

## РЕЦЕНЗІЯ

Голова спеціалізованої  
вченої ради РНД 12812  
6.05.2026  
Голова спеціалізованої  
вченої ради РНД  
В.Камініна

на дисертаційну роботу Щербачова Вадима Родіоновича  
«ВДОСКОНАЛЕННЯ УПРАВЛІННЯ ЗАВАНТАЖЕННЯМ  
ДОМЕННОЇ ПЕЧІ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЮ ШИХТОЮ НА  
ОСНОВІ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ПАРАМЕТРИ ПЛАСТИЧНОЇ ЗОНИ»,  
представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за  
спеціальністю 136 – «Металургія»

### Оцінка структури змісту дисертації

Дисертаційна робота Щербачова Вадима Родіоновича складається зі вступу та основної частини з п'яти розділів з висновком до кожного з них, загальних висновків і переліку використаних джерел, який налічує 83 найменувань публікацій закордонних і вітчизняних авторів. У розділах дисертації 26 рисунків і 18 таблиць. Повний обсяг дисертації – 151 сторінка.

Структура роботи по складу та послідовності розділів логічна та відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

У Вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, надано інформацію щодо зв'язку роботи з науковими програмами, сформульовано її мету і задачі досліджень, вказано об'єкт, предмет та методи досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, а також відомості щодо особистого внеску здобувача, апробацію отриманих результатів, представлені дані щодо структури та обсягу дисертації.

У першому розділі виконано аналіз відомих результатів досліджень особливостей формування і ролі пластичної зони у процесі плавки та розробок з визначення її форми і положення в доменній печі. Показана перспективність досліджень, пов'язаних із розробкою математичних моделей та методів визначення параметрів пластичної зони. Показано, що найбільшу перспективу для вирішення задач підвищення ефективності плавки шляхом управління формуванням пластичною зоною має розробка нових методів оперативного

визначення її параметрів із застосуванням різних засобів контролю розподілу шихти та газового потоку на доменних печах. На теперішній час відсутні результати досліджень кількісної оцінки зв'язків параметрів пластичної зони з показниками плавки, тому особливу актуальність набувають розробки способів корегування режимів завантаження шихти на основі інформації про параметри пластичної зони, отриманій за допомогою математичних моделей та розрахункових методів.

У другому розділі представлені результати розробки нового методу визначення положення і форми пластичної зони у доменній печі, заснованого на показниках розподілу температур газового потоку по радіусу колошника.

За рахунок розрахунково - аналітичного визначення тепла, яке утворюється у нижній зоні доменної печі, удосконалена математична модель визначення площі поверхні плавлення пластичної зони.

Автором запропоновано новий спосіб визначення меж пластичної зони у доменній печі, алгоритм реалізації якого передбачає розрахунки та операції з визначення положення координат точок ліній плавлення та розм'якшення, а також товщини пластичної зони у контрольованих зонах доменної печі. Основою для розробки нового способу з'явилися розрахунки характеристик розподілу компонентів шихти за перерізом печі за допомогою комплексної математичної моделі завантаження компонентів в бункер завантажувального пристрою, вивантаження з нього, руху по тракту завантажувального пристрою та розподілу на поверхні засипу.

Запропоновано новий метод визначення параметрів пластичної зони у доменній печі, який базується на використанні нового способу та систематизованій сукупності математичних моделей: комплексної моделі завантаження багатокомпонентної шихти у доменну піч; моделі зміни фазового стану залізовмісних компонентів шихти у високотемпературній зоні; удосконаленій моделі визначення площі поверхні плавлення.

У третьому розділі приведено результати розрахункових досліджень з визначення форми та положення пластичної зони у доменній печі, яка

оснащена термовимірювальними балками над поверхнею засипу шихти, за допомогою запропонованого методу. З використанням показника ефективності плавки обґрунтовано вибір дослідницьких періодів роботи доменної печі у різних технологічних умовах для визначення форми і положення пластичної зони за допомогою нового методу. Виділено чотири періоди: період 1 - робота без паливних добавок у дутті, період 2 - робота з природним газом, період 3 - робота з природним газом та пиловугільним паливом, період 4 - робота з пиловугільним паливом.

З використанням системи автоматизованого проектування (CAD-системи) за допомогою нового методу визначено форму та положення пластичної зони в доменній печі для чотирьох періодів її роботи..

