

В І Д Г У К

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Щерецького Володимира Олександровича

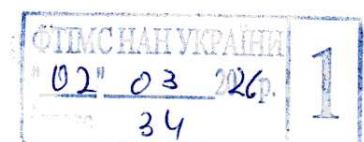
«Теоретичні та прикладні основи використання дисперсних частинок для керування структурою та властивостями сплавів і композиційних матеріалів»,

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

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Сучасний розвиток високотехнологічних галузей промисловості, таких як авіакосмічна техніка, енергетичне машинобудування та адитивне виробництво, висуває жорсткі вимоги до конструкційних матеріалів. Традиційні підходи до легування, спрямовані на підвищення експлуатаційних властивостей сплавів, наближаються до межі своїх технологічних можливостей. У зв'язку з цим, надзвичайно актуальним є пошук та розробка принципово нових методів керування структурою металевих матеріалів в тому числі до залучення неметалевих частинок та формування композиційних структур.

Дисертаційна робота Щерецького В.О. спрямована на вирішення саме цієї фундаментальної науково-прикладної проблеми – створення теоретичних та технологічних основ використання дисперсних частинок різної природи для направленоного формування структури та, як наслідок, властивостей сплавів та композиційних матеріалів на основі алюмінію та міді. Робота є своєчасною, та актуальною оскільки формує перехід від емпіричного шляху розробки сплавів та композиційних матеріалів до цілеспрямованого конструювання матеріалів з використанням як екзогенних (отриманих *in-vitro*), так і ендогенних (синтезованих *in-situ*) ультрадисперсних частинок. Такий комплексний підхід, що поєднує ливарні технології з методами порошковою металургією та методами інтенсивної пластичної деформації, безсумнівно, є актуальним і має



вагоме значення для розвитку як ливарного виробництва так матеріалознавства в цілому.

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

Дисертаційна робота виконана у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України в рамках низки науково-дослідних робіт відомчої, програмно-цільової та державної тематики, а також міжнародного проєкту (№ держреєстрації: 0117U002474, 0117U002685, 0115U001461, 0223U001574, 0117U002683 0120U100135 0121U108147, 0120U103885, 0119U102358). Участь здобувача у цих роботах в якості виконавця, відповідального виконавця та керівника підтверджує високий рівень кваліфікації дисертанта та практичну значущість виконаних досліджень.

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

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі Щерецького В.О., достатньою мірою обґрунтовані. Вони базуються на коректному застосуванні фундаментальних принципів фізичного матеріалознавства, термодинаміки, теорії кристалізації сплавів та технології ливарного виробництва.

Проведено критичний аналіз наявної наукової та практичної інформації за темою дослідження, виявлено проблеми та поставлено мету дослідження, яка є актуальною.

Дослідження виконано на сучасному передовому обладнанні, яке забезпечує отримання результатів із належною достовірністю та точністю. Для цього залучено обладнання ФТІМС НАН України та деяких інших інститутів.

Достовірність отриманих результатів забезпечується комплексним використанням сучасних взаємодоповнюючих методів дослідження. Автор застосував не лише стандартні методики (металографія, дюрометрія, рентгенофазовий аналіз, механічні випробування тощо), а й оригінальні підходи,

зокрема вдосконалену методику синхронного термічного аналізу для реєстрації слабких теплових ефектів, методи наноіндентування та Modulus Mapping для кількісної оцінки локальних механічних властивостей, а також метод CALPHAD для термодинамічного моделювання. Використання електронної мікроскопії високої роздільної здатності (HRTEM) дозволило візуалізувати нанорозмірні частинки та підтвердити механізми їх впливу. Великий обсяг експериментальних даних, їхня автоматична обробка з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, а також апробація результатів на численних міжнародних конференціях та публікації у високорейтингових фахових виданнях (індексованих Scopus та WoS рівня Q1 та Q2) підтверджують достовірність та обґрунтованості отриманих результатів.

Наукові положення, висновки та рекомендації є повною мірою достовірними та обґрунтованими.

4. Структура та зміст дисертації

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, дев'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (202 найменування) та п'яти додатків (що засвідчують застосування розроблених матеріалів та технологічних рішень на підприємствах України). Загальний обсяг роботи становить 456 сторінок, вона містить 46 таблиць та 180 рисунків, що повністю відображає отримані результати.

- **У вступі** автор ґрунтовно обґрунтовує актуальність теми, формулює мету та завдання дослідження, висвітлює наукову новизну та практичне значення роботи.
- **Перший розділ** являє собою аналітичний огляд літератури, в якому розглянуто сучасний стан проблеми зміцнення алюмінієвих та мідних сплавів. Автор критично осмислює переваги та недоліки різних типів модифікаторів, обґрунтовує доцільність використання ультрадисперсних частинок та застосування термодинамічного моделювання. На основі огляду було сформульовано задачі даного дослідження.

