

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Меркулова Олексія Євгеновича “Розвиток теоретичних основ удосконалення доменної плавки при використанні системного аналізу взаємозв’язку параметрів з показниками ефективності реального процесу”, яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – “Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів”

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Основними показниками, що характеризують ефективність доменної плавки і обумовлюють конкурентоспроможність готової продукції доменного виробництва є продуктивність печі і витрата коксу. При цьому задача скорочення витрати коксу з метою зменшення собівартості чавуну завжди залишається актуальною. Найбільш ефективними заходами, що дозволяють істотно поліпшити техніко-економічні показники роботи доменних печей є підвищення якості коксу і залізорудної частини шихти, скорочення потреби доменної плавки в теплоті за рахунок оптимізації підготовки шихти і поліпшення організації технології. Крім того, значні резерви в зниженні питомої витрати коксу криються в організації оптимального розподілу шихти і газу по поперечному перетину доменної печі.

В роботі розглянуті проблеми пізнання процесів доменної плавки на основі їх моделювання та системного аналізу. Виконані за допомогою багатозонної математичної моделі аналітичні дослідження, дозволили оцінити очікувані показники плавки при різних технологічних режимах. А також виявити та уточнити нові закономірності процесів, які можуть бути використані в ході вдосконалення технології доменної плавки.

Тому тему дисертаційної роботи Меркулова О.Є., яка спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми – вдосконалення технології доменної плавки і підвищення її ефективності за рахунок покращення якості шихтових матеріалів і методів управління газодинамікою плавки, слід вважати

актуальною.

Напрямок дисертації відповідає вимогам керівних документів МОН України про присудження вчених ступенів.

2. Наукова новизна отриманих результатів

В дисертаційній роботі виконано комплекс теоретичних розробок та експериментальних досліджень, направлених на підвищення ефективності доменної плавки в сучасних паливно-сировинних і технологічних умовах за рахунок покращення газодинамічних умов роботи доменної печі і якості шихтових матеріалів. Результати роботи є теоретичним узагальненням нових наукових підходів до контролю та управління технологією плавки в залежності від впливу абсолютних значень та коливань показників паливно-сировинних умов та параметрів дуттьового режиму плавки на показники роботи доменних печей.

На основі проведених досліджень в роботі отримані наступні **наукові результати**:

Запропоновано нове вирішення наукової проблеми, що полягає в прогнозі режимів і вдосконаленні технології доменної плавки за рахунок використання розробленої багатозонної моделі, де враховуються параметри внутрішнього стану процесів в окремих зонах об'єму печі у взаємозв'язку із загальними балансовими співвідношеннями. Це дало можливість виявляти шляхи зменшення витрат коксу і збільшення продуктивності агрегату за рахунок раціональної зміни параметрів дуття, шихти й розподілу рудних навантажень по перетину доменної печі.

1. Встановлено нові закономірності при дослідженні нерівномірності розподілу шихти на колошнику: мінімальний розвиток процесу прямого відновлення і відповідного теплоспоживання на цей процес при будь яких умовах має місце на периферії і найбільш високий розвиток – в проміжних зонах печі; при реальних розподілах шихти на колошнику існують кільцеві перетини, в яких має місце виродження двоступеневої схеми теплообміну по висоті, що сприяє зменшенню стійкості процесів і додатковій витраті палива; вперше

отримана теоретичними розрахунками загальна величина економії коксу при переході від параболічного розподілу рудного навантаження, характерного для конусних завантажувальних пристроїв, до рівномірного і близького до нього розподілів, характерних для безконусних завантажувальних пристроїв, яка становить 3–4 %.

2. Вперше встановлено такі зсуви в протіканні процесів при збільшенні абсолютної величини вмісту заліза в повністю офлюсованій шихті від 50 до 65 %: скорочення ступеня прямого відновлення при збільшенні вмісту заліза в шихті в області низьких абсолютних його значень і високих витратах коксу і збільшення цього показника в протилежній сфері значень вмісту заліза в шихті і витратах коксу; зміщення вниз зони розм'якшення й плавлення при збільшенні вмісту заліза в шихті зі збільшенням твердофазної зони, що сприяє поліпшенню умов теплообміну і відновлення; менша ефективність підвищення вмісту заліза в шихті при наявності радіальних кільцевих зон з виродженим верхнім ступенем теплообміну, що викликає необхідність більш рівномірного розподілу рудних навантажень в проміжній зоні при зростанні вимог до фізико механічних властивостей сировини і коксу.

