

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Щерецького Володимира Олександровича
**«Теоретичні та прикладні основи використання дисперсних частинок
для керування структурою та властивостями сплавів і композиційних
матеріалів»,**

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.16.04 – Ливарне виробництво

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Сучасний етап розвитку ливарного виробництва та металургії в цілому характеризується жорсткими вимогами до якості виливків, що працюють в екстремальних умовах. Традиційні методи оброблення розплавів та класичне легування поступово досягають своєї технологічної межі. Використання стандартних лігатур на основі Ti, Zr, Sc для подрібнення зерна, хоча і є базовим інструментом, часто супроводжується низкою дефектів: утворення зональної ліквідації, пористість та формування грубих інтерметалідів, що знижують пластичність та втомну міцність великогабаритних виливків.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю переходу від традиційного об'ємного легування до спрямованого керування структуроутворенням за допомогою дисперсних частинок (екзогенних та ендогенних модифікаторів). Це в свою чергу дозволяє мінімізувати негативний вплив ліквідаційних процесів та забезпечити стабільний ефект інокуляції (зародкоутворення) у всьому об'ємі рідкої ванни. Такий підхід дозволяє створювати литі композиційні матеріали з унікальним поєднанням твердості та в'язкості.

Особлива значущість роботи полягає у вирішенні фундаментальної проблеми низької змочуваності та нерівномірного розподілу тугоплавких наночастинок (карбідів, боридів) у металевій матриці. Замість механічного введення порошків, пропонується гібридна технологія, що поєднує методи порошкової металургії та лиття.

Використання частинок, отриманих методами електричного вибуху провідників (ЕВП) та електроіскрового диспергування (ЕІД), дозволяє вводити в розплав високоактивні центри кристалізації із заданою морфологією. Це забезпечує формування щільної дрібнозернистої структури без перегрівання розплаву, що критично важливо для енергозбереження та ресурсозбереження.



Запропонований комплексний підхід дозволяє перейти від емпіричного підбору компонентів до проектування складу сплаву під конкретні ливарні завдання. Це відкриває шлях до виробництва виливків нового покоління для авіакосмічної галузі (жароміцність та мала вага), енергомашинобудування (стійкість до теплових та агресивних середовищ) та адитивного виробництва.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України та пов'язана з виконанням науково-дослідних робіт: № 14-16-651 (№ держреєстрації 0117U002474) «Дослідження ливарних процесів та додаткових зовнішніх впливів на структуроутворення алюмоматричних композиційних виливків, виготовлених з використанням відходів композитів та мономатеріалів» – відомча тематика НАН України, 2014-2016 рр.; № III-12-17-674 (№ держреєстрації 0117U002685) «Закономірності формування композиційної структури внаслідок синтезу ендогенних армуючих частинок в розплавах на мідній основі» – відомча тематика НАН України, 2017-2019 рр.; № II-4-15-664 (№ держреєстрації 0115U001461) «Шаруваті композиційні матеріали з наноструктурними ендогенним та екзогенними складовими багатофункціонального призначення» – цільова комплексна програма фундаментальних досліджень НАН України «Фундаментальні проблеми створення нових наноматеріалів і нанотехнологій», 2015-2019 рр.; № III-30-20-697 (№ держреєстрації 0223U001574) «Особливості формування композиційних шарів при контактному легуванні антифрикційних алюмінієвих сплавів розплавами свинцю та олова» – відомча тематика НАН України, 2020-2022 рр.; № II-4-15-677 (№ держреєстрації 0117U002683) «Розроблення нових литих багатошарових монолітно-металокерамічних-пористих композиційних матеріалів для пар тертя та елементів захисту спецтехніки» – Державна науково-технічна програма "Ресурс", 2017-2021 рр.; № II-11-20-700 (№ держреєстрації 0120U100135) «Наукові та технологічні засади процесів одержання литих композиційних і конструкційних матеріалів на основі алюмінію, зміцнених високоентальпійними газовими та дисперсними реагентами, введеними у розплав в рідкому та пароподібному стані» – цільовий науково-технічний проект НАН України «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень», 2020-2021 рр.; № II-14-20-703 (№ держреєстрації 0121U108147) «Створення ділянки виробництва фасонних каменелитих виробів для потреб хімічної та металургійної промисловості України», – науково-технічний проект НАН України 2021 р. Частина робіт виконувалася в рамках міжнародного спільного українсько-китайського науково-дослідного проекту «Спільні дослідження фізико-

металургійної взаємодії нанорозмірних порошків з розплавами при отриманні зварювальних алюмінієвих дротів» (№ держреєстрації 0120U103885, 0119U102358), 2019-2020 рр. в Інституті електрозварювання (ІЕЗ) ім. Є.О. Патона за керівництва Щерецького В.О.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, та їх достовірність

В дисертації Щерецького В.О. логічно і послідовно описано тему досліджень, доведено її актуальність і сформульовано мету і задачі.