- **У другому розділі** детально описано використані матеріали, методики та обладнання. Особливу увагу приділено оригінальним методичним розробкам (вдосконалений режим вимірювання СТА, методика приготування «мікро-наногранул» тощо), що підкреслює високий методичний рівень роботи.
- **Третій розділ** присвячений розробці технологічних режимів отримання ультрадисперсних порошків (карбідів, оксидів) методами електророзрядного синтезу (ЕВП та ЕІД). Встановлено кореляції між енергетичними параметрами процесу, типом середовища та характеристиками отриманих порошків.
- **Четвертий, п'ятий та шостий розділи** становлять теоретичну та експериментальну основу роботи з вивчення сумісності частинок з матрицею. У четвертому розділі з використанням методу CALPHAD виконано прогнозування фазових рівноваг. В п'ятому та шостому розділах ці дані верифіковано експериментально за допомогою термічного аналізу, встановлено області термодинамічної та кінетичної стабільності різних типів частинок у сплавах алюмінію та міді в рідкому та твердому станах та різних атмосферах дослідження.
- **Сьомий розділ** висвітлює практичні аспекти створення композитів та лігатур на основі алюмінію з екзогенними частинками. Проведено оцінку їх модифікуючої ефективності, вплив застосування на ливарні та механічні властивості.
- **Восьмий розділ** присвячено розробці технологій отримання композитів in-situ з ендогенними фазами (ZrB_2 , Al_3Zr та ін.). Детально досліджено вплив деформаційної обробки на структуру та властивості, зокрема на корозійну стійкість та триботехнічні характеристики.
- **Дев'ятий розділ** демонструє практичну реалізацію розроблених принципів: створення композиційних дротів для адитивного виробництва, багатошарових триботехнічних матеріалів та модифікування карбідами литих масивних виробів кам'яного литва.

- **Загальні висновки** відповідають поставленим завданням роботи, містять узагальнення основних наукових та практичних результатів роботи.

Дисертація є завершеною науковою працею, написаною логічно, послідовно, з використанням сучасних наукових методів. Тема та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.16.04 – «Ливарне виробництво». Оформлення дисертації відповідає чинним вимогам.

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) дрових 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 ендogenous 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

Практична цінність роботи є безсумнівною і полягає у створенні наукоємної технології керування структурою та властивостями сплавів та композиційних матеріалів.

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 порошоків. На основі отриманих даних розроблено раціональні технологічні режими одержання ультрадисперсних карбідних і оксидних частинок, що забезпечують максимальний вихід порошоків 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 виробів 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 ендogenous 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

Основні результати дисертаційної роботи в повному обсязі висвітлено у 61 науковій праці, з яких: 1 глава в колективній монографії, 27 статей у фахових наукових журналах (з них 13 індексуються у Scopus та WoS, у тому числі 4 статті у журналах Q1), 30 тез доповідей на міжнародних конференціях, 1 патент України на винахід та 2 патенти на корисну модель. Кількість та рівень публікацій повністю відповідають вимогам МОН України щодо висвітлення результатів докторських дисертацій.

Аналіз друкованих праць дає змогу зробити висновок, що результати дисертації опубліковано повністю.

8. Мова та стиль дисертації

Дисертацію викладено державною українською мовою з дотриманням наукового стилю. Текст логічно та обґрунтовано поділено на структурні елементи (розділи, підрозділи, пункти, додатки тощо). В роботі використано загальноприйнятту термінологію. Стиль викладення наукових результатів, висновків та рекомендацій забезпечує їх доступне сприйняття.

Текст ілюстрований великою кількістю якісних рисунків, мікрофотографій, графіків та діаграм, що полегшує сприйняття матеріалу.

Дисертацію оформлено на високому науковому рівні.

9. Дискусійні положення та зауваження щодо дисертаційної роботи

В цілому, високо оцінюючи дисертаційну роботу Щерецького В.О., слід висловити деякі зауваження та побажання:

1. У розділі 3, присвяченому отриманню порошків методами електророзрядного синтезу (електричного вибуху провідників та електроіскрового диспергування), поза увагою автору залишилося порівняння ефективності застосованих методів із іншими сучасними високопродуктивними технологіями одержання ультрадисперсних (нанорозмірних) частинок, зокрема: плазмохімічним синтезом, механохімічним подрібненням (механолегування), методом хімічного осадження з газової фази та золь-гель технологією. Відсутність такого порівняння не дозволяє повною мірою обґрунтувати доцільність застосування саме електророзрядних методів з точки зору продуктивності, енергоефективності розроблених рішень. Включення в роботу такого порівняльного аналізу суттєво підвищило б аргументацію вибору методів синтезу як бази для подальшого застосування.
2. При дослідженні модифікуючої ефективності карбідів та оксидів (розділ 7) основним критерієм обрано коефіцієнт модифікування (подрібнення зерна α -Al). Чи досліджувався вплив цих частинок на морфологію та розміри інших структурних складових, наприклад, евтектичного кремнію в силумінах або інтерметалідних фаз?
3. У роботі ґрунтовно вивчено in-situ композити системи ZrB₂/Al. Чи розглядалася можливість та доцільність створення гібридних композитів, які б містили одночасно як екзогенні (наприклад, WC), так і ендегенні (ZrB₂) частинки для досягнення синергетичного ефекту?
4. В розділі 8 наведено дані про ефективність застосування ультразвуку для підвищення ефективності засвоєння сольових систем і подрібнення ендегенних частинок в розплаві, корисним було б додати главу про моделювання розподілу частинок (наприклад з застосуванням CFD-

моделювання) для ультразвукової обробки, що підвищило б практичну цінність роботи.

