

наукової роботи старшого наукового співробітника Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, кандидата технічних наук Шумельчика Євгена Ігоровича та наукового співробітника Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України Горупахи Віктора Володимировича «Розробка і впровадження нових підходів до діагностики та управління доменною плавкою»

Сучасне доменне виробництво України, в порівнянні з провідними світовими виробниками чавуну: Китаєм, Японією та Індією, знаходиться в складному становищі – в умовах постійного зниження собівартості виплавки чавуну без необхідного обсягу інвестицій, спрямованого на модернізацію та реалізацію довгострокових інноваційних проектів, що дозволили б зайняти більш високі позиції в світовому рейтингу. Зниження собівартості виробництва чавуну здійснюється шляхом використання низькоякісних залізорудної сировини і коксу, а також при практично повній відмові від коштовного природного газу з переходом на технологію вдування пиловугільного палива (ПВП). В окремі періоди роботи доменних печей (ДП), у випадках зниження інтенсивності плавки з тих чи інших, часом кон'юнктурних, причин, переходять на технологію без природного газу із зволоженим дуттям, яка сприяє суттєвій витраті коксу на виплавку чавуну.

Представлена наукова робота присвячена розробці нових ефективних способів управління процесами доменної плавки в сформованих змінних шихтових і паливних умовах, а також в перехідні періоди роботи. Використання цих методів дозволяє отримати прийнятні техніко-економічні показники доменної плавки в сучасних умовах виробництва чавуну. Необхідною умовою розробки нових способів управління є оснащення доменних печей сучасними засобами контролю процесів (стаціонарні термозонди, термопари футерівки шахти, розпару та заплечиків тощо), на підставі інформації яких встановлені нові залежності і зв'язки, що пояснюють протікання в об’ємі доменної печі різних процесів. Тому наукову роботу авторів можна віднести до актуальних.

Авторами роботи виконано наукове обґрунтування та удосконалені методи діагностики і управління доменною плавкою. Комплекс проведених досліджень вирішує важливу науково-технічну проблему – забезпечення енергоефективності доменної плавки при характерній для виробництва чавуну в Україні зміні шихтових і паливних умов, в тому числі при використанні шихтових матеріалів низької якості та використанні в дутті ПВП, а також вирішив задачу підвищення економічності процесу та забезпечення стійкості та подовження ресурсу роботи, як агрегату в цілому, так і окремих елементів завантажувального пристрою.

***Метою*** наукової роботи є удосконалення та реалізація методів діагностики і управління доменною плавкою які забезпечують її енергоефективність при зміні шихтових і паливних умов.

***Науково-технічні результати*** наукової роботи полягають в наступному:

1. Перед пуском сучасної доменної печі після її реконструкції виконано дослідження параметрів потоків шихтових матеріалів, що завантажуються в піч за допомогою безконусного завантажувального пристрою (БЗП), розподілу маси порцій і їх компонентів на колошнику, визначені витратні характеристики шихтового затвору бункера БЗП, а також дослідження формування профілю поверхні засипу шихти, гранулометричного і компонентного складів шару залізовмісних матеріалів по радіусу колошника. Виконаний комплекс досліджень дозволив після задувки печі визначити і реалізувати режими роботи механізмів БЗП, необхідні для ефективного застосування раціональних програм завантаження доменної печі.

2. Розроблено та реалізовано на доменній печі модельну систему для підтримки прийняття рішень по вибору і коригуванню програм завантаження, що дозволяє технологічному персоналу приймати адекватні управляючі рішення по зміні режимів завантаження печі. Крім основної функції, використання системи націлене було також на навчання технологічного персоналу в умовах освоєння нового завантажувального пристрою.