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації, базується на комплексному підході, що поєднує фундаментальні теоретичні розрахунки, застосування сучасних високоточних методів експериментальних досліджень та апробацію отриманих результатів у напівпромислових умовах.

Використання взаємодоповнюючих методів структурно-фазового аналізу дозволило ідентифікувати кристалічні фази та дослідити атомно-структурні характеристики наночастинок і їхню взаємодію з матрицею на нанорівні.

Застосуванням оригінальної методики синхронного термічного аналізу у режимі «зразок з корекцією» та математичним відніманням диференціальних кривих, дало змогу зафіксувати слабкі теплові ефекти, які неможливо виявити стандартними методами ДСК, забезпечивши високу чутливість до низькоенергетичних реакцій у системах «частинка – сплав».

Важливою складовою забезпечення достовірності результатів є автоматизація процесу аналізу мікроструктури за допомогою спеціалізованих програмних пакетів. Це підвищило точність, відтворюваність і об'єктивність вимірювання параметрів мікроструктури та мінімізувало вплив суб'єктивного фактору.

Наукові положення дисертації логічно випливають із результатів експериментів, підтверджені коректною статистичною обробкою даних та узгоджуються з сучасними уявленнями в галузі матеріалознавства композиційних матеріалів.

Основні результати дисертаційної роботи доповідалися на Міжнародній науково-практичній конференції «Литво. Металургія» (2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, м. Запоріжжя; 2022, м. Харків/м. Київ), Міжнародній науково-практичній конференції «Nanotechnology and Nanomaterials, NANO» (2014, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, м. Львів; 2017, м. Чернівці), 6-му Міжнародному молодіжному науковому форумі «Litteris et Artibus» та 5-й Міжнародній науковій конференції «Mechanical Engineering, Materials Science, Transport, MEMST» (2016, м. Львів), V Науковій

конференції «Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології, НАНСИС» (2016, 2019, м. Київ), Міжнародній науково-технічній конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (2015, 2017, 2018, 2019, 2021 м. Київ), та V Міжнародній науково-технічній конференції «Зварювання та споріднені технології: перспективи розвитку» (2021, м. Краматорськ).

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці комплексних технологічних рішень для створення високоефективних композиційних матеріалів. Визначено раціональні режими електророзрядного синтезу, що забезпечують стабільне одержання нанодисперсних порошків W, Ti, Mo, Zr із прогнозованим фазовим складом. Розроблено методику стабілізації ультрадисперсних частинок на поверхні мікрогранул, яка запобігає їх агломерації та дозволяє зберігати високу поверхневу активність компонентів. Впроваджено гібридну порошково-ливарну технологію виготовлення композиційних лігатур для ефективного модифікування структури розплавів алюмінію та міді. Запропоновано методи підвищення експлуатаційних характеристик виробів шляхом пічного наплавлення та ультразвукового формування ендогенних зміцнюючих фаз, що забезпечує стабільну роботу матеріалів в екстремальних умовах авіакосмічної галузі та енергетики. Практична реалізація зазначених технологічних рішень дозволила успішно освоїти випуск якісних габаритних фасонних виливків з фторфлогопіту, призначених для вузлів хлоратора, в умовах ливарного цеху ТОВ «ЗТМК».

4. Структура та зміст дисертації

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, 9 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та додатків А, Б, В, Г. Перелік використаної літератури містить 202 найменування. Загальний обсяг роботи становить 456 сторінок, містить 46 таблиць, 180 рисунків та додатки А, Б, В, Г, Д на 17 сторінках.

У вступі автор обґрунтовує актуальність дослідження, визначає його мету і завдання, розкриває наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів та показує їх взаємозв'язок з виконуваними науковими програмами та проектами. Зазначено особистий внесок здобувача у публікаціях, де відображено основний зміст дослідження та наведено дані щодо апробації результатів на вітчизняних і міжнародних конференціях. Зазначено відомості про структуру та зміст роботи.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан та перспективи використання ультрадисперсних частинок карбідів, боридів і оксидів для зміцнення алюмінієвих та мідних сплавів. Встановлено, що ефективність модифікування за механізмами Холла-Петча та Орована визначається не

лише природою частинок, а й їхньою термічною стабільністю, морфологією та рівномірністю розподілу в матриці. Окрему увагу приділено проблемі деградації модифікаторів у розплавах, що потребує поглибленого вивчення кінетичних умов кристалізації та впливу легуючих елементів на стабільність фаз.