5. В роботі застосовано ультразвукову обробку розплаву для зменшення розміру *in-situ* фаз при прямому реакційному синтезі. Проте не досліджено вплив інших фізичних методів обробки розплавів (електромагнітне перемішування, обробка імпульсними магнітними полями тощо) на морфологію та розміри синтезованих ендогенних фаз. Відомо, що застосування зовнішніх фізичних полів дозволяє ефективно впливати на структуруутворення литих композитів. Було б доцільним дослідити можливість поєднання різних фізичних впливів і порівняти їх ефективність для вибору найбільш оптимального рішення.
6. В роботі є пункт практичного значення, що містить положення щодо встановлення закономірностей впливу технологічних параметрів диспергування металевих провідників (W, Ti, Mo, Zr) на фазовий склад, дисперсність і продуктивність одержання нанорозмірних порошоків. За своєю суттю ці закономірності є новими науковими даними, оскільки вони розкривають раніше невідомі залежності між параметрами процесу та характеристиками отриманих продуктів, що безпосередньо відповідає критеріям наукової новизни. Доцільніше було б включити це положення до переліку наукової новизни (наприклад в пункт 2), а в розділі практичного значення сформулювати конкретні технологічні рішення, що базуються на цих закономірностях – тобто власне розроблені раціональні енергетично-технологічні режими, придатні для використання у промислових умовах. Таке розмежування чіткіше відображало б внесок роботи у розвиток фундаментальних уявлень та прикладних технологічних рішень.
7. В роботі відсутні чіткі технологічні рекомендації щодо оптимальної кількості введення розроблених композиційних лігатур для конкретних промислових ливарних сплавів та технологій. Наведені на стор. 284 та 288 (таблиці 7.3, 7.4) дані містять широкий діапазон значень зміни коефіцієнта

модифікування для різних типів модифікуючих добавок, однак немає їх узагальнення у вигляді чітких практичних рекомендацій. Відсутність чітко регламентованих норм витрати модифікаторів залежно від хімічного складу та марки сплаву (наприклад для АК5М2, АК12, АК12М2МгН) ускладнює безпосереднє впровадження одержаних результатів в реальні виробничі процеси.

8. В роботі відсутнє економічне обґрунтування доцільності застосування розроблених рішень по модифікуванню сплавів у промислових масштабах. Використання електророзрядних методів синтезу нанопорошків, а також багатостадійної технології приготування композиційних лігатур (включаючи механоактивацію, екструзію) потребує оцінки економічної ефективності з урахуванням вартості вихідних компонентів, енергозатрат та додаткових капіталовкладень. Варто було б зіставити додаткові витрати на модифікування з очікуваним ефектом від підвищення фізико-механічних та функціональних властивостей. Особливо це важливо з огляду на те, що кінцева продукція ливарного виробництва (фасонні виливки) має порівняно невисоку вартість, і використання високовартісних наномодифікаторів має бути в першу чергу економічно виправданим.
9. З огляду на величезний обсяг роботи (456 стор.), можна було б порекомендувати винести частину експериментальної інформації (термограм) у додатки, щоб спростило роботу з текстом.

Висловлені зауваження мають переважно рекомендаційний характер і не стосуються принципових положень дисертації. Вони не знижують загальної високої оцінки виконаної роботи, її наукової новизни та практичної значущості.

10. Відповідність реферату змісту дисертаційної роботи

Реферат дисертації є ідентичним за змістом основним положенням дисертаційної роботи. В ньому в повній мірі відображено мету, завдання, наукову новизну, практичне значення, методи дослідження, основні результати

та висновки, що містяться в дисертації. Структура та оформлення реферату відповідають встановленим вимогам МОН.

11. Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам

Дисертаційна робота **Щерецького Володимира Олександровича** «Теоретичні та прикладні основи використання дисперсних частинок для керування структурою та властивостями сплавів і композиційних матеріалів» є завершеною, цілісною та актуальною науковою працею, яка містить нові, раніше не захищені наукові положення та отримані автором особисто результати, що в сукупності вирішують важливу науково-технічну проблему створення нового покоління металоматричних композитів та високоефективних модифікаторів для керування структурою і властивостями литих сплавів.

За актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, глибиною теоретичного обґрунтування, науковою новизною, практичною цінністю отриманих результатів, повнотою їх опублікування, дисертація повністю відповідає вимогам пп. 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.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,

завідувачка кафедри ливарного виробництва

Навчально-наукового інституту механічної

інженерії та транспорту НТУ "ХП"