3. В умовах нестабільної якості шихтових матеріалів розроблено новий підхід до вибору раціональних програм завантаження БЗП, заснований на зменшенні кількості робочих кутових положень лотка і зміщенні від порції до порції в рамках циклу завантаження умовних «гребенів» (максимумів рудного навантаження) уздовж радіуса колошника. Позитивний досвід реалізації такої програми завантаження показаний на прикладі однієї з ДП ТОВ «Метінвест Холдинг», де понад три роки (з 2013 р.) вона з деякими коригуваннями використовувалася і забезпечувала поряд з іншими заходами високі техніко-економічні показники. На підставі запропонованого підходу були також розроблені та реалізовані варіанти програми завантаження для роздувочного періоду печі і для режимів роботи з високим вмістом окатишів в складі шихти.

4. Представлено досвід вибору раціональних кутів нахилу розподільного лотка БЗП при зміні конфігурації його футерівки. Розроблено заходи з оперативного управління периферійним газовим потоком, в тому числі при переході на технологію вдування пиловугільного палива. Розроблено та реалізовано рекомендації з управління окружним розподілом шихтових матеріалів на ДП, які дозволили зменшити нерівномірність температур футерівки верхніх горизонтів шахти доменної печі. Сформульовані і внесені доповненням в технологічну інструкцію по доменному виробництву вимоги до програми завантаження задувочної шихти після проведення капітального ремонту з шоткретуванням шахти.

5. Показано, що робота доменних печей печі на багатокомпонентній залізорудній сировині при застосуванні ПВП обумовлює необхідність розробки технологічних прийомів і заходів, спрямованих на виключення можливості локалізації окремих матеріалів по перерізу ДП. Лабораторні дослідження і дослідно-промислове випробування показали, що в умовах роботи ДП на залізорудній сировині з вмістом Feобщ ≤ 56,0% з високою часткою окатишів і при застосуванні ПВП, основність агломерату недоцільно підвищувати до величини, що перевищує 2,0 од. В умовах роботи ДП із застосуванням ПВП, розподілом компонентів залізорудної частини шихти по перерізу колошника необхідно забезпечити підвищену концентрацію низькоосновної сировини в зоні локалізації частинок ПВП. Введення до складу шихтових матеріалів марганцевмісної добавки призводить до зниження температур плавлення суміші залізорудних матеріалів, знижує в'язкість розплаву, знижує кількість розплаву завислого в коксовій насадці і підвищує технологічну стійкість доменного процесу.

6. Розроблено вимоги до розподілу газового потоку по радіусу печі, необхідні при його регулюванні в умовах вдування в горн ПВП для досягнення заданих або високих техніко-економічних показників плавки. Показано, що при управлінні газорозподілом по радіусу печі при вдуванні в горн ПВП необхідно забезпечити достатню газопроникність периферійної зони, не допускаючи зайвого навантаження її залізорудними матеріалами, забезпечити розвинений центральний газорозподіл з одночасним розвиненим взаємним перетіканням газів між периферією і центром, при розвиненому центральному газорозподілі для підвищення економічності плавки необхідно забезпечити вузьку осьову коксову віддушину.

7. Освоєння технології вдування ПВП на досліджуваних ДП в змінних шихтових умовах і з роботою на коксі зниженої якості при використанні раціональних режимів завантаження, формування порцій і раціонального шлакового режиму дозволили в 2016 р. довести витрату ПВП, в середньому, до 130 кг/т чавуну. Оперативний контроль показань термопар футерівки дозволив своєчасно здійснювати як гарнісажеутворюючі заходи, так і коригувати розподіл компонентів шихтових матеріалів по радіусу і окружності печі. Реалізація змін програми завантаження згідно до розроблених вимог (див. п.6) і режиму формування порцій дозволила при роботі ДП без футерівки на початковому етапі освоєння ПВП знизити температури периферійного газового потоку по всій висоті печі, в середньому, на 13% і зменшити окружну нерівномірність температур на 11%. Використання в технології раціональних режимів завантаження при вдуванні ПВП дозволило до шоткретування забезпечити експлуатаційну стійкість системи охолодження і безаварійну роботу доменних печей.

8. Встановлено особливості зміни температури над поверхнею засипу шихти в залежності від витрати палива та вмісту окатишів в пристінній зоні, що відкриває можливість подальшого використання інформації термозондів для оперативного управління газовим потоком. Інформація, що отримується від стаціонарних термозондів, дозволяє контролювати вміст окатишів в периферійній зоні печі, що вкрай важливо при формуванні захисного гарнісажу в печі.