Обґрунтовано необхідність комплексного підходу до дослідження систем із низьким вмістом нанорозмірних модифікаторів через обмежену чутливість стандартних методів рентгенофазового аналізу. Доведено доцільність застосування термодинамічного моделювання методом CALPHAD для прогнозування фазових перетворень і взаємодії на міжфазних границях. Такий підхід, у поєднанні з верифікацією результатів локальними методами структурних досліджень, визначено як найбільш раціональний для розробки нових композиційних матеріалів триботехнічного призначення.

У другому розділі представлено комплексний підхід до дослідження структурно-фазового стану та властивостей матеріалів, що базується на поєднанні стандартних і авторських методик. Для ідентифікації фаз та аналізу атомно-структурних характеристик наночастинок застосовано взаємодоповнюючі методи рентгенівської дифрактометрії, а також растрової та просвічувальної електронної мікроскопії. Особливу увагу приділено розробленій оригінальній методиці синхронного термічного аналізу (СТА) у режимі «зразок з корекцією», що дозволило з високою чутливістю реєструвати слабкі теплові ефекти взаємодії в системах «частинка-сплав», недоступні для стандартних методів ДСК.

Для кількісної оцінки механічних властивостей на мікро- та нано рівнях використано наноіндентування та метод *Modulus Mapping*, що забезпечило прецизійне картування локальної твердості й модулів пружності зміцнювальних фаз. Дослідження ливарних характеристик проводилося на клиноподібних пробах та модифікованих формах Нехендзі-Купцова, що дозволило моделювати різні режими охолодження та теплових потоків. Достовірність результатів підкріплена автоматизацією аналізу мікроструктури, що забезпечило високу точність, об'єктивність вимірювань та мінімізацію впливу суб'єктивного фактора.

Застосовані методи досліджень гарантують точність і достовірність одержаних результатів.

У третьому розділі обґрунтовано раціональні енергетично-технологічні режими електророзрядного синтезу нанодисперсних порошків W, Ti, Mo, Zr методами електричного вибуху провідників (ЕВП) та електроіскрового диспергування (ЕІД). Встановлено, що керування фазовим складом та дисперсністю часток здійснюється через вибір робочого середовища (вода, гексан), напруги імпульсу та параметрів електродів. Визначено оптимальні умови синтезу (зокрема, діаметр дроту ~1 мм для ЕВП

та ємність $C \approx 7$ мкФ для ЕІД), які забезпечують стабільність процесу та вихід нанорозмірної фракції (< 200 нм) на рівні понад 90 % об'єму порошку.

Доведено, що морфологія та ступінь взаємодії металу із середовищем корелюють із енергетичними параметрами: підвищення напруги та зниження густини рідини сприяють отриманню дрібніших частинок. Для практичного застосування одержаних порошоків запропоновано підхід формування комбінованих мікро-наногранул, де наночастинки фіксуються на поверхні порошоків розміром > 100 мкм. Це дозволяє стабілізувати дисперсний стан, зберегти високу поверхневу активність компонентів та запобігти їхній агломерації перед введенням у металеву матрицю.

Четвертий розділ містить термодинамічні дослідження, що базуються на CALPHAD розрахунках фазових рівноваг у системі «металевий розплав-дисперсна частинка» на основі термодинамічного моделювання в діапазоні температур $100-700 \div 1500$ °С.

Для виконання розрахунків термодинамічної моделі використовували модуль PyCALPHAD, що ґрунтується на розрахунку фазових рівноваг шляхом мінімізації енергії Гіббса для комбінації всіх можливих фаз у системі. Для чого термодинамічна функція перетворюється у нелінійну систему рівнянь через функціонал Лагранжа з множниками.

Отримані термодинамічні закономірності свідчать, що керування структурою і властивостями алюмінієвих сплавів (композитів) визначається хімічною активністю кремнію та його здатністю до селективної взаємодії з ультрадисперсними частинками карбідів оксидів, тощо. Легуючі елементи, які розчиняються у розплаві без утворення нерозчинних фаз, практично не впливають на фазовий баланс. Кремній знижує інтенсивність взаємодії неметалевих частинок з матрицею, тоді як елементи, що зв'язують Si у стабільні сполуки, зменшують його активність і посилюють адгезійну взаємодію на міжфазній границі.

