

Принято до розробки  
ради PhD 11856 02.03.2026р.  
Голова Вченої  
Учасник ВЛ.

## 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 важливої та своєчасної науково-прикладної проблеми — підвищенню ефективності процесів прямого відновлення заліза та розробленню енергоощадної технології одержання сталі з первинної рудної сировини в межах одного металургійного агрегату. В умовах глобальної трансформації металургійної галузі, спрямованої на зниження вуглецевого сліду виробництва, декарбонізацію технологічних процесів та скорочення питомих викидів CO<sub>2</sub>, дослідження у цьому напрямі мають безперечну наукову й практичну значущість.

Запропонований у роботі підхід, що передбачає поєднання процесів твердофазного відновлення та подальшого плавлення в індукційному агрегаті, відповідає сучасним тенденціям розвитку електрометалургії та концепції інтегрованих енергоефективних виробництв. Реалізація такого технологічного рішення створює передумови для скорочення кількості стадій металургійного переділу, оптимізації енергоспоживання та підвищення екологічної безпеки виробництва.

Дисертаційна робота виконана в Українському державному університеті науки і технологій у межах наукових напрямів кафедри та університетських програм, що підтверджує її відповідність пріоритетним завданням розвитку галузевої науки.

Структура дисертації є цілісною та відповідає встановленим нормативним вимогам до робіт на здобуття ступеня доктора філософії. Робота складається зі вступу, п'яти розділів із висновками до кожного з них, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг становить 174 сторінки друкованого тексту, включає 39 рисунків, 23 таблиці та перелік літературних джерел із 139 найменувань, поданий на 14 сторінках. Виклад матеріалу є логічно послідовним, структурно виваженим і науково аргументованим.

У вступі належним чином обґрунтовано актуальність теми, визначено мету та завдання дослідження, окреслено об'єкт і предмет роботи, наведено застосовані методи теоретичного та експериментального аналізу. Чітко

сформульовано положення наукової новизни та практичного значення отриманих результатів, висвітлено особистий внесок здобувача, наведено відомості щодо апробації результатів на наукових конференціях і в публікаціях.

У першому розділі здійснено ґрунтовний аналіз сучасного стану світового виробництва чавуну та сталі, охарактеризовано основні технологічні маршрути металургійного виробництва. Значну увагу приділено екологічним викликам, що стоять перед галуззю, та їх впливу на модернізацію існуючих технологій. Виконано систематизований огляд процесів прямого відновлення заліза, визначено їхні технологічні переваги й обмеження порівняно з традиційною схемою «доменна піч – кисневий конвертер». Проведено порівняльний аналіз вугільних і газових технологій прямого відновлення з урахуванням особливостей тепломасообміну та кінетики відновлювальних реакцій. Розглянуто характеристики шихтових матеріалів і окреслено можливі напрями вдосконалення відповідних процесів.

Другий розділ присвячено аналізу сучасних технологій відновлення заліза й виробництва сталі із застосуванням індукційних печей. Розглянуто принцип роботи індукційної печі та здійснено її порівняння з дуговою електросталеплавильною піччю за основними технологічними показниками. Обґрунтовано нову концепцію організації твердофазного відновлення в умовах індукційного нагріву. Розроблено конструкцію залізо-рудно-вугільного брикету з металевим ядром, визначено його склад, фізико-хімічні та конструктивні характеристики. Детально проаналізовано механізм нагрівання брикету в змінному електромагнітному полі, а також вплив геометричних параметрів, електрофізичних властивостей компонентів і частоти поля на ефективність та рівномірність нагріву.

У третьому розділі викладено теоретичні основи та структуру математичної моделі, яка описує процес індукційного нагріву металевого ядра та розподіл температури у двошаровому брикеті. Модель враховує теплові ефекти реакцій відновлення оксидів заліза й газифікації вугілля, а також кінетичні закономірності перебігу відновлювальних процесів. Наведено методику розв'язання задачі нестационарної теплопровідності для сферичного тіла з осью симетрії. Проведено експериментальну верифікацію моделі; розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними не перевищує 5–8 %, що свідчить про її адекватність. За результатами чисельного моделювання встановлено автокаталітичний характер процесу відновлення в умовах індукційного нагріву.