9. В результаті досліджень встановлено відсутність впливу на характер розподілу температур газового потоку над поверхнею засипу по радіусу печі температури доменної шихти при її завантаженні, як в цілому, так і в окремих зонах перерізу печі по радіусу, температури газового потоку збільшуються пропорційно збільшенню кількості гарячого агломерату у складі шихти. Отримані результати дозволяють використовувати інформацію термозондів для управління завантаженням при різному компонентному складі шихтових матеріалів.

10. Розроблено температурні показники розподілу газового потоку по радіусу доменної печі. Показники характеризують чотири основні характеристики температури газового потоку над поверхнею шихти: інтенсивність периферійного газового потоку, інтенсивність осьового газового потоку, газопроникність проміжної зони, ширину осьової коксової віддушини. Для доменних печей з БЗП і з конусним завантажувальним пристроєм (КЗП) встановлені їх оптимальні діапазони зміни при роботі доменних печей в різних газодинамічних і паливних умовах: при роботі з використанням в дутті збільшеної кількості водяної пари (на т.зв. «безгазовій шихті»), з природним газом, з природним газом та пиловугільним паливом, окремо з пиловугільним паливом. На основі запропонованих оптимальних діапазонів температурних показників розроблений та реалізований в автоматизованій системі управління експертний модуль коригування програми завантаження.

11. Виконано аналіз динаміки зміни температур футерівки заплечиків, розпару і шахти ДП за п'ять років її експлуатації – з грудня 2011 р. по вересень 2016 р. В результаті аналізу зміни температур футерівки виявлені технологічні чинники, що впливають на середньомісячні значення температури футерівки ДП. Так, на температури футерівки верхньої зони в більшій мірі впливає знос футерівки, на температури футерівки нижньої зони – формування стійкого гарнісажу. Встановлено фактори, що впливають на зміну середньоквадратичних відхилень температур футерівки по окружності печі: якість залізовмісних матеріалів і коксу, програма завантаження печі і режим формування порцій, захаращення горна і використання промивних матеріалів, параметри дуттєвого режиму з використанням різних паливних добавок, знос футерівки.

12. Визначено граничні значення середньомісячних температур, які свідчать про частковий (~50%) або повний знос футерівки шахти, а також граничні значення температур нижньої зони печі, які характеризують наявність стійкого гарнісажу. Встановлено, що середньомісячна температура футерівки середини і верху шахти – 375–400 °С свідчить про її знос на ~50% (підтверджено геодезичними вимірюваннями двічі – в середині 2013 р., та на початку 2016 р.), потім руйнування футерівки сповільнюється При перевищенні середньомісячною температурою значення 450 °С, як показали дві кампанії ДП, футерівка середини і верху шахти повністю відсутня. При середньомісячній температурі футерівки низу шахти, розпару та заплечиків – 300 °С має місце утворення в нижній зоні печі нестійкого гарнісажу, що вимагає прийняття рішень щодо коригування складу і режиму формування порцій шихти. Перевищення температурою футерівки нижньої зони значення 350 °С свідчать про повну відсутність захисного гарнісажу та (або) футерівки.

13. Прийнято, що одним з показників стабільного ходу печі можуть бути середньоквадратичні відхилення температур футерівки по окружності печі. Встановлено, що при порушеннях ходу печі середньоквадратичні відхилення температур перевищують величину 0,2·ТСЕР, де ТСЕР – середньомісячна температура футерівки шахти. Так, для рівнів установки термопар футерівки середини і верху шахти ДП величина середньоквадратичного відхилення температур по окружності печі не повинна перевищувати 60 °С, а допустима межа середньоквадратичного відхилення температур футерівки низу шахти, розпару та заплечиків становить 40 °С.

