

*Принято до розробки спеціалізованої вченої ради РнД 11856 оз. 20.12.16 р. Голова В. В. Плещу*

## ВІДГУК

Офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Грека Олександра Сергійовича

«Розробка технології одержання заліза твердофазним відновленням залізо-рудно-вугільних брикетів в умовах індукційного нагріву»,  
представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 136 – «Металургія»

### 1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми – інтенсифікації процесів прямого відновлення заліза та створенню енергоефективної технології отримання сталі з первинної рудної сировини в одному агрегаті. В умовах глобальної декарбонізації металургійної галузі та зростання вимог до зниження викидів CO<sub>2</sub> запропонований підхід має суттєве значення.

Тематика роботи відповідає сучасним тенденціям розвитку електрометалургії та спрямована на поєднання процесів відновлення і плавлення у межах одного технологічного комплексу.

Дисертаційна робота виконана в Українському державному університеті науки і технологій та спрямована на вирішення актуального науково-прикладного завдання – розроблення технології твердофазного відновлення заліза в умовах індукційного нагріву з можливістю подальшого отримання сталі в межах єдиного металургійного агрегату.

Структура дисертації є завершеною та відповідає встановленим вимогам. Робота складається зі вступу, п'яти розділів із висновками до кожного з них, загальних висновків, переліку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг становить 174 сторінки друкованого тексту, включає 39 рисунків, 23 таблиці та список літератури з 139 найменувань, розміщений на 14 сторінках. Побудова матеріалу є логічною, послідовною та структурно обґрунтованою.

У вступі аргументовано актуальність тематики дослідження, окреслено зв'язок роботи з науковими програмами університету, визначено мету й завдання, сформульовано об'єкт і предмет дослідження, наведено використані методи. Висвітлено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, подано відомості щодо апробації результатів і структури дисертації.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан і тенденції розвитку світового виробництва чавуну та сталі, охарактеризовано основні технологічні схеми металургійного виробництва. Значну увагу приділено

екологічним вимогам до галузі та їх впливу на модернізацію технологічних процесів. Проведено системний аналіз технологій прямого відновлення заліза, визначено їхні переваги й обмеження порівняно з традиційною схемою «доменна піч – кисневий конвертер». Здійснено порівняння процесів прямого відновлення на вугільній та газовій основі з урахуванням особливостей теплопередачі та кінетики реакцій. Охарактеризовано шихтові матеріали для процесів прямого відновлення та окреслено перспективні напрями їх удосконалення.

Другий розділ присвячено аналізу існуючих технологій відновлення заліза й виробництва сталі із застосуванням індукційних печей. Розглянуто принцип роботи індукційної печі та проведено її зіставлення з дуговою електросталеплавильною піччю. Обґрунтовано нову концепцію організації твердофазного відновлення в умовах індукційного нагріву. Розроблено структуру залізо-рудно-вугільного брикету з металевим ядром, визначено склад і технічні характеристики брикету, а також обґрунтовано вибір його компонентів. Проаналізовано механізм нагрівання брикету в змінному електромагнітному полі та досліджено вплив геометричних параметрів, електрофізичних властивостей складових і частоти поля на інтенсивність та рівномірність нагріву.

У третьому розділі наведено теоретичні засади та структуру математичної моделі, що описує процес індукційного нагріву металевого ядра та температурний розподіл у двошаровому залізо-рудно-вугільному брикеті. Модель враховує теплові ефекти реакцій відновлення оксидів заліза та газифікації вугілля, а також кінетичні особливості перебігу цих процесів. Подано методику розв'язання диференціальних рівнянь нестационарної теплопровідності для сферичного тіла з осьовою симетрією. Здійснено експериментальну перевірку адекватності моделі; розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними не перевищує 5–8 %. Наведено результати чисельного моделювання, на підставі яких встановлено автокаталітичний характер процесу відновлення в умовах індукційного нагріву.

Четвертий розділ присвячено дослідженню кінетики відновлення частинок залізородного концентрату в складі брикету та аналізу процесу відновлення в цілому. На основі експериментальних результатів, отриманих раніше та опублікованих у співавторстві зі здобувачем, проведено оцінку фізико-хімічного впливу змінного електромагнітного поля на швидкість і механізм відновлення оксидів заліза. Розвинено теоретичні положення щодо механізмів інтенсифікації процесу в умовах електромагнітного впливу.

