

## ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

**Бєлих Дмитра Геннадійовича**

**«Моделювання фазових перетворень у маловуглецевих сталях та рідинах поблизу точки кристалізації»,**

яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

з галузі знань 10 – Природничі науки

за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали

### **1. Оцінка роботи здобувача у процесі підготовки дисертації і виконання індивідуального плану навчальної та наукової роботи.**

Аспірант Бєлих Дмитро Геннадійович виконав у повному обсязі Індивідуальний план виконання освітньо-наукової програми підготовки доктора філософії. Освітня програма в обсязі 40 кредитів ECTS виконана у повному об'ємі. Він успішно склав наступні дисципліни:

- залік з навчальної дисципліни «Іноземна мова для аспірантів»;
- залік з навчальної дисципліни «Філософські засади та методологія наукових досліджень»;
- залік з навчальної дисципліни «Підготовка наукових публікацій та презентація результатів досліджень»;
- залік з навчальної дисципліни «Інформаційні технології у прикладній фізиці»;
- залік з навчальної дисципліни «Актуальні проблеми сучасної прикладної фізики та наноматеріалів»;
- іспит з навчальної дисципліни «Іноземна мова для аспірантів»;
- складено залік з навчальної дисципліни «Новітні технології обробки даних у фізиці»;
- іспит з навчальної дисципліни «Актуальні проблеми сучасної прикладної фізики та наноматеріалів»;

– іспит з навчальної дисципліни «Новітні технології обробки даних у фізиці».

Всі заплановані види робіт були виконані своєчасно. Здобувач плідно співпрацював з науковими керівниками протягом усього терміну навчання в аспірантурі.

## **2. Обґрунтування вибору теми дослідження.**

У сучасний період практично в усіх галузях промисловості широко застосовуються різноманітні сталеві вироби і конструкції. Один із важливих чинників, що обумовлює вибір сталі як основного матеріалу для виготовлення деталей, полягає у найкращому поєднанні технологічних властивостей, таких як міцність, зносостійкість, надійність і довговічність. Додатково, велика різноманітність сталевих сплавів і низька собівартість залізної руди надають цьому матеріалу величезну перевагу у різних сферах застосування.

З метою поліпшення механічних характеристик сталевих виробів, їх піддають процесам легування і попередньої обробки. Ці процеси проводяться за різними методами, залежно від конкретних умов експлуатації та вимог до властивостей сталі.

Термічна обробка металевих виробів є надзвичайно складним технологічним процесом, який включає нагрівання металу (сплаву) до певної температури, утримання при цій температурі впродовж визначеного часу і подальше охолодження. Цей процес спрямований на отримання необхідної мікроструктури та відповідних властивостей виробу для його подальшого використання в конкретних умовах.

Величезна різноманітність металевих сплавів робить завдання термообробки надзвичайно індивідуальним процесом. Це передбачає детальний аналіз і підбір температурних режимів, методів нагрівання і охолодження, а також часу витримки, залежно від конкретного хімічного складу матеріалу.

Параметри термообробки сталі визначаються відсотковим вмістом вуглецю в сплаві та присутністю різних легуючих елементів. Ці компоненти

мають значний вплив на тугоплавкість металу, його крихкість та інші механічні характеристики.

Окрім цього, слід зазначити, що сталі з вмістом вуглецю більше 6.67 % є нестійкими і надзвичайно крихкими, тому не знаходять застосування в промисловості. Сплави з вмістом вуглецю від 2 до 6.67 % відомі як чавуни. Вони відрізняються своїми фізичними і механічними характеристиками, які значно відрізняються від властивостей сталі, і тому займають особливу нішу в промисловому виробництві.

Сталі з вмістом вуглецю менше 2% є стійкими і використовуються для виготовлення конструкційних матеріалів, які повинні витримувати високі механічні, теплові та радіаційні напруження. Тому саме аналіз фазових перетворень мало вуглецевих сталей є дуже цікавим в практичному застосуванні.

Оскільки властивості сталі безпосередньо залежать від її мікроструктури і співвідношення фаз, потрібне точне розуміння внутрішніх процесів, що відбуваються в матеріалі при його технологічному нагріві і охолодженні. Передусім слід звернути увагу на мікроструктуру сталі в рівноважному стані, зокрема, на будову кристалічної решітки, яка значною мірою визначає механічні властивості сплаву.