14. Виконано аналіз зміни температур, що реєструються термопарами футерівки шахти в періодах роботи доменної печі при практично повному зносі футерівки. Дана температура була ідентифікована як температура периферійного газового потоку і аналіз її зміни було виконано при роботі доменної печі в різних газодинамічних і паливних умовах: на «безгазовій шихті», з природним газом, з природним газом і пиловугільним паливом, з пиловугільним паливом. У досліджуваних різних газодинамічних і паливних умовах визначено екстремум кривої зміни температури периферійного газового потоку в нижній частині доменної печі, який прийнятий за положення кореня зони в'язко-пластичного стану. Результати, отримані раніше німецькими дослідниками свідчать на користь цієї гіпотези.

15. Розроблений і випробуваний метод обґрунтованого вибору розташування закритих повітряних фурм або повітряних фурм різного діаметру з використанням інформації про зміну температур футерівки по висоті і окружності доменної печі. В дослідних періодах роботи ДП, при використанні методу, в результаті зміни розташування закритих фурм зменшилися як окружна нерівномірність температур футерівки, так і середні значення температур. Так, середня температура футерівки низу шахти, розпару та заплечиків зменшилася на 33 °С – від 264 до 231 °С, а температура футерівки середини і верху шахти зменшилася на 88 °С – від 476 до 388 °С, що обумовлено перерозподілом інтенсивності газового потоку. Крім того, в результаті використання запропонованого методу перерозподіл газового потоку сприяв зменшенню питомої витрати коксу на 1,7% при практично незмінних витратах ПВП і коксового горіха, температури дуття, а також якісних та кількісних характеристик залізорудної сировини та коксу.

16. Розроблено основні технологічні вимоги до задувки доменної печі після її тривалої зупинки. На підставі позитивного досвіду такої задувки після тривалої, понад нормативної, стоянки без випуску «козлового» чавуну і вигрібання матеріалів з печі, сформульовані наступні основні вимоги до задувки:

* зменшене, в порівнянні з традиційним, рудне навантаження на об’єм задувочної шихти (~ 0,10–0,15 т/т);
* використання в шихті першого об’єму і перших робочих шихт легкоплавких матеріалів невисокої основності (наприклад, доменний шлак 50–100%, плавиковий шпат в перших шихтах), в тому числі, передбачити можливість подачі легкоплавких матеріалів через повітряні фурми;
* секторна задувка з боку розташування чавунної льотки на малій кількості повітряних фурм (на початку задувки 1–2 фурми), забезпечення до початку задувки впевненого прогріву по висоті льотка-повітряна фурма, шляхом установлення в чавунну льотку труб, через які подається природний газ і повітря для його горіння, забезпечення швидкості потоку дуття на виході з повітряної фурми не менше 150 м/с;
* низька інтенсивність нарощування газодуттєвих параметрів на начальному етапі задувки (витрата 1 м³ дуття/м³ об’єму на 5–7 добу та нарощування 1,6–1,8 м³ дуття/м³ об’єму через 10–15 діб);
* низька інтенсивність відкриття повітряних фурм в одному секторі (по 1–2 фурми на добу до досягнення 50% відкритих фурм через 7–10 днів) та перехід до секторного окружного відкриття фурм до кількості 75%, тривалістю 3–5 діб при забезпеченні нарощування кількості проплавляємої шихти і газодинамічних параметрів дуття;
* зменшене, в порівнянні з прийнятим, рудне навантаження перших робочих шихт при пониженому вмісті заліза в шихті (1,0–1,5–2,0 т/т, що забезпечує утримання [Si] в чавуні ~ 5,0% в перші три доби, перехід на ливарний чавун в наступні 2–4 доби).

Заходи, виконані перед і в процесі задувок доменних печей ТОВ «Метінвест Холдинг» після тривалої стоянки сприяли виведенню печей на задані планово-економічні показники, забезпечили при цьому збереження вогнетривкої футерівки, конструкцій і обладнання. На підставі наведених основних положень задувок з урахуванням підготовчих заходів і технологічних особливостей розроблено регламент задувок доменних печей після тривалих зупинок без попереднього випуску «козлового» чавуну, які внесені доповненням в технологічну інструкцію по доменному виробництву, та отримано акт впровадження.