П'ятий розділ присвячено дослідженням термічної стабільності нанорозмірних частинок в інертному та окисному середовищах, що дозволило визначити області їхньої стійкості та умови формування вторинних інтерметалідних сполук. Встановлено, що серед досліджених фаз найбільш термостабільним є ZrO_2 , тоді як оксиди молібдену та вольфраму зазнають складних поліморфних перетворень і розкладу. Обґрунтовано доцільність попереднього термічного «доокиснення» порошоків як методу вирівнювання їхнього фазового складу перед інтеграцією в металеву матрицю.

Визначено раціональні параметри порошоків-основ для формування комбінованих «мікро-наногранул». Встановлено, що газорозпилені алюмінієві порошки фракції 160-250 мкм та порошок ПА-3 (зі вмістом $Al_2O_3 \approx 0,46$ %) забезпечують оптимальне поєднання високої хімічної однорідності, необхідної дисперсності та мінімальної кількості домішкових оксидів. Це

гарантує стабільність структуроутворення при подальшому модифікуванні сплавів алюмінію та міді.

У шостому розділі досліджено методом термічного аналізу взаємодію екзогенних частинок зі сплавами алюмінію і міді, а також зі стандартними сплавами на їхній основі у твердому і рідкому станах. Міжфазну взаємодію в системах «алюмінієві сплави - ультрадисперсні частинки» досліджували за допомогою синхронного термічного та рентгенофазового аналізів. В якості зразків використовували композиційні матеріали, отримані холодним пресуванням порошкових сумішей, у яких частинки карбідів попередньо піддавали термічній обробці за режимами гомогенізації. Додатково досліджували зразки після прямої екструзії при 420 °С. У всіх досліджених системах простежується закономірність зростання інтенсивності взаємодії зі збільшенням вмісту хімічно активних елементів (кремнію та магнію) і окисного потенціалу середовища. Це зумовлює доцільність проведення консолідації ультрадисперсних частинок з металевою матрицею в інертній атмосфері або захисному середовищі із урахуванням встановлених механізмів взаємодії.

Сьомий розділ дисертації присвячено дослідженню ефективності трьох технологій одержання композитів: лігатурного введення, гарячої екструзії та просочування «мікро-наногранул». Розроблено порошково-ливарний метод створення композиційних лігатур (на базі А7, АК7, АД31), що поєднує механоактивацію та екструзію. Встановлено, що введення 0,5% мас. ультрадисперсних карбідів (TiC, WC, SiC) забезпечує інтенсивне подрібнення зерна, причому коефіцієнт модифікування зростає зі збільшенням швидкості охолодження та часу витримки розплаву. На відміну від карбідів, оксидні частинки (WO₃, MoO₂) виявляють низьку активність через схильність до коагуляції та погане змочування.

Оцінка ливарних характеристик показала, що нанорозмірні карбіди не погіршують рідкоплинність алюмінієвих сплавів і навіть сприяють її незначному покращенню, тоді як оксиди підвищують ризик утворення гарячих тріщин. Доведено, що введення до 1% мас. частинок WC та TiC у стані Т6 підвищує твердість матриці на 10–18% та модуль пружності на 8–14%. Такий зміцнюючий ефект пояснюється рівномірним розподілом фаз та формуванням тонких перехідних шарів Al–C–Me, що забезпечують ефективну передачу механічних напружень на міжфазній границі.

Восьмий розділ присвячено розробленню методики одержання *in-situ* композитів на основі алюмінієвих сплавів (AA6016, AA6082, A356), зміцнених ендогенними частинками ZrB₂, Al₂O₃ та Al₃Zr шляхом прямого реакційного синтезу. Вперше за допомогою ПЕМ високої роздільної здатності визначено параметри невідповідності кристалічних ґраток ZrB₂ та алюмінієвої матриці, що підтверджує зміцнювальну дію за механізмом Орована. Встановлено, що застосування ультразвукової обробки розплаву та

методу тертя з перемішуванням забезпечує гомогенізацію структури, суттєве подрібнення зміцнювальних фаз і формування стабільного профілю мікротвердості.

Доведено, що формування нанорозмірних частинок ZrB_2 і AlB_2 радикально покращує комплекс експлуатаційних характеристик: щільність корозійного струму знижується вдвічі, а триботехнічні властивості зростають завдяки високій адгезії частинок до матриці та їхній стійкості до відриву. Деформаційна обробка та стабілізація структури дозволяють збільшити тривалість стадії повзучості та вирівняти електрохімічні потенціали поверхні. Отримані результати науково обґрунтовують ефективність використання ендегенних сполук цирконію і бору для створення нового покоління високоміцних, корозійностійких та антифрикційних алюмінієвих композитів.