Четвертий розділ присвячено дослідженню кінетики відновлення частинок залізородного концентрату в складі брикету та аналізу процесу в

цілому. На основі експериментальних результатів, отриманих у попередніх дослідженнях і опублікованих у співавторстві зі здобувачем, проведено оцінку впливу змінного електромагнітного поля на швидкість і механізм відновлення оксидів заліза. Розвинено теоретичні уявлення щодо механізмів інтенсифікації процесу під дією електромагнітного впливу.

У п'ятому розділі наведено методика та результати лабораторних досліджень різних форм залізорудної сировини. Проаналізовано ефективність нагрівання та відновлення матеріалу у вигляді щільного шару, брикетів із металевими добавками та брикетів із металевим ядром. Досліджено вплив зниженого тиску на кінетику процесу та ступінь металізації. Запропоновано технологічні рішення для підвищення ефективності газового твердофазного відновлення з використанням індукційного нагріву. Обґрунтовано можливість реалізації процесу одержання сталі з первинної рудної сировини у формі брикетів в універсальному агрегаті шахтного типу та в індукційній печі.

У загальних висновках систематизовано основні наукові та практичні результати дослідження, які забезпечили досягнення поставленої мети та виконання визначених завдань. Висновки є логічно узгодженими зі змістом роботи та підтверджуються отриманими результатами.

Перелік використаних джерел достатньо повно відображає сучасний стан досліджень у галузі твердофазного відновлення заліза та свідчить про глибоку обізнаність здобувача з вітчизняними та зарубіжними науковими розробками.

Оцінка оформлення, мови та стилю

Дисертація відзначається чіткою структурою, послідовністю викладу матеріалу та належним рівнем наукової аргументації. Оформлення роботи відповідає чинним нормативним вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії. Мова викладу є науково коректною, термінологічно точною та забезпечує належний рівень сприйняття представлених результатів і висновків.

## **2. 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.

### **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, які 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, 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 підтвержені 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. Потребує більш переконливого обґрунтування твердження про автокаталітичний характер нагріву в міру зростання ступеня металізації.
2. Не розглянуто можливість виникнення термомеханічних напружень у брикеті внаслідок градієнтів температур.
3. У роботі відсутній розрахунок ресурсу індуктора та футерівки в умовах тривалої експлуатації.
4. Не проведено оцінки впливу магнітних властивостей заліза при переході через температуру Кюрі на характер нагріву.
5. Недостатньо проаналізовано можливість вторинного окиснення металізованого продукту при контакті з газовою фазою.
6. У дисертації не наведено розгорнутого аналізу складу та фазового стану кінцевого металопродукту (мікроструктура, вміст домішок, включення).
7. Потребує додаткового обґрунтування запропонована ідея поєднання процесів відновлення та плавлення в одному агрегаті з точки зору регулювання вуглецевого балансу сталі.
8. У роботі відсутній комплексний аналіз ризиків впровадження технології в умовах існуючих електрометалургійних підприємств.

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

#### **5. Висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам.**

В цілому дисертаційна робота Грека Олександра Сергійовича є закінченою науковою працею, у якій отримані науково обґрунтовані теоретичні

і практичні результати, що у сукупності сприяють вирішенню науково технічної задачі розробки нової технології одержання заліза твердофазним відновлення з використанням індукційного нагріву та нових шихтових матеріалів у вигляді залізо-рудно-вугільних брикетів.

Наукова новизна та практичні результати, які винесені на захист, відповідають темі та меті дисертаційної роботи, а сама дисертація виконана на достатньо високому науково-технічному рівні. Текст дисертації викладений з використанням сучасної науково-технічної термінології. Результати досліджень в достатній мірі проілюстровані та доповнені таблицями. Основні положення дисертаційної роботи представлені в публікаціях автора.

За об'єктом і предметом дослідження, характером та рівнем вирішених задач, отриманими результатами дисертаційна робота відповідає вимогам ДАК МОН України, що пред'являють до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Вважаю, що за науковим рівнем, новизною одержаних результатів, їх теоретичній і практичній значимості, обсягом виконаних досліджень та публікацій дисертаційна робота відповідає вимогам, передбаченим у «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:

Провідний науковий співробітник  
відділу металургії чавуну Інститут  
чорної металургії ім. З.І. Некрасова  
НАН України

доктор технічних наук, професор



Ірина МУРАВЬОВА

Підпис д.т.н. проф. Мурав'йової І. Ф. засвідчую:

Учений секретар ІЧМ  
Некрасова НАН України,



Лариса ГАРМАШ