3. Вперше показано, що з застосуванням попередньо металізованої сировини >30 % відбувається ослаблення впливу розподілу матеріалів на колошнику на показники плавки. Встановлено, що при ступені металізації шихти понад 20 % ізотерми газу переміщуються вгору, збільшуючи втрату тепла через колошник, а зона розм'якшення і плавлення збільшується в об'ємі й потовщується, це пов'язано зі збільшенням необхідної для нагріву продуктів плавки висоти нижнього ступеня теплообміну і скороченням висоти верхнього при збільшенні мінімальної по висоті різниці температур шихти і газу, що обмежує ефективність реалізації цієї технології.

4. Вперше встановлено, що при збільшенні витрат природного газу до 100 м³/т чавуну диференційний еквівалент заміни коксу (еквівалент в діапазоні витрат природного газу від попереднього до поточного) скорочується рівномірно на 0,1 %/м³ від початкової величини 1,0–0,9 кг/м³. При подальшому

збільшенні витрат природного газу в зоні зниження ступеня прямого відновлення <20 % відбувається різке підвищення температури колошникового газу, яке призводить до скорочення диференціального еквівалента заміни коксу в 1,5–4 рази. Формування раціонального розподілу матеріалів на колошнику зменшує скорочення диференціального еквівалента заміни коксу в залежності від умов на 10–15 %.

5. Вперше встановлено особливості перенесення теплоти в стовпі шихти при збільшенні температури дуття, які полягають у тому, що в високотемпературних зонах (>900 °C) через більш проникні радіальні кільцеві зони з низьким рудним навантаженням проходить більше газу (по масі), ніж через менш проникні радіальні кільцеві зони з високим рудним навантаженням. Менше охолодження газу в перших стимулює перетікання газу з них в інші через коксові шари й сприяє підтримці інтенсивності теплопередачі на рівні, який забезпечує зменшення температури колошникового газу при збільшенні температури дуття.

6. Вперше теоретично обґрунтовано механізм зміни ступеня прямого відновлення r_d і температури колошникового газу t_k при збагаченні дуття киснем, пов'язаний з відмінностями інтенсивності передачі теплоти від газу до шихти в високотемпературних і низькотемпературних зонах печі. Показано, що температура колошникового газу t_k в більшості режимів з підвищенням вмісту кисню збільшується або не змінюється і злегка зменшується лише при низьких температурах дуття. Величина ступеня прямого відновлення r_d також істотно не зменшується при зростанні концентрації відновників і скорочення тривалості перебування шихти в печі, а питомі втрати теплоти змінюються незначно, переважаючим фактором теплового балансу є скорочення приходу теплоти з дуттям при виведенні частини азоту. В результаті, на відміну від відомих балансових розрахунків, в яких передбачається скорочення r_d і зменшення t_k , приріст продуктивності при збільшенні вмісту кисню виявився меншим (0,9–2,7 проти 1,0–3,0 %/%), а перевитрати коксу більшими (0,5–1,45 проти 0,1–0,5 %/%).

7. Вперше встановлено закономірності процесів, які стали основою формування раціональних режимів технології з вдуванням продуктів газифікації вугілля: встановлено, що збільшення витрат кисню для газифікації порошкового вугілля в прифурменому газифікаторі при відношенні $O/C > 0,5$ моль/моль сприяє зростанню витрат коксу за рахунок збільшення питомих втрат теплоти, обумовлених скороченням продуктивності доменної печі, а також за рахунок зменшення тепловіддачі продуктів газифікації вугілля, пов'язаного зі зростанням частки азоту, при цьому в об'ємі доменної печі відбувається зміщення ізотерм вниз зі зменшенням висоти нижнього ступеня теплообміну. Це дає підставу для підтримки при всіх режимах газифікації співвідношення $O/C \leq 0,5$; встановлено, що збагачення дуття для газифікації вугілля в прифурменому газифікаторі киснем до 40–60 % дозволяє отримувати високопотенційний гарячий відновний газ, вдування якого в доменну піч менш ефективно, ніж вдування гарячого відновного газу, отриманого на атмосферному дутті з максимально можливою температурою. Це обумовлено ослабленням впливу на витрати коксу відновних процесів і скороченням теплоти азоту дуття.