Розв'язок ЗС, як прикладу фазового перетворення в кристалічних середовищах, зіштовхується з численними труднощами через складність та різноманіття аспектів фазових переходів в різних системах. По-перше, багато систем, які піддаються фазовим переходам, можуть бути неоднорідними та складними, що ускладнює процес математичного моделювання та знаходження рішення. Динамічний характер фазових переходів і можливі зміни параметрів середовища додають складності розв'язанню задачі.

Важливим викликом є також врахування взаємодії різних фаз у складних системах та розгляд явищ, таких як інтерфейсні ефекти та міжфазні переходи. Термодинамічні обмеження, які виникають у зв'язку зі змінами тиску та температури, додають додатковий рівень труднощів.



Виділення або поглиблення тепла під час фазових переходів вносить свої корективи в теплові потоки, а також може впливати на розподіл температур. Отримання експериментальних даних для валідації розрахунків стає важливою задачею, і це часто може бути викликом через складність самого процесу.

У деяких випадках система може знаходитися в різних фазах одночасно, що додає ще більше комплексності до проблеми.

У зв'язку з відсутністю адекватних моделей опису фазових перетворень в кристалічних середовищах, загальною проблемою є пошук більш ефективних методів моделювання та розв'язку таких процесів.

Вибір теми дисертації «Моделювання фазових перетворень у маловуглецевих сталях та рідинах поблизу точки кристалізації» обумовлений, в першу чергу, через великий практичний інтерес до нових матеріалів у різних галузях промисловості, а також через недосконалість існуючих теорій.

**Мета і завдання дослідження.** Розробка теорій, які адекватно описують експериментальні результати фазових перетворень в кристалічних середовищах при зміні температури.

Існуючі розбіжності теоретичного опису прямих мартенситних перетворень і експериментальних даних, також розбіжності опису задачі з межою кристалізації, що рухається, вимагають продовження пошуку теорій, які більш адекватно описують фазові перетворення в кристалічних середовищах.

#### **Об'єкт та предмет дослідження.**

Об'єктом дослідження є процес кристалізації в твердих тілах при зміні температури.

Предмет дослідження є фізична модель опису процесів кристалізації в твердих тілах при зміні зовнішньої температури.

#### **Методи дослідження.**

1. Аналіз відомих теорій з опису прямих мартенситних перетворень, пошук розбіжностей з даними попередніх експериментів.

2. Розробка нової аналітичної моделі для розрахунків прямих мартенситних перетворень у вуглецевих сталях.

3. Застосування моделі для опису прямих мартенситних перетворень вуглецевих сталей, а потім випробування моделі для марганцевих сталей і порівняння отриманих результатів з експериментами.

4. Аналіз ЗС, як приклад крайової задачі, що описує міжфазний перехід з рухомим міжфазним кордоном.

### **3. Особистий внесок дисертанта в отриманні наукових результатів та їх новизна.**

Особистий внесок дисертанта в отриманні наукових результатів та їх новизна полягає у наступному:

1. Вперше розроблено аналітичну модель прямих мартенситних перетворень, засновану на дворівневій системі А.Ейнштейна, що дає наближений до експериментальних даних результат.

2. Вперше враховано ймовірність спонтанного переходу індукованих частинок.

3. Вперше було розглянуто модель для опису фазових перетворень вуглецевих сталей, а саме нікелевих і марганцевих, що показали гарну кількісну відповідність.

4. Вперше аналітична модель опису мартенситних перетворень дає відповідність експериментальним даним для високих і низьких температур.

5. Вперше запропонована модифікована умова ЗС, що отримана з рівняння зміни концентрації фаз одновимірної двофазної ЗС методом інтегрування за тонким перехідним шаром.

6. Вперше проведене порівняння теоретичного розгляду ЗС з використанням нового підходу в описі руху міжфазного кордону з експериментальними даними, вказує на справедливість запропонованого способу одержання умови ЗС.

### **4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.**

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів, одержаних Белих Д.Г., при проведенні досліджень за темою дисертаційної роботи, забезпечується використанням фундаментальних підходів і методів обчислювальної і математичної фізики. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані в індексованих наукових журналах. Висновки дисертаційної роботи є обґрунтованими.

## **5. Наукове, теоретичне та практичне значення результатів дисертації.**

Моделювання мартенситних перетворень у вуглецевих сталях важливе для розуміння їх структурних та механічних властивостей. Подальше дослідження може включати у себе вдосконалені методи моделювання, використання нових матеріалів для створення більш точних моделей, або розширення діапазону умов, які можуть бути враховані в моделях.