***Наукова новизна*** наукової роботи полягає в наступному:

Для умов перехідних режимів доменної плавки з метою забезпечення її стабільності при зміні якісного і кількісного складу компонентів шихтових матеріалів, а також при зміні використовуваних в дутті паливних добавок науково обґрунтовано комплексне використання інформації сучасних засобів автоматизованого контролю: стаціонарних термозондів і термопар футерівки по висоті і окружності доменної печі для виявлення нових закономірностей і зв’язків процесів з подальшим їх застосуванням для обґрунтування вибору управляючих впливів, а також запропоновано новий підхід до вибору енергоефективних режимів завантаження:

* Обґрунтовано новий підхід до вибору раціональних програм завантаження безконусного завантажувального пристрою, що забезпечує стабільний економічний хід доменної печі при зміні технологічних умов плавки, який полягає в зменшенні кількості робочих кутових положень лотка і зміщення від порції до порції максимумів рудних навантажень уздовж радіуса колошника, що при використанні коксу низької якості сприяє підвищенню газопроникності і збільшенню ступеня використання відновлювальної здатності газів за рахунок збільшення часу перебування газів в печі.
* Вперше розроблені температурні показники оцінки розподілу газового потоку по радіусу доменної печі. Встановлено їх раціональні діапазони зміни при роботі доменних печей в різних газодинамічних і паливних умовах: при роботі на зволоженому дутті без природного газу і пиловугільного палива, з природним газом, з природним газом і пиловугільним паливом, з пиловугільним паливом. З використанням запропонованих показників вперше сформульовані вимоги до розподілу температур газового потоку по радіусу печі, дотримання яких при використанні раціональних режимів завантаження дозволяє досягти високих техніко-економічних показників доменної плавки.
* Вперше на основі аналізу температур футерівки по висоті доменної печі протягом п'яти років її експлуатації встановлені граничні значення середньомісячних температур, при яких футерівка середини і верху шахти вироблена на 50 та 100%. Для футерівки низу шахти, розпару і заплечиків встановлені середньомісячна температура, яка свідчить про утворення в нижній зоні печі нестійкого захисного гарнісажу і температура, що характеризує повну його відсутність. Встановлено, що величини середньоквадратичних відхилень температур футерівки шахти по окружності, які перевищують 20% від їх середніх значень, свідчать про порушення ходу печі. На підставі отриманих особливостей зміни температур футерівки і їх середньоквадратичних відхилень розроблено метод оцінки впливу технологічних властивостей на стан футерівки доменної печі.
* Вперше досліджено вплив дуттєвого режиму при використанні в ньому збільшеної кількості водяної пари, природного газу, природного газу із пиловугільним паливом та окремо пиловугільного палива на зміну форми кривої розподілу температури периферійного газового потоку по висоті доменної печі від фурменої зони до колошника і температури газів по радіусу печі над поверхнею засипу шихти, що стало передумовою для розробки методу ідентифікації межі зони в'язко-пластичного стану в периферійній зоні печі. Встановлені особливості впливу газодинамічного режиму доменної плавки на температуру газового потоку дозволяють при зміні режиму завантаження або дуттєвого режиму печі адекватно виявляти і правильно відслідковувати фактори, що впливають на розподіл температури газів.