Дев'ятий розділ представлено прикладні розробки щодо створення функціональних композитів на основі алюмінію та міді, зокрема для адитивного виробництва. Встановлено, що використання присаджувальних дротів $Al10SiMg$ з 1% WC при дровому дуговому наплавленні забезпечує стабілізацію мікроструктури, зменшення кількості дефектів та пригнічення виділення первинного кремнію. Це призводить до зростання твердості наплавлених шарів на 20–30% та підвищення їхньої термостійкості, що дозволило розробити спільно з ТОВ НВЦ «Плазер» рекомендації для виробництва деталей спецтехніки.

Розроблено технологічні рішення для формування багат шарових триботехнічних матеріалів системи «сталь-мідноматричний композит». Введення комплексу ультрадисперсних частинок у функціональні шари на базі бронз $BrAЖ9-4$ та $BrO10Ф1$ дозволило суттєво знизити інтенсивність зношування та стабілізувати коефіцієнт тертя в умовах високих навантажень. Практичне застосування методів дисперсного зміцнення також поширено на технологію кам'яного литва: використання карбідів кремнію і бору дозволило мінімізувати склофазу та забезпечити випуск великогабаритних виливків із фторфлогопіту для потреб ТОВ «ЗТМК».

У висновках узагальнено всі наукові й практичні результати роботи, які підтверджують досягнення поставленої мети – створення наукових засад і комплексних технологічних рішень для створення високоефективних композиційних матеріалів на основі алюмінієвих і мідних сплавів, зміцнених ендегенними та екзогенними нанорозмірними фазами. Розроблено та впроваджено методи керованого електророзрядного синтезу модифікаторів, гібридні порошково-ливарні технології підготовки лігатур та методики адитивного формування структур, що в сукупності забезпечило підвищення фізико-механічних, триботехнічних та експлуатаційних характеристик виробів для потреб авіакосмічної галузі, енергетики та спеціального машинобудування.

Додатки містять акти впровадження результатів досліджень та список наукових публікацій за темою дисертації.

Дисертація В.О. Щерецького є завершеною науковою роботою високого рівня, що відповідає спеціальності 05.16.04 «Ливарне виробництво» і чинним вимогам до оформлення. У ній отримано низку нових наукових положень і технологічних рішень, важливих для розвитку матеріалознавства та металургії, зокрема ливарного виробництва.

5. Наукова новизна отриманих результатів, сформульованих положень і висновків

1. Набула подальшого розвитку теорія інертної підкладки. Встановлено раніше невідомі закономірності впливу ультрадисперсних частинок-інокуляторів різної природи на міжфазну енергію системи «частинка–розплав». Показано, що частинки карбідів та оксидів розміром менше 200 нм за температур 700-800 °С є ефективними гетерогенними зародками кристалізації алюмінієвих сплавів завдяки пониженій поверхневій енергії. Встановлено, що вирішальними факторами їх дії є розмір і морфологія, тоді як кристалічна структура рівноважного стану має другорядне значення.

2. Створено ефективніші раціональні енергетично-технологічні режими електророзрядного синтезу (електричний вибух провідників, електроіскрове диспергування) дровових матеріалів W, Ti, Mo, Zr, які забезпечують стабільне одержання нанодисперсних карбідних та оксидних порошоків у дистильованій воді та гексані з прогнозованим фазовим складом і контрольованим гранулометричним розподілом.

3. Вперше одержано комплексні дані термодинамічної та кінетичної стабільності ультрадисперсних екзогенних частинок (WO_3 , MoO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , TiB_2 , TiC , WC , SiC , SiO_2 , MoC , ZrC) та ендогенних зміцнювальних фаз (AlB_2 , Al_2O_3 , ZrB_2 , Al_3Zr) у взаємодії з розплавами алюмінію та міді. Вперше встановлено області їхньої стабільності та можливі шляхи міжфазних реакцій у твердому та рідкому станах на основі поєднання термодинамічних розрахунків і методів термічного аналізу.

4. Вперше проведено комплексні дослідження впливу ультрадисперсних екзогенних частинок (WO_3 , MoO_2 , ZrO_2 , TiO_2 , MoC , ZrC) на структуроутворення, механічні та спеціальні властивості алюмінієвих сплавів. Встановлено ефективність різних типів частинок-інокуляторів як модифікаторів, здатних ініціювати зародкоутворення та зменшувати зернистість литої структури.

