

## Рецензія

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 за спеціальністю 136 – «Металургія»

### Оцінка структури змісту дисертації

Дисертаційна робота виконана в Українському державному університеті науки і технологій та присвячена вирішенню актуального науково-прикладного завдання — розробці технології твердофазного відновлення заліза в умовах індукційного нагріву з подальшим отриманням сталі в одному металургійному агрегаті.

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів з висновками по розділу, загальних висновків, переліку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 174 сторінки машинописного тексту, у тому числі 39 рисунків, 23 таблиці та список літератури з 139 найменувань на 14 сторінках. Структура роботи є логічною та повністю відповідає вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

### Вступ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, надано інформацію щодо зв'язку роботи з науковими програмами університету, сформульовано 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.

### Перший розділ

У розділі розглянуто тенденції світового виробництва чавуну та сталі, наведено основні технологічні маршрути металургійного виробництва, показані сучасні

екологічні вимоги та їх вплив на розвиток металургійної галузі. Виконано аналіз технологій прямого відновлення заліза та показано їхні технологічні переваги та обмеження у порівнянні до технологічних маршрутів «Домена піч – Кисневий конвертер», а також порівняння технологій прямого відновлення на основі вугілля та на основі газу між собою. пов'язані з теплопередачею та кінетикою відновлення. Наведено порівняння основних матеріалів для процесів прямого відновлення та зроблено висновки про подальші можливі шляхи покращення технологій прямого відновлення.

### **Другий розділ**

У розділі розглянуто існуючі процеси відновлення заліза та отримання сталі з використанням індукційних печей. Наведено опис роботи та порівняння індукційної печі та ДЕСП. Запропоновано нову концепцію організації процесу твердофазного відновлення в індукційній печі. Розроблено склад залізо-рудно-вугільного брикету з металевим ядром, визначено та обґрунтовано вибір складових брикету та його характеристики.

Розглянуто механізм нагріву залізо-рудно-вугільного брикету в індукційному полі. Проаналізовано вплив геометричних та електрофізичних параметрів складових брикету та частоти електромагнітного поля індукційної печі на ефективність нагрівання брикету в індукційному полі.

### **Третій розділ**

У розділі наведено основні складові математичної моделі що відображає процеси індукційного нагріву металеві складові залізо-рудно-вугільного брикету розподіл теплоти всередині як металеві складові так і шару рудно-вугільної суміші брикету, враховує теплові ефекти хімічних реакцій відновлення заліза з оксидів та газифікації вугілля та кінетику реакцій відновлення. Наведено методи вирішення диференціальних рівнянь нестационарної теплопровідності у сферичному тілі з осьовою симетрією та 2 шарами.

Проведено перевірку математичної моделі на експериментальних даних. Похибка розрахунків не перевищує 5–8 %, що підтверджує адекватність моделі. Наведено результати математичного моделювання процесів нагріву та відновлення залізо-рудно-вугільного брикету.

На основі результатів чисельного моделювання зроблено висновок про автокаталітичність процесу відновлення залізо-рудно-вугільних брикетів в умовах індукційного нагріву.

#### **Четвертий розділ**

Розділ присвячений аналізу кінетичної моделі відновлення частинок залізородного концентрату у складі залізо-рудно-вугільного брикету та брикету в цілому. На основі даних експериментальних досліджень раніше опублікованих у співавторстві зі здобувачем, в роботі проведено аналіз фізико-хімічного впливу змінного електромагнітного поля на кінетику відновлення оксидів заліза. Розвинуто теоретичні уявлення щодо механізмів інтенсифікації процесу.

#### **П'ятий розділ**

У розділі наведено опис лабораторних досліджень та результати аналізу експериментальних даних для різних форм залізородного матеріалу. Послідовно проаналізована ефективність нагріву та відновлення дрібнодисперсного залізородного матеріалу у формі щільного шару, брикетів із додаванням дрібнодисперсної металеві складової та брикетів з металевим ядром.

Досліджено вплив зниженого тиску на кінетику та ступінь відновлення залізо-рудно-вугільних брикетів в умовах індукційного нагріву. Наведено технологічні рішення для підвищення ефективності процесів газового твердофазного відновлення заліза з оксидів з використанням індукційного нагріву та залізо-рудно-вугільних брикетів.

Наведено технологічне рішення для процесу отримання сталі з первинної рудної сировини у формі залізо-рудно-вугільних брикетів в універсальному металургійному агрегаті шахтного типу та індукційні печі.