Для підтвердження адекватності запропонованого методу визначення форми та положення пластичної зони у доменній печі з використанням інформації термозондів, встановлених над поверхнею засипу шихти, виконано багатовимірний порівняльний аналіз особливостей формування пластичної зони за різних технологічних умов плавки. Результати оцінки впливу технологічних параметрів на положення пластичної зони в печі, що визначається координатами ліній розм'якшення і плавлення, підтверджують обґрунтованість та достовірність визначення положення пластичної зони в доменній печі за допомогою запропонованого методу.

У четвертому розділі приведено розробку критерію оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі, оснащених термовимірювальними зондами над поверхнею засипу шихти.

Для чотирьох періодів роботи доменної печі виконано розрахункові дослідження, в результаті яких визначено середньодобові значення критерію оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі. Аналіз та встановлення зв'язків критерію з основними технологічними параметрами процесу плавлення підтвердили достовірність оцінки форми та положення пластичної зони у доменній печі за його допомогою. Запропонований критерій

може бути використаний для оцінки раціональності форми та положення пластичної зони доменної печі у змінних технологічних умовах плавки.

**П'ятий розділ** роботи присвячений розробці способу обґрунтованого корегування характеристик режиму завантаження шихти, який забезпечує формування раціональних параметрів пластичної зони в доменній печі. Для цього автором виконані дослідження з встановлення взаємозв'язків параметрів пластичної зони з температурою газу над поверхнею засипу шихти для чотирьох періодів роботи печі. Автором виявлені взаємозв'язки вертикальних координат точок лінії плавлення з температурою газу над поверхнею засипу та рудним навантаженням у рівних за площею кільцевих зонах доменної печі, які показали можливість розробки методів контролю положення та форми пластичної зони з використанням даних термовимірювальних зондів, а також можливості корегування параметрів цієї зони шляхом зміни розподілу рудного навантаження по радіусу колошника доменної печі

В результаті досліджень встановлено, що в якості регулюючого параметру при корегуванні температурного рівня поверхонь розм'якшення та плавлення, які визначають геометричні параметри зони розм'якшення – плавлення у різних кільцевих зонах доменної печі, може використовуватися відношення кількості окатишів і агломерату у цих зонах.

На прикладі введення у суміш конвертерного шлаку показано вплив зміни компонентного складу суміші на її високотемпературні властивості. Дослідження впливу підвищення вмісту конвертерного шлаку на високотемпературні властивості суміші свідчить, що потрібне корегування параметрів пластичної зони у певних межах може бути реалізоване також шляхом зміни розподілу добавок.

Для регулювання розподілу конкретного компонента змішаної залізорудної порції по радіусу колошника у якості управляючого параметру автором запропоновано використання уставки розташування дози цього компоненту на конвеєрі або у скіпі та отримані формули для визначення цієї

величини при заданих вмісті компонента у кільцевій зоні та вмісті його у шихті для доменних печей з різною структурою системи завантаження.

Встановлені зв'язки рудного навантаження в кільцевих зонах колошника доменної печі з координатами положення точок лінії плавлення у цих зонах та показано, що для заданої зміни вертикальної координати лінії плавлення в осьовій та приосьовій зонах потрібна, як правило, значно менша зміна рудного навантаження, ніж у проміжній та периферійній зонах.

На основі встановлених зв'язків параметрів пластичної зони з показниками розподілу шихтових матеріалів по радіусу колошника доменної печі (рудне навантаження та вміст компонентів шихти в зонах колошника) автором розроблено метод обґрунтованого корегування характеристик режиму завантаження шихти, який забезпечує формування раціональних параметрів пластичної зони в доменній печі. Розроблено блок - схему вирішення задачі обґрунтування вибору управляючих впливів корегуванням параметрів режиму завантаження шихти з метою забезпечення формування раціональної пластичної зони в доменній печі.

У **загальних висновках** дисертації викладено найбільш важливі наукові та практичні результати, що були отримані в дисертаційній роботі і сприяли розв'язанню сформульованого науково-прикладного завдання.

**Перелік посилань**, які були використані здобувачем в аналітичному огляді, достатньо повно охоплює зазначену галузь знань та відображає основні напрями розвитку досліджень з підвищення ресурсо- та енергоефективності технології доменної плавки за рахунок наукового обґрунтування управляючих впливів на хід печі шляхом вибору та корегування параметрів режиму завантаження шихтових матеріалів, що реалізують формування раціональної структури стовпа шихти у доменній печі.