***Практичне значення*** отриманих результатів:

* Перед пуском доменної печі після її реконструкції виконано комплекс досліджень, який включає: дослідження параметрів потоків шихтових матеріалів, що завантажуються в доменну піч за допомогою завантажувального пристрою, розподілу маси порцій і їх компонентів на колошнику, визначення витратних характеристик шихтового затвору бункера завантажувального пристрою, дослідження формування профілю поверхні засипу шихти, гранулометричного і компонентного складів шару залізовмісних матеріалів по радіусу колошника. Виконаний комплекс досліджень дозволив після задувки печі у жовтні 2011 р. протягом наступних п'яти років визначати і реалізовувати режими роботи механізмів завантажувального пристрою, необхідні для ефективного застосування раціональних програм завантаження доменної печі.
* Розроблено та у 2011 р. реалізовано в автоматизованій системі управління модельну систему підтримки прийняття рішень по вибору і коригуванню програм завантаження доменної печі, яка дозволила протягом п’яти наступних років розробляти раціональні програми завантаження, а також навчити технологічний персонал при освоєнні нового безконусного завантажувального пристрою.
* Розроблено нові підходи до вибору раціональних програм завантаження, що використовують принцип формування змінного максимуму рудного навантаження уздовж радіусу печі в рамках циклу завантаження для умов роботи на шихті низької якості. Реалізація такої програми завантаження у лютому 2013 р. з деякими змінами протягом наступних трьох років дозволила забезпечити стабільний і економічний хід плавки. Адаптація такої програми завантаження під технологію використання пиловугільного палива дозволила зменшити температури газового потоку периферійної зони по всій висоті доменної печі, а також забезпечити збереження системи охолодження при освоєнні пиловугільного палива без футерівки.
* Розроблений та реалізований у 2016 р. експертний модуль коригування програми завантаження з використанням встановлених раціональних діапазонів зміни температурних показників розподілу газового потоку по радіусу печі в різних технологічних умовах доменної плавки: при використанні в дутті збільшеної кількості водяної пари, природного газу, природного газу із пиловугільним паливом та окремо пиловугільного палива.
* Розроблений і випробуваний у 2016 р. метод обґрунтованого вибору розташування закритих повітряних фурм або повітряних фурм різного діаметру з використанням інформації про зміну температур футерівки по висоті і окружності доменної печі.
* Розроблено та реалізовано у 2014 р. нові положення задувки доменних печей після їх тривалої зупинки (понад 80 діб) без попереднього випуску козлового чавуну, що дозволило вийти на планові показники і забезпечити збереження системи охолодження і броні печей.

Підтвердженням ефективності реалізації результатів роботи є сумарний економічний ефект за п’ять років (2011–2016 рр.) із урахуванням витрат на виконання науково-дослідних робіт, який складає 5,1 млн. дол. США:

Е=  – 566242 = 5 120 706,58 дол. США,

де 5,5 – зниження питомої витрати коксу, отримане від впровадження розробок, кг/тону чавуну; 210 – вартість однієї тони коксу, дол. США; 4923765 – виробництво чавуну за період 2011–2016 рр., т; 566242 – сумарна вартість науково-дослідних робіт за період 2011–2016 рр., дол. США.

Результати роботи мають енерго- і ресурсозберігаючий характер, не мають аналогів в Україні та знаходяться на рівні кращих світових розробок у галузі виробництва чавуну. Загальна кількість наукових праць кандидатів на здобуття премії Президента України для молодих вчених 2018 р. становить 55, що включає: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, 10 статей, які включено до наукометричної бази «Scopus» та 3 патенти України на винахід. Загальна кількість посилань на публікації авторів складає – 42 та h-індекс – 4 (згідно з базою даних «Google Scholar»).

Основні положення наукової роботи, що висунена на здобуття премії, опубліковані у 18 статтях, з яких 11 статей у зарубіжних виданнях. 8 статей за темою роботи опубліковано у журналах, що входять в міжнародну наукометричну базу «Scopus» (1 – Metallurgical and Mining Industry {Україна}, 1 – Chernye Metally {РФ}, 3 – Metallurgist {США}, 3 – Steel in Translation {Велика Британія}). Кількість посилань на публікації за темою наукової роботи авторів складає – 15 та h-індекс – 2 (згідно з базою даних «Scopus»); 40 та h-індекс – 4 (згідно з базою даних «Google Scholar»). Зміст печатних робіт повністю відповідає основному змісту наукової роботи, представленої на здобуття премії Президента України для молодих вчених 2018 р.

Старший науковий співробітник

ІЧМ НАН України, к.т.н. Є.І. Шумельчик

Науковий співробітник

ІЧМ НАН України В.В. Горупаха

Підписи Шумельчика Є.І., Горупахи В.В. засвідчую:

В.о. вченого секретаря

ІЧМ НАН України, к.т.н. Л.Г. Тубольцев