вуглецевого відновлення. Визначено залежності швидкості відновлення оксидів заліза від частоти та щільності електромагнітного поля та виявлено механізми прискорення відновлення по схемі  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$  в присутності електромагнітного поля, пов'язані з посиленням теплових та дифузійних процесів. Експериментально доведено внесок електромагнітних впливів в інтенсифікацію процесів водневого, вуглецевого і комплексного відновлення.

3. Вперше запропоновано та науково обґрунтовано концепцію використання індукційної печі як єдиного агрегату для твердофазного відновлення та виплавки сталі з первинної залізвмісної шихти з метою скорочення споживання коксу, зниження емісії  $\text{CO}_2$ , підвищення ефективності одержання заліза з первородної сировини.

### 3. Практичні результати дисертації

Розроблено новий тип залізо-рудно-вугільних брикетів з металізованим ядром, які забезпечують ефективний об'ємний нагрів в умовах дії змінного електромагнітного поля, інтенсифікують процеси газифікації вуглецю та відновлення оксидів заліза, дозволяють істотно підвищити швидкість відновлення в порівнянні з традиційними схемами нагрівання газами, забезпечують отримання високо металізованого продукту, придатного для прямого виплавляння сталі. Розроблений новий матеріал рекомендується до використання у промислових технологіях прямого відновлення заліза, а також в малих металургійних агрегатах.

Розроблено та обґрунтовано технологічну схему отримання відновленого заліза та виплавки сталі в індукційній печі, яка об'єднує процеси нагрівання, твердофазного відновлення та плавлення в одному агрегаті, виключає необхідність доменних, коксохімічних та газових реформінгових установок, дозволяє відмовитися від рідкого чавуну як обов'язкової складової шихти сталеплавильних агрегатів, знижує енерговитрати та підвищує екологічність металургійного виробництва, що є особливо перспективним для міні-металургійних заводів.

Встановлено режими індукційного нагрівання, що забезпечують високий ступінь відновлення оксидів заліза, визначено частоти, потужності та швидкості нагрівання, що забезпечують інтенсивне відновлення, розроблено рекомендації щодо вибору розмірів металевих частинок і складу рудно-вугільної суміші, ці режими рекомендуються до використання для налаштування експериментальних і промислових установок.

Отримані експериментальні результати рекомендовано до застосування при розробці екологічних («зелених») технологій отримання сталі, оскільки технологія дозволяє реалізувати відновлення оксидів заліза воднем,

вуглецевого відновлення. Визначено залежності швидкості відновлення оксидів заліза від частоти та щільності електромагнітного поля та виявлено механізми прискорення відновлення по схемі  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$  в присутності електромагнітного поля, пов'язані з посиленням теплових та дифузійних процесів. Експериментально доведено внесок електромагнітних впливів в інтенсифікацію процесів водневого, вуглецевого і комплексного відновлення.

3. Вперше запропоновано та науково обгрунтовано концепцію використання індукційної печі як єдиного агрегату для твердофазного відновлення та виплавки сталі з первинної залізовмісної шихти з метою скорочення споживання коксу, зниження емісії  $\text{CO}_2$ , підвищення ефективності одержання заліза з первородної сировини.

### **3. Практичні результати дисертації**

Розроблено новий тип залізо-рудно-вугільних брикетів з металізованим ядром, які забезпечують ефективний об'ємний нагрів в умовах дії змінного електромагнітного поля, інтенсифікують процеси газифікації вуглецю та відновлення оксидів заліза, дозволяють істотно підвищити швидкість відновлення в порівнянні з традиційними схемами нагрівання газами, забезпечують отримання високо металізованого продукту, придатного для прямого виплавляння сталі. Розроблений новий матеріал рекомендується до використання у промислових технологіях прямого відновлення заліза, а також в малих металургійних агрегатах.