5. Вперше досліджено структуру та властивості композиційних матеріалів на основі алюмінієвих сплавів з ендогенними зміцнювальними фазами ZrB_2 , Al_3Zr та $AlB_2 + Al_2O_3$, отриманими шляхом поєднання ливарних процесів з деформаційним обробленням, включаючи інтенсивне

твердо-рідинне оброблення тертям із перемішуванням. Встановлено закономірності формування зміцненої структури та вплив створених фаз на механічні та функціональні властивості.

6. Вперше встановлено механізми та сформульовано наукові основи модифікування та зміцнення металевих сплавів стійкими нано-, субмікро- та мікророзмірними частинками, дія яких активується під час лиття, деформаційного, твердо-рідинного оброблення та в процесі з'єднання.

7. На основі одержаних результатів фундаментальних досліджень розроблено наукоємну комплексну технологію одержання композиційних лігатур і композиційних матеріалів, придатних для використання як високоефективних модифікаторів структури в умовах лиття, з'єднання та твердо-рідинного оброблення.

6. Практичне значення одержаних результатів

У роботі встановлено закономірності впливу технологічних параметрів диспергування металевих провідників (W, Ti, Mo, Zr) у реакційних середовищах шляхом електророзрядного синтезу (методи електричного вибуху провідників та електроіскрового диспергування) на фазовий склад, дисперсність і продуктивність одержання нанорозмірних порошків. На основі отриманих даних розроблено раціональні технологічні режими одержання ультрадисперсних карбідних і оксидних частинок, що забезпечують максимальний вихід порошків заданого хімічного складу за стабільності процесу та контрольованого гранулометричного розподілу.

Розроблено методику зберігання, обробки та підготовки ультрадисперсних частинок для подальшого поєднання з металевою матрицею, що дозволяє мінімізувати їх агломерацію та забезпечує стабільність фізико-хімічних властивостей під час зберігання та транспортування.

Створено гібридну ливарно-порошкову технологію одержання композиційних матеріалів, що ґрунтується на механічній фіксації нанорозмірних частинок на поверхні металевих гранули. Показано, що нанесені на металеві гранули розміром 100-200 мкм ультрадисперсні частинки втрачають здатність до самовільного компактування, але водночас зберігають реакційну здатність та залишаються доступними для взаємодії під час технологічних операцій: просочення, екструзії, пічного наплавлення тощо. Такі комбіновані «мікро-наногранули» можуть бути використані для виготовлення композиційних матеріалів або як лігатури для модифікування розплавів алюмінію та міді.

Запропоновано ефективні способи підвищення механічних та функціональних властивостей виробів з алюмінієвих та мідних сплавів шляхом: введення композиційних лігатур у розплав; формування зміцнених

ультрадисперсними частинками функціональних композиційних шарів пічним наплавленням; застосування гібридних порошково-ливарних технологій для одержання композиційних матеріалів з покращеним комплексом властивостей.

Практичну цінність отриманих композиційних матеріалів визначає можливість їхнього застосування в умовах підвищених температур, високої корозійної агресивності та інтенсивного сухого тертя, де традиційні ливарні та деформівні сплави не забезпечують необхідної довговічності та стабільності властивостей.

Показано, що композити, зміцнені ендегенними частинками, сформованими за допомогою ультразвукової обробки розплаву та технологій тертя з перемішуванням, становлять новий клас високофункціональних матеріалів. Вони поєднують малу густину, високу міцність, пластичність, зносостійкість, корозійну стабільність і опір повзучості, що відкриває можливості для їхнього використання в авіакосмічній техніці, машинобудуванні, енергетиці та сучасних технологіях створення матеріалів.

7. Повнота викладення основних результатів дисертації в опублікованих працях

За темою дисертаційної роботи опубліковано 61 наукову працю: 1 глава в колективній монографії; 27 статей в фахових наукових журналах з них 13 індексуються міжнародними наукометричними базами Scopus та WoS (3 – рівня Q3, 6 – рівня Q2, 4 рівня – Q1 за рейтингом SCImago), 30 тез доповідей в збірках матеріалів міжнародних конференцій; 1 патент України на винахід та 2 на корисну модель.

Аналіз змісту публікацій вказує на те, що всі головні наукові положення і практичні рекомендації дисертаційної роботи викладено у наукових виданнях.