3. Практична цінність дисертаційної роботи

1. З використанням матеріалів дисертаційної роботи на металургійних підприємствах ТОВ «Метінвест Холдинг» введено керівний документ «Доменні печі. Нормативи витрат коксу й продуктивності» РД 3409 3721 2015. Цей документ містить методику, призначену для використання при аналізі змін питомих витрат коксу й продуктивності доменних печей під впливом змін складу й характеристик шихтових матеріалів, палива, технологічних параметрів доменної плавки й організаційних факторів ведення виробництва чавуну (параметричний аналіз).

2. На основі виконаного параметричного аналізу сформовані умови комплексного використання кращих параметрів плавки з позицій максимального скорочення витрат коксу за рахунок його заміщення пиловугільним паливом (250 кг/т) і коксівним газом зі збільшенням температури дуття до 1300 °С й

концентрації в ньому кисню 25 % при вмісті заліза в повністю офлюсованій шихті до 60 % і необхідному поліпшенні металургійних властивостей коксу й сировини, а також оптимізації розподілу матеріалів на колошнику. Розрахунками встановлена можливість скорочення витрат коксу в зазначеному режимі до 200 кг/т чавуну.

3. Запропоновано спосіб подачі гарячих відновлювальних газів у фурменну зону доменної печі через змонтований на фурменному приладі реактор–газифікатор для одержання гарячого відновлювального газу з регульованим коефіцієнтом надлишку окислювача (патент на корисну модель 117035).

4. Розроблено пристрій подачі дуття й відновлювальних газів у доменну піч, який оснащений другим газовим трактом подачі дуття в реактор–газифікатор пиловугільного палива (патент на корисну модель 117584).

4. Достовірність наукових положень і висновків дисертаційної роботи

Сформульовані в роботі висновки, наукові положення та рекомендації ґрунтуються на детальному вивченні літератури за темою дисертації та на результатах теоретичних і експериментальних досліджень, виконаних з використанням комплексу сучасних методів досліджень.

Достовірність отриманих результатів забезпечується відповідністю між теоретичними висновками та практичними результатами.

В роботі використані сучасні методи досліджень, у тому числі математичне моделювання, експериментальні дослідження та промислові випробування розроблених технічних рішень. Теоретичні дослідження ґрунтувались на фундаментальних положеннях гідродинаміки, тепломасообміну й термодинаміки, фундаментальних положеннях системного аналізу. Для обробки отриманих результатів використані методи статистичної обробки експериментальних даних.

5. Повнота викладення результатів досліджень у публікаціях

За темою дисертації опубліковано 35 робіт, у тому числі: 2 монографії, 7 статей у спеціалізованих наукових виданнях, затверджених ДАК України, 9 доповідей на наукових конференціях, отримано 3 патенти України, 14 статей увійшли до науко метричних баз Scopus і WoS.

Результати роботи доповідались на провідних світових конгресах з доменного виробництва: «Proceedings 6th European Coke and Ironmaking Congress» Düsseldorf (Germany); «AISTech–2012 Proceedings of the Iron&Steel technology conference», Atlanta (USA); «International exchange of technologies in the field of iron production», 2018, Zhangjiang (China).

Кількість та якість публікацій, їх повнота відповідають вимогам, що висунуто до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

6. Оцінка змісту дисертаційної роботи та її завершеності

Дисертаційна робота Меркулова О.Є. (Том 1) складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків (том 2). Робота містить 389 сторінок, з них: 249 сторінок основного тексту, 112 рисунків, 69 таблиць і додатки. Список використаних джерел складається з 269 найменувань. Том 2 включає 6 додатків загальним обсягом 129 стор.

У вступі відображена актуальність теми, мета дослідження, визначені задачі, об'єкт і предмет досліджень, сформульована наукова новизна отриманих результатів та їх практична цінність.

У першому розділі, приводяться результати аналізу проблеми вдосконавлення теорії й технології доменної плавки. Особливістю процесу вивчення у великій системі «доменна плавка» є тісний зв'язок із процесом розвитку технології. У силу цього доменній плавці притаманне наявність множини взаємопов'язаних елементів, що ускладнює вихідну інформацію й моделі.