Вивчення мартенситних перетворень має ключове значення у різних галузях, включаючи матеріалознавство та металургію, де воно сприяє розробці нових матеріалів та оптимізації процесів термічної обробки. У сферах автомобільної та авіаційної промисловості, вивчення цих перетворень важливе для створення легких, але міцних матеріалів. Також воно знаходить застосування в енергетичній галузі для виробництва матеріалів, які можуть витримувати високі температури. У мікроелектроніці вивчення мартенситних перетворень може впливати на розробку матеріалів для елементів пам'яті. Деякі біоматеріали також піддаються цим перетворенням, знаходячи застосування у медичних імплантах та пристроях. У цій області існує потенціал для подальших досліджень та розвитку нових матеріалів і технологій для різних індустріальних секторів.

ЗС моделює фазовий перехід на рухомій межфазній межі і відіграє важливу роль у різних галузях знань. Її застосування включає такі галузі знань, як матеріалознавство, металургія, геофізика, енергетика, медична діагностика, метеорологія, біологія та хімія. Математичне моделювання процесів фазових переходів допомагає розв'язувати завдання у технологічних, медичних та



природничих науках, полегшуючи розуміння, оптимізацію та прогнозування цих процесів.

#### **6. Повнота викладення матеріалів дисертації в роботах, опублікованих автором.**

Матеріали дисертаційної роботи опубліковано в 3 наукових працях, серед яких 2 публікації у міжнародних виданнях, які входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science, 1 публікація у науковому виданні, включеному на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України:

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

*Публікації у наукових фахових виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз Scopus або Web of Science:*

1. Bielykh D.G., Skoromnaya S.F., Tkachenko V.I. DIRECT MARTENSITIC TRANSFORMATIONS OF LOW-CARBON STEELS// Problems of Atomic Science and Technology. 2023. No. 2. P. 37-41. (Scopus, Web of Science)

2. Bielykh D.G., Skoromnaya S.F., Tkachenko V.I. MODIFIED STEFAN CONDITION IN STEFAN PROBLEM// Problems of Atomic Science and Technology. 2023. No. 5. P. 21-26 (Scopus, Web of Science)

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

3. Белих Д.Г., Скоромна С.Ф., Ткаченко В.І. Прямі мартенситні перетворення вуглецевих сталей // Вісник херсонського національного технічного університету №3 том 2, 2018 р., Херсон, 2018. С. 177-182.

Результати дисертаційної роботи повністю відображено в публікаціях.

#### **7. Дотримання академічної доброчесності.**

На підставі вивчення тексту дисертації здобувача, наукових праць здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет-системі Strikeplagiarism.com) встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно,

текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності.

#### **8. Оцінка структури, мови та стилю дисертації.**

Матеріал дисертації викладено в логічній послідовності та доступно для сприйняття. Дисертація написана науковим стилем мовлення, структура дисертації відповідає алгоритму здійсненого автором дослідження. Зміст, структура, оформлення дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44), наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

#### **9. Відповідність змісту дисертації спеціальності, за якою вона подається до захисту.**

За своїм фаховим спрямуванням, науковою новизною і практичною значимістю дисертаційна робота Белих Д.Г. «Моделювання фазових перетворень у маловуглецевих сталях та рідинах поблизу точки кристалізації» повністю відповідає паспорту спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали». Здобувачем повністю виконано освітню та наукову складову третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти.

#### **10. Результати обговорення та проведення презентації. Рекомендація дисертації до захисту.**

Здобувач представив основні результати своєї дисертаційної роботи на розширеному засіданні кафедри нетрадиційних енерготехнологій та екології навчально-наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна щодо попередньої експертизи дисертації (Витяг з протоколу № 6/24 розширеного засідання



кафедри нетрадиційних енерготехнологій та екології від 10.06.2024 р.) у формі презентації та наукової дискусії після її завершення. На даному засіданні були присутні 10 співробітників із різних наукових та навчальних установ України, із яких 6 докторів наук та 4 кандидата наук. Дисертанту було задано 10 запитань, на які він надав вичерпні відповіді. Також виступили 4 науковця, які позитивно відізнались про дисертаційне дослідження Белих Д.Г.

У рамках цього розширеного засідання було ухвалено одногосно (10 голосів) рекомендувати дисертаційну роботу аспіранта Белих Дмитра Геннадійовича «Моделювання фазових перетворень у маловуглецевих сталях та рідинах поблизу точки кристалізації» до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

Кандидат фізико-математичних наук,  
доцент, завідувач кафедри кафедри  
нетрадиційних енерготехнологій та  
екології Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна

 Олександр КУЛИК