**Оцінка оформлення, мови і стилю дисертації.** Матеріали дисертації викладені послідовно, а їх оформлення відповідає вимогам щодо дисертацій на присвоєння наукового ступеня доктора філософії. Мова і стиль дисертації забезпечують доступність сприйняття викладених матеріалів досліджень,

наукових положень, висновків і рекомендацій. Дисертація написана та оформлена відповідно до вимог щодо дисертацій доктора філософії.

### **Наукові результати дисертації**

Виконано наукове обґрунтування використання інформації о параметрах пластичної зони в доменній печі для вибору характеристик режиму завантаження багатокomпонентної шихти, включаючи програму розподілу порцій та параметри їх формування, які забезпечують раціональний розподіл компонентів шихти по радіусу колошника.

1. Вперше для визначення параметрів пластичної зони в доменній печі застосовано підхід, який заснований на комплексному використанні інформації про розподіл температур газового потоку над поверхнею засипу шихти (або температур поверхні засипу) та математичних моделей процесу завантаження доменної печі, температурно – відновлювальної обробки шихти з утворенням розплавів та моделі поверхні плавлення, що дозволило розробити новий метод визначення параметрів пластичної зони у доменній печі. На відміну від відомих методів запропонований враховує розподіл компонентів шихти по кільцевим зонам колошника, відмінності складу сумішей компонентів у різних зонах колошника та обумовлену цим різницю температурних умов агрегатних перетворень по перерізу печі. Адекватність запропонованого методу підтверджена виконаними аналітичними дослідженнями, в результаті яких встановлені (виявлені) зв'язки параметрів пластичної зони, розрахованих на основі запропонованого методу, з основними технологічними параметрами процесу плавки.

2. Вперше встановлені зв'язки рудного навантаження в кільцевих зонах колошника доменної печі з координатами положення точок лінії плавлення у цих зонах та показано, що залежність цих параметрів може бути представлена степеневою функцією. Встановлено, що зміна рудного навантаження на одну й ту ж величину у різних зонах доменної печі може обумовлювати зміщення лінії плавлення, яке відрізняється у 3 – 5 рази: для заданої зміни вертикальної координати лінії плавлення в осьовій та приосьовій зонах потрібна, як

правило, значно менша зміна рудного навантаження, ніж у проміжній та периферійній зонах.

3. Вперше встановлені особливості зміни координат лінії плавлення при зміні рудного навантаження в різних кільцевих зонах колошника при роботі доменної печі з використанням пиловугільного палива – зміна координати лінії плавлення на одиницю зміни рудного навантаження в осьовій та приосьовій зонах в 1,7, а у проміжній та периферійній зонах – в 2,2 рази менше, ніж при роботі доменної печі без використання пиловугільного палива.

4. Вперше встановлені зв'язки величини вмісту залізовмісних компонентів шихти в кільцевих зонах печі з параметрами пластичної зони. Показано, що величина температурного інтервалу пластичної зони у будь якій кільцевій зоні печі прямо пропорційна співвідношенню кількості окатишів та агломерату у даній кільцевій зоні. Встановлено, що зміна співвідношення кількості окатишів та агломерату у кільцевій зоні печі на 0,1 обумовлює в ній зміну температурного інтервалу пластичної зони на 5 – 7 °С.

5. Для підвищення ефективності плавки запропоновано та обґрунтовано новий підхід до вибору характеристик режиму завантаження багатоконпонентної шихти, оснований на формуванні раціональних параметрів пластичної зони шляхом корегування розподілу рудних навантажень та компонентів залізорудної частини шихти в об'ємі печі.

### **Практичні результати дисертації**

Практичне значення мають розроблені новий метод визначення параметрів пластичної зони у доменній печі та спосіб обґрунтованого корегування характеристик режиму завантаження шихти, який забезпечує формування раціональних параметрів пластичної зони в доменній печі. Ці розробки можуть бути використані у технологічній практиці для вибору характеристик режиму завантаження багатоконпонентної шихти, включаючи програму розподілу порцій та параметри їх формування, які

забезпечують раціональний розподіл компонентів шихти по радіусу колошника для підвищення ефективності доменної плавки.

Для корегування та досягнення раціональних геометричних параметрів зони розм'якшення – плавлення без корегування розподілу рудного навантаження запропоноване використання зміни співвідношення основних залізовмісних компонентів – агломерату та окатишів у кільцевих зонах колошника.

Для доменних печей з різними структурами систем завантаження отримані формули для визначення уставки розташування дози компонента в об'ємі порції при заданих вмісті компонента у кільцевій зоні та вмісті його у шихті. Визначена уставка може використовуватися у якості управляючого параметру для регулювання розподілу конкретного компонента змішаної залізородної порції та направлено формування складу сумішей шихтових матеріалів у різних зонах колошника.