У ході розвитку технології й дослідження процесів плавки сформувалися наступні основні напрямки їх вивчення.

1. Тепломасообмін: Надходження і засвоєння теплоти, теплові баланси. Теплообмін у доменній печі. Відновлення заліза.

2. Механіка протитечії матеріалів і газів: Рух матеріалів. Газомеханіка. Формування протитечії в процесі завантаження шихти.

3. Генерація енергії й формування продуктів плавки: Утворення й функціонування фурмених зон. Зміна фазового стану шихтових матеріалів. Параметри коксової насадки, фільтрація й видалення продуктів плавки.

4. Розвиток розрахункових методів аналізу процесів: Аналіз реальних доменних плавок. Прогноз показників плавки. Особливості моделювання процесів. На підставі виконаного аналізу сформульовані завдання дисертаційного дослідження.

Другий розділ розглянуті методичні прийоми аналізу процесів і показників доменної плавки. Виконаний аналіз показав, що адекватність моделей реальним процесам залежить, головним чином, від ступеня вивченості процесів. Оскільки підстроювання до реальних умов за параметрами внутрішнього стану можливе тільки дуже приблизно, їх роблять по вихідних параметрах, що не дозволяє дати однозначну оцінку адекватності моделі реальним процесам. Це викликає необхідність введення емпіричних коефіцієнтів, що не є константами, а скоріше псевдоконстантами, змістовна основа яких не завжди однозначна. Враховуючи принципову неможливість досягнення повної адекватності моделі реальному процесу характер побудови моделі (наприклад, модульний) повинен передбачати можливість її перебудови й доповнення в міру перевірки адекватності реальним процесам у широкому діапазоні режимів.

Третій розділ виконано аналітичне дослідження впливу розподілу рудного навантаження по радіусу на показники процесів при різних режимах доменної плавки.

За базові режими роботи приймалися фактичні умови доменних печей №9 об'ємом 5000 м³ ПАТ «Арселор Міттал Кривий ріг» і №5 об'ємом 5500 м³ ВАТ «Северсталь». По-перше: це печі великого об'єму, обладнані безконусними завантажувальними пристроями, численними засобами вимірювання, по-друге: працюють в різних паливно-сировинних умовах. Для перевірки розробленої моделі виконали адаптацію до умов роботи доменних печей. В якості

основного критерію адаптації прийнято значення витрат кускового палива (кокс+антрацит) в базовому періоді. Так для ДП-9 ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг», при фактичних технологічних параметрах плавки і завантаження шихти, прийнятих в якості базових, результати розрахунків дозволили виконати аналіз показників і процесів плавки з виявленням можливості скорочення витрат коксу за рахунок раціональної зміни параметрів завантаження шихти .

У четвертому розділі виконано аналіз процесів і показників доменної плавки при варіюванні параметрів дуття, шихти при нерівномірності розподілу матеріалів. На основі виконаного параметричного аналізу сформовані умови комплексного використання кращих параметрів плавки і виконано аналітичне дослідження показників і процесів доменної плавки з позицій максимального скорочення витрат коксу за рахунок його заміщення пиловугільним паливом (250 кг/т) і коксівним газом (100 м³/т) зі збільшенням температури дуття до 1300 °С і концентрації в ньому кисню 25 % при вмісті заліза в повністю офлюсованій шихті до 60 % і необхідному поліпшенні металургійних властивостей коксу і сировини, а також оптимізації розподілу матеріалів на колошнику. Розрахунками встановлено можливість скорочення витрат коксу в зазначеному режимі до 200 кг/т чавуну.

П'ятий розділ виконане аналітичне дослідження щодо заміщення частини коксу продуктами газифікації низькосортного вугілля. Показано, що фундаментальне розв'язання проблеми скорочення витрат коксу до 180÷200 кг/т чавуну з використанням для його заміщення низькосортного вугілля може бути отримано на основі технології доменної плавки з вдуванням гарячих відновлювальних газів - продуктів газифікації вугілля, одержуваних в спеціальних газифікаторах - прифурменних (встановлюються на кожну фурму доменної печі) і в окремих агрегатах-газифікаторах великої потужності. Сформовані раціональні режими роботи доменної печі при використанні продуктів газифікації вугілля.