8. Мова та стиль дисертації

Текст дисертації представлено українською мовою, з дотриманням правил оформлення рисунків, таблиць, формул. Автор дотримався загальноновизнаної наукової термінології. Кожен розділ дисертації тематично представляє завершене наукове дослідження. Всі положення наукової новизни та висновки повною мірою розкрито в дисертації, підтверджено рисунками, аналітичними та практичними даними. Дисертація має логічне та послідовне викладення інформації та характеризується якісним науковим стилем.

9. Зауваження щодо дисертаційної роботи

1. Автор зазначає, що термін «зміцнююча частинка» використовується в роботі в широкому сенсі, навіть якщо межа міцності чи плинності суттєво не змінюються. Варто було б чіткіше розмежувати поняття «модифікувальна» та «зміцнююча» дія частинок, щоб уникнути плутанини під час аналізу функціональних властивостей.

2. У п. 1.2 (стор. 51) вказано, що екзогенні інокулятори (оксиди, карбіди) є більш перспективними через стабільність розмірів, проте в п. 1.5 згадується про деградацію карбіду титану в алюмінієвих розплавах з утворенням шкідливого Al_4C_3 (стор. 70). Потребує детальнішого пояснення, чому за наявності таких ризиків ці частинки все одно вважаються пріоритетними порівняно зі стабільнішими ендогенними фазами.

3. Описаний процес механічного перемішування наночастинок у планетарному млині тривалістю не менше 4 годин може призводити до небажаного наклепу або зміни морфології самих металевих порошоків. Недостатньо висвітлено вплив таких тривалих режимів на цілісність оксидного шару алюмінієвих частинок.

4. Для встановлення кількості введених частинок автор використовує комбінацію гідростатичного зважування та РФА. Враховуючи малу масову частку наночастинок (до 0,5%), похибка методу гідростатичного зважування може бути співмірною з величиною пошуку, що потребує додаткової статистичної верифікації.

5. У розділі описано методи електричного вибуху провідників та електроіскрового диспергування. Автору слід звернути увагу на стабільність гранулометричного розподілу під час масштабування цих процесів, оскільки нанорозмірні фракції мають високу схильність до миттєвої агломерації в робочих рідинах (вода, гексан).

6. Автор стверджує про можливість одержання порошоків із прогнозованим складом. Проте процеси в зоні електричного розряду є нерівноважними, тому доцільно було б вказати межі відхилення реального складу від теоретично очікуваного.

7. Використання методу CALPHAD для прогнозування стабільності наночастинок базується на термодинамічних константах макротіл. Оскільки поверхнева енергія наночастинок суттєво вища, результати розрахунків для систем «частинка-розплав» можуть мати значні похибки без введення розмірних поправок. Така інформація потребує додаткового пояснення та/або уточнення.

8. Автор на сторінках 5, 12 та у висновках до розділу 4 (с. 210) описує фізико-хімічні закономірності щодо негативного впливу кремнію та позитивної ролі титану на стабільність частинок TiC у розплавах. Однак безпосередньо у розділі 4 (с. 176-210) відсутні чітко визначені кількісні межі легування. Зокрема, не вказано граничний вміст кремнію, за якого деградація TiC стає настільки інтенсивною, що його застосування як модифікатора втрачає практичну доцільність. Автору необхідно додатково навести критерії для вибору оптимальних концентрацій легуючих елементів залежно від складу промислових сплавів.

9. Промислові процеси, описані в роботі, зазвичай реалізуються в інертному середовищі (аргон) або під захисним флюсом для запобігання деградації матеріалів, виникає питання щодо проведених досліджень на відкритому повітрі. Автору слід чіткіше інтерпретувати, як саме дані про окиснення на повітрі допомагають у виборі технологічних параметрів для процесів, що відбуваються в захищеному середовищі.

10. Автор досліджував взаємодію наночастинок із конкретним сплавом АД31. Було б доцільно розширити ці дослідження на інші групи сплавів (наприклад, високоміцні системи Al-Zn-Mg-Cu), де хімічна активність компонентів матриці суттєво вища.

11. Зазначено зростання коефіцієнта модифікування при часі витримки понад 10 хв. Проте для наночастинок зазвичай характерна швидка дезактивація через розчинення або коагуляцію, що вимагає детальнішого аналізу кінетики процесу.

12. Автором встановлено низьку модифікуючу активність оксидних частинок WO_3 , та MoO_2 , що зумовлено їх незадовільним змочуванням розплавом та схильністю до коагуляції. Виявлена закономірність ставить під сумнів доцільність включення зазначених оксидів до складу раціональних модифікаторів, запропонованих у попередніх розділах, а також ставить під питання ефективність зміцнення ними сплаву АД31. Доцільно було б надати пояснення щодо розбіжностей між теоретичним обґрунтуванням вибору цих компонентів та отриманими низькими показниками їх практичної ефективності.