Практичне значення для корегування положення лінії плавлення має встановлена різниця її зміщення у різних зонах доменної печі, яке при зміні рудного навантаження на одну й ту ж величину, може відрізнятись у 3 – 5 рази: для заданої зміни вертикальної координати лінії плавлення в осьовій та приосьовій зонах потрібна, як правило, значно менша зміна рудного навантаження, ніж у проміжній та периферійній зонах, що повинно враховуватись технологом при зміні параметрів режиму завантаження.

Для застосування запропонованого способу визначення та корегування параметрів пластичної зони у сучасних технологічних умовах встановлені особливості зміни координат лінії плавлення при роботі доменної печі з використанням пиловугільного палива - зміна координати лінії плавлення на одиницю зміни рудного навантаження в осьовій та приосьовій зонах в 1,7, а у проміжній та периферійній зонах – в 2,2 рази менше, ніж при роботі доменної печі без пиловугільного палива.

Розроблені методи є складовими інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень по управлінню доменною плавкою та експертної системи вибору оптимального складу шихти, які розроблені в ІЧМ НАНУ.

Розроблені методи можуть бути реалізовані у складі АСУ ТП доменних печей, оснащених системами контролю температури газового потоку та поверхні засипу шихти на колошнику.

Подана заявка до Українського національного офісу інтелектуальної власності та інновацій на державну реєстрацію винаходу «Спосіб визначення параметрів пластичної зони у доменній печі» (заявка U 2026 00325 від 20.01.26 р.).

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані в рамках виконання науково-дослідницьких робіт та впроваджені в навчальний процес Українського державного університету науки і технологій при підготовці магістрів за спеціальністю 136-Металургія.

**Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.**

Основний зміст дисертації опубліковано в 11 наукових працях: з них 2 статті в журналах, включених до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та WoS; 4 статті у фахових виданнях, що відповідають переліку ДАК МОН України; 5 тез доповідей науково-практичних конференцій.

#### **Зауваження по дисертаційній роботі**

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. Відсутня характеристика доменної печі, для якої виконані дослідження, та завантажувального пристрою.
2. Яким чином критерій оцінки форми та положення пластичної зони, оснащеної термобалками, використовується для оцінки раціональності форми та положення пластичної зони?
3. Не зрозуміло, як враховується процес утворення сумішей цих матеріалів, а також коксу, конвертерного шлаку та ін.?

4. Як можна регулювати розподіл матеріалів шляхом уставки розташування дози цього компоненту на конвеєрі або в скіпі?

5. Стосовно розробленого способу коригування характеристик режиму завантаження шихти, який формує раціональні параметри пластичної зони в печі, слід зауважити відсутність пояснення таких термінів, як: раціональні параметри пластичної зони в печі, раціональний розподіл шихти та ін.

6. Доцільним було би навести приклади раціональної пластичної зони, розподілу шихти, а також техніко-економічні показники роботи печі з цими параметрами й запропоновані режими завантаження.

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи. В цілому робота є завершеною науковою працею, характеризується наявністю елементів наукової і технічної новизни одержаних результатів. Дисертація написана технічно грамотно. Зміст дисертації відповідає спеціальності, за якою автор захищається.

#### **Відповідність змісту дисертації спеціальності**

Дисертаційна робота Щербачова В.Р. «Вдосконалення управління завантаженням доменної печі багатокomпонентною шихтою на основі інформації про параметри пластичної зони» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 136 - «Металургія».

#### **Загальний висновок та оцінка роботи**

Дисертаційна робота Щербачова В.Р. «Вдосконалення управління завантаженням доменної печі багатокomпонентною шихтою на основі інформації про параметри пластичної зони» є завершеним науково – прикладним дослідженням, виконаним на високому науковому рівні та відповідає вимогам, передбаченим «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022 р.), положенням Вимог до оформлення дисертації (затверджених наказом Міністерства освіти і науки України №40 від 12 січня 2017 р.), а здобувач

**Щербачов Вадим Родіонович** заслуговує на присудження наукового ступеня  
доктора філософії за спеціальністю 136 – «Металургія».

Офіційний рецензент:

професор кафедри металургії чавуну і сталі

Українського державного університету

науки і технологій,

доктор технічних наук, професор

Володимир БОЧКА

Підпис Бочки В.В.



*Увій сепр*