У шостому розділі, на основі узагальнення закономірностей протікання процесів доменної плавки й установлених загальних принципів її

функціонування дається нормативна оцінка впливу технологічних параметрів на витрату коксу й продуктивність доменної печі. Зазначена нормативна оцінка є методичною основою для виконання оперативного аналізу технології при зміні окремих параметрів плавки і їх сукупності. Розроблений методичний інструмент «Нормативна оцінка впливу параметрів доменної плавки на витрати коксу й продуктивність доменної печі» є розвитком раніше розробленого під керівництвом проф. Й. Г. Товаровського галузевого документа «Доменні печі. Нормативи витрат коксу», який в подальшому уточнювався по окремих позиціях на металургійних підприємствах на основі практичних даних, аналітичних і експериментальних досліджень.

В цілому дисертація відрізняється логічним викладенням наукових матеріалів дослідження і оформлена відповідно до існуючих норм.

Автореферат дисертації та опубліковані праці повністю відображають основний зміст роботи.

7. Загальні зауваження до дисертаційної роботи:

1. У огляді відомих досліджень технології вдування ПВП у доменну піч відсутні дані про її випробовування у доменному виробництві МК «Запоріжсталь» у минулому столітті під керівництвом професора Ю.М. Потєбні.

2. При оцінці формування процесу шлакоутворення не бралася до уваги система охолодження в пристінній зоні, а звідси і процес гарнісажеутворення.

3. При оцінці газодинаміки не згадується конструкційна неоднорідність розподілу дуття по периметру печі.

4. Положення про те, що кількість рідких фаз прямо пропорційне рудному навантаженню відомо давно і стало хрестоматійним.

5. Автор вказує, що в інтервалі температур 900-1100 градусів має місце розм'якшення матеріалів, проте численні дослідження показують, що деяке розм'якшення, дійсно має місце в цьому інтервалі, ще не робить істотного впливу на газопроникність шару. Тобто виділення даного діапазону в якості окремої зони не має великого сенсу.

6. Виклад основних розділів дисертаційної роботи містить багато загальних положень, що ускладнює сприйняття результатів досліджень, виконаних здобувачем.

7. Згідно з назвою дисертаційної роботи дослідження спрямовані на вдосконалення доменної технології. При цьому ні в одному з розділів не розглядається питання забезпечення за допомогою запропонованих автором технічних рішень і нових наукових положень отримання чавуну необхідної якості.

8. Надмірна насиченість різноманітним матеріалом та великий обсяг приведених даних не дозволяють автору сконцентруватися на принципових питаннях і довести їх рішення до логічного завершення з конкретними практичними результатами.

Наведені зауваження не знижують загальної оцінки дисертаційної роботи, яка виконана на достатньо високому науковому рівні.

8. Висновок про відповідність дисертації вимогам “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вчених звань...”

Дисертаційна робота Меркулова О.Є. за рівнем теоретичних і експериментальних досліджень є завершеною працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, що в сукупності дозволяють вирішити важливу проблему вдосконалення доменної плавки в цілому за рахунок підвищення ступеня використання теплової та хімічної енергії газового потоку шляхом його раціонального розподілу по поперечному перерізу доменної печі. Результати роботи є теоретичним узагальненням нових наукових підходів до контролю та управління технологією плавки в залежності від впливу абсолютних значень та коливань показників паливно-сировинних умов та параметрів дуттьового режиму плавки на показники роботи доменних печей.

Дисертаційна робота присвячена створенню методу комплексного розрахунку зональних і інтегральних характеристик доменної плавки і проведення

на його основі узагальненого параметричного аналізу режимів функціонування технології при різних газодуттєвих параметрах, складах шихт, нерівномірності розподілу матеріалів і використанні альтернативних коксозберігаючих технологій.

Дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.16.02 – “Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів” та пп. 9, 10, 12 “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння наукового звання старшого наукового співробітника”.

Автор дисертаційної роботи Меркулов Олексій Євгенович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – “Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів”.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук,
завідувач кафедри автоматизованого
управління технологічними процесами,
«Інженерного інституту ЗНУ»



М.Ю. Пазюк

Підпис М.Ю. Пазюка засвідчує