13. На сторінках 294–295 автором проведено порівняльний аналіз рідкотекучості промислового силуміну АК7 та технічно чистого алюмінію А7, проте коректність такого зіставлення викликає зауваження через суттєву різницю в їхніх фізико-технологічних властивостях. Окрім того, потребує уточнення наукова та прикладна мета визначення відносної зміни рідкотекучості для цих різнорідних матеріалів, оскільки критерії такої оцінки

в роботі сформульовані недостатньо чітко та ускладнюють сприймання інформації.

14. На рис. 2.9 не відображено зони I, II, III та IV, хоча їх детальний аналіз наведено в табл. 7.5. Така невідповідність між графічним матеріалом та табличними даними ускладнює сприйняття та порівняльний аналіз представленої інформації.

15. Графічний матеріал, представлений на рис. 7.20 та 7.23, потребує доповнення статистичними показниками точності вимірювань. Відсутність значень похибок ускладнює оцінку відтворюваності результатів та статистичної значущості виявлених залежностей.

16. На сторінці 7 автор зазначає, що визначена невідповідність параметрів кристалічних ґраток між ендогенними частинками та алюмінієвою матрицею становить 6,44. Це трактується як підтвердження реалізації механізму зміцнення Орована. Однак слід зауважити, що такий рівень невідповідності є досить суттєвим і може критично впливати на термодинамічну стабільність міжфазної межі. У роботі доцільно було б надати більш детальний аналіз того, як зазначена невідповідність корелює з довговічністю зміцнювального ефекту за умов термічного впливу.

17. Використання дротів із наночастинками WC для адитивного наплавлення сплаву Al10SiMg є перспективним, проте не наведено даних про вплив частинок на пористість металу під час дугового процесу.

18. Автор пропонує заміну дорогого скандію на дешевші неметалеві фази. Було б доцільно надати порівняльний розрахунок вартості виготовлення композиційних лігатур методами, описаними в роботі, порівняно зі стандартними лігатурами Al-Sc.

Разом з тим, вказані зауваження не є принциповими тому в цілому не впливають на загальну позитивну оцінку роботи і не знижують цінність одержаних наукових результатів та обґрунтованість висновків, а також не ставлять під сумнів наукову новизну роботи.

10. Відповідність реферату змісту дисертаційної роботи

Автореферат складається із вступної частини, в якій представлено актуальність, мету та задачі роботи, наукову новизну та практичну значимість, особистий внесок здобувача та інформацію про структуру дисертації. В основному тексті автореферату представлено стислий огляд усіх розділів дисертації, в якому розкрито пояснення усіх положень наукової новизни. Висновки та перелік публікацій відповідають тим, що представлені в дисертації. За правилами оформлення, обсягом, структурою та змістом,

автореферат повною мірою відповідає дисертаційній роботі та чинним вимогам.

11. Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам

Дисертація Щерецького Володимира Олександровича «Теоретичні та прикладні основи використання дисперсних частинок для керування структурою та властивостями сплавів і композиційних матеріалів» являє собою завершену наукову роботу, яку присвячено створенню нових та удосконаленню існуючих технологічних процесів одержання композиційних матеріалів, розробці фізико-хімічних основ керування процесами структуроутворення алюмінієвих та мідних сплавів шляхом введення екзогенних і ендогенних нанорозмірних частинок, а також підвищенню комплексу їхніх механічних і експлуатаційних властивостей для потреб сучасного машинобудування.

Результати дослідження варті впровадження у виробництво нових зразків техніки, у тому числі – відповідального та подвійного призначення. Мета, завдання, зміст наукових положень та представлених висновків свідчать про те, що дисертація повною мірою відповідає паспорту спеціальності 05.16.04 «Ливарне виробництво», а саме п.п. 1, 3, 4 та 7.

Дисертаційна робота Щерецького В.О. містить важливі вперше сформульовані наукові положення, що направлені на вирішення важливої наукової проблеми. Всі поставлені завдання в роботі вирішено, а сама дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197, а її автор Щерецький Володимир Олександрович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.04 «Ливарне виробництво».

д.т.н., проф.
зав. каф. ливарного виробництва
НН ІМЗ ім. Є.О. Патона
КПІ ім. Ігоря Сікорського


Михайло ЯМШИНСЬКИЙ

Засвідчую
Ливарського М.М.
Григораків
кр-ше