## **Загальні висновки**

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. Висновки відповідають поставленим завданням та логічно узагальнюють отримані результати.

## **Перелік посилань**

Посилання які були використані здобувачем в аналітичному огляді завдання, достатньо повно охоплюють зазначену галузь знань та відображають основні напрями розвитку досліджень та технології твердофазного відновлення заліза з оксидів.

## **Оцінка оформлення, мови і стилю дисертації.**

Матеріали дисертації викладені послідовно, а їх оформлення відповідає вимогам щодо дисертацій на присвоєння вченого звання 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**

1. Вперше встановлено та підтверджено результатами математичного моделювання закономірності нагрівання залізо-рудно-вугільного брикету під впливом змінного електромагнітного поля, та показано механізм об'ємного нагріву рудно-вугільної суміші за рахунок локалізованого нагрівання металевих частинок вихровими струмами; розподіл температур у металевому ядрі сферичної форми у складі залізо-рудно-вугільного окатишу відповідно до частоти змінного електромагнітного поля, на основі чого встановлено критерії вибору розмірів металевих частинок і параметрів індукційного нагріву для забезпечення максимальної інтенсивності процесу. Таких даних раніше не було відомо.

2. Дістали подальшого розвитку теоретичні уявлення щодо впливу параметрів електромагнітного поля на кінетику твердофазних відновлювальних процесів у діапазоні частот 0,05-50 кГц для газового та вуглецевого відновлення та визначено залежності швидкості відновлення оксидів заліза від частоти та щільності електромагнітного поля та виявлено механізми прискорення відновлення  $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$  в присутності електромагнітного поля, пов'язані з посиленням теплових та дифузійних процесів та було 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 залізовмісної шихти з метою скорочення споживання коксу, зниження емісії  $CO_2$ , підвищення ефективності одержання заліза з первородної сировини.

Отримані результати розширюють теоретичні уявлення про твердофазне відновлення оксидів заліза в умовах електромагнітного впливу.

### **Практичні результати дисертації**

1. 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 які рекомендується до використання у промислових технологіях прямого відновлення заліза, а також в малих металургійних агрегатах.

2. 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.

3. 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.

4. 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 замінювати вуглецеві джерела енергії у процесах прямого відновлення та інших металургійних процесах, поєднаний процес знижує кількість технологічних стадій і супутніх викидів.

5. 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.

Результати можуть бути використані при створенні пілотних та міні-металургійних агрегатів.

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

Основний зміст дисертації опубліковано в 11 наукових працях: з них 1 стаття в журналі, включеному до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та WoS;

3 статті у фахових виданнях, що відповідають переліку ДАК МОН України; 6 тез доповідей науково-практичних конференцій; 1 методичні вказівки.

### **Зауваження до дисертаційної роботи**

1. Потребує розширення техніко-економічне порівняння запропонованого технологічного рішення з існуючими процесами прямого відновлення заліза (MIDREX, HYL, SL/RN тощо).
2. Доцільно було б більш ґрунтовно розглянути питання енергоефективності процесу з урахуванням реального ККД індукційних установок.
3. У дисертації відсутній повноцінний аналіз теплового балансу агрегату з урахуванням усіх джерел втрат теплоти (випромінювання, конвекція, теплопровідність футерівки), що ускладнює оцінку реальної енергоефективності процесу.
4. Потребує додаткового пояснення вплив пористості брикетів на рівномірність розподілу температури та ступеню відновлення заліза в об'ємі.

Однак, наведені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки роботи.

### **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».

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

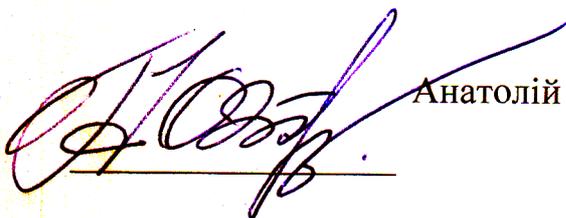
Дисертаційна робота Грека О. С. на тему «Розробка технології одержання заліза твердофазним відновленням залізо-рудно-вугільних брикетів в умовах індукційного нагріву» є завершеним науково – прикладним дослідженням, виконаним на високому науковому рівні та відповідає вимогам, передбаченим «Порядку присудження 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 рецензент:

професор кафедри електрометалургії  
ім. акад. М. І. Гасика Українського  
державного університету науки і  
технологій

доктор технічних наук, професор



Анатолій ОВЧАРУК

Підпис Овчарука А.М. ЗАСВІДЧУЮ



Металургічний відділу кадрів

В.С. Шифрін