Розроблено та обгрунтовано технологічну схему отримання відновленого заліза та виплавки сталі в індукційній печі, яка об'єднує процеси нагрівання, твердофазного відновлення та плавлення в одному агрегаті, виключає необхідність доменних, коксохімічних та газових реформінгових установок, дозволяє відмовитися від рідкого чавуну як обов'язкової складової шихти сталеплавильних агрегатів, знижує енерговитрати та підвищує екологічність металургійного виробництва, що є особливо перспективним для міні-металургійних заводів.

Встановлено режими індукційного нагрівання, що забезпечують високий ступінь відновлення оксидів заліза, визначено частоти, потужності та швидкості нагрівання, що забезпечують інтенсивне відновлення, розроблено рекомендації щодо вибору розмірів металевих частинок і складу рудно-вугільної суміші, ці режими рекомендуються до використання для налаштування експериментальних і промислових установок.

Отримані експериментальні результати рекомендовано до застосування при розробці екологічних («зелених») технологій отримання сталі, оскільки технологія дозволяє реалізувати відновлення оксидів заліза воднем,

індукційний нагрів дозволяє ефективно заміщувати вуглецеві джерела енергії у процесах прямого відновлення та інших металургійних процесах, поєднаний процес знижує кількість технологічних стадій і супутніх викидів.

Розроблені технічні рішення і експериментально підтверджені принципи роботи залізо-рудно-вугільних брикетів в умовах індукційного нагріву рекомендується використовувати для створення пілотних і промислових установок прямого відновлення, проектування нових металургійних агрегатів для малих підприємств, в освітніх і дослідницьких цілях при вивченні сучасних способів отримання заліза і сталі.

#### **4. Зауваження до дисертаційної роботи**

1. Математична модель нагріву брикету побудована за низкою припущень (однорідність середовища, ізотропність властивостей), однак не наведено оцінки впливу цих припущень на кінцевий результат.

2. Не проведено повного аналізу впливу електромагнітного поля в об'ємі індуктора з урахуванням взаємодії декількох брикетів, що є принциповим для шахтної схеми агрегату.

3. Питання стійкості процесу при нерівномірному завантаженні печі або зміні складу шихти залишилось поза детальним розглядом.

4. Недостатньо досліджено можливість локального перегріву металевого ядра та пов'язаних із цим структурних змін матеріалу.

5. У роботі не наведено порівняння отриманих кінетичних параметрів із відомими літературними даними для карботермічного відновлення, що ускладнює кількісну оцінку ефекту інтенсифікації.

6. Відсутній аналіз впливу масштабного фактору на глибину проникнення струмів Фуко та розподіл температури при збільшенні діаметра брикету.

В той же час, перелічені зауваження не мають принципового характеру і не впливають на, в цілому, позитивну оцінку дисертаційної роботи.

#### **5. Відповідність змісту дисертації спеціальності**

Дисертаційна робота Грека О. С. «Розробка технології одержання заліза твердофазним відновленням залізо-рудно-вугільних брикетів в умовах індукційного нагріву» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 136 – «Металургія».

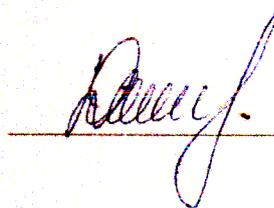
#### **6. Загальний висновок та оцінка роботи**

Дисертаційна робота Грека О. С. на тему «Розробка технології одержання заліза твердофазним відновленням залізо-рудно-вугільних брикетів в умовах індукційного нагріву» 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 2022р.), положенням Вимог до оформлення дисертації (затверджених наказом Міністерства освіти і науки України №40 від 12 січня 2017р.), а здобувач Грек Олександр Сергійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 – «Металургія».

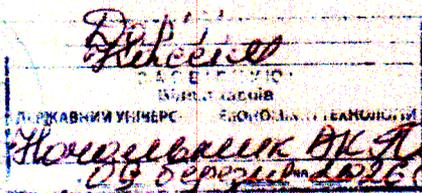
Офіційний опонент:

Завідувач кафедри металургійних технологій  
Державного університету економіки і технологій  
доктор технічних наук, професор



Дар'я КАССИМ

Підпис д.т.н. проф. Кассім Д.А. засвідчую:



Олександр Сергійович Грек