

1

**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

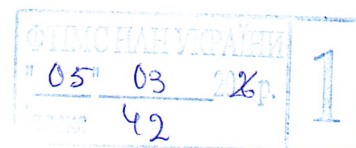
Дисертаційна робота присвячена вирішенню комплексної науково-технічної проблеми – встановленню фундаментальних закономірностей впливу екзогенних та ендогенних дисперсних частинок на процеси кристалізації, структуроутворення та формування властивостей сплавів та композитів основи алюмінію та міді. Актуальність роботи зумовлена: необхідністю створення матеріалів із підвищеними властивостями; потребами адитивного виробництва; обмеженнями традиційних методів легування; розвитком нанотехнологій у металургії та ливарному виробництві. Тематика дисертації повністю відповідає сучасним тенденціям розвитку металознавства та ливарного виробництва.

2. Наукова новизна одержаних результатів:

1. Набула подальшого розвитку теорія інертної підкладки. Встановлено раніше невідомі закономірності впливу ультрадисперсних частинок-інокуляторів різної природи на міжфазну енергію системи «частинка-розплав».

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 порошків 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 ендегенними зміцнювальними фазами ZrB_2 , Al_3Zr та $\text{AlB}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$, 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.

3. Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів

Достовірність і наукова обґрунтованість результатів дисертації базується на поєднанні теоретичних, розрахункових і експериментальних методів дослідження, використанні комплексу сучасних експериментальних методів дослідження: РЕМ, ПЕМ, XRD, CALPHAD-моделювання; застосуванні оригінальної методики СТА; статистичній обробці результатів; узгодженості експериментальних та розрахункових даних. При цьому основні результати роботи, отримані різними методами, добре узгоджуються між собою. Отримані результати не суперечать сучасним уявленням металознавства та підтверджені публікаціями у виданнях, що індексуються Scopus та Web of Science високого рівня (10 статей в журналах рейтингу Q1-Q2) та фахових вітчизняних виданнях.

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

Дисертація виконана у ФТІМС НАН України в межах: держбюджетних тем з дослідження фазових перетворень і структуроутворення в сплавах на основі алюмінію, міді та композиційних матеріалів; державних цільових програм; міжнародного проєкту. Робота

відповідає пріоритетним напрямам НАН України у сфері матеріалознавства та ливарного виробництва.

5. Структура за зміст дисертації, її завершеність та відповідність встановленим вимогам

Дисертаційна робота Щерецького О. А. складається з анотації, вступу, дев'яти розділів, висновків, списку літератури з 202 джерел, а також п'яти додатків. Роботу викладено на 456 сторінках, вона ілюстрована 180 рисунками, має 46 таблиць.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об'єкт і предмет роботи. Розкрито наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про особистий внесок здобувача, апробацію результатів і структуру дисертації.

У першому розділі проаналізовано сучасні підходи до зміцнення алюмінієвих і мідних сплавів, зокрема методи дисперсійного зміцнення та модифікування структури ультрадисперсними частинками. Обґрунтовано доцільність застосування стабільних нанорозмірних частинок як ефективних центрів гетерогенного зародкоутворення. Визначено основні проблеми — агломерацію частинок, їхню змочуваність розплавом та хімічну сумісність.

У другому розділі наведено технології синтезу субмікро- та нанорозмірних частинок (карбідів, оксидів, інтерметалідів), зокрема методи електричного вибуху провідників та електроіскрового диспергування. Детально описано формування мікро-наногранул як способу стабілізації частинок перед введенням у металевий розплав. Також наведено комплекс експериментальних методик дослідження (РЕМ, ПЕМ, XRD, СТА тощо).

У третьому розділі досліджено процес введення екзогенних ультрадисперсних частинок у розплави алюмінію та міді. Встановлено умови їх рівномірного розподілу, зокрема необхідність попередньої екструзії мікро-наногранул та витримки розплаву не менше 10 хв. Проаналізовано вплив карбідів (TiC, WC, MoC, ZrC) і оксидів на подрібнення зерна та формування мікроструктури.

Четвертий розділ присвячено CALPHAD-моделюванню фазових рівноваг у системах «металевий розплав – дисперсна частинка». Виконано розрахунки для промислових сплавів АК7, АК12, АД31 та порошку ПА4. Побудовано фазові діаграми взаємодії сплавів з частинками TiC, WC тощо. Встановлено області термодинамічної стабільності частинок та можливість утворення вторинних фаз.

П'ятий розділ присвячено дослідженню термічної стабільності оксидів, карбідів і інтерметалідів у різних газових середовищах. Визначено температурні області поліморфних перетворень і розкладу частинок.

Показано, що ZrO_2 є найбільш термостабільним, тоді як оксиди молібдену і вольфраму демонструють каскад фазових перетворень.

У шостому розділі наведено результати синхронного термічного аналізу для підтвердження розрахункових даних щодо фазових перетворень та стабільності частинок. Визначено області термодинамічної та кінетичної стабільності субмікро- та наночастинок у реальних умовах плавлення.

У сьомому розділі досліджено механічні властивості отриманих матеріалів. Наведено аналіз твердості, модуля пружності, межі міцності та пластичності для різних типів частинок. Показано, що карбіди забезпечують більш ефективне зміцнення порівняно з оксидами.

Восьмий розділ присвячено синтезу частинок безпосередньо в розплаві (in-situ), зокрема використанню цирконію та його солей для формування зміцнювальних фаз. Наведено результати мікроструктурного аналізу та механічних випробувань, включаючи дослідження композитів AA6016/ ZrB_2 після прокатки та FSP-обробки (тертям з перемішуванням). Показано істотне зростання міцності після термомеханічної обробки.

У дев'ятому розділі узагальнено прикладні результати роботи: створення композиційних лігатур, застосування частинок у адитивних технологіях, розробку композицій для триботехнічного призначення, а також рекомендації щодо впровадження розроблених технологій у промисловість.

Дисертаційна робота Щерецького О. А. написана у науковому стилі з застосуванням відповідної галузевої термінології, не містить ознак плагіату, оформлена у відповідності до вимог, наведених у Наказі МОН України «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» від 12.01.2017 №40 і являє собою завершене наукове дослідження.

6. Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення роботи полягає у створенні технологічних рішень, придатних для промислового впровадження. Розроблено методику отримання лігатур, що містять стабілізовані наночастинок. Це вирішує проблему їх агломерації та забезпечує рівномірне введення у розплав.

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 ендogenousними 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. Представлення результатів у публікаціях

Основні результати дисертаційної роботи представлені у 61 науковій публікації, з яких 13 статей у міжнародних журналах (що індексуються міжнародними наукометричними базами Scopus та WoS), 14 статей у фахових журналах, а також 1 патент України на винахід, 2 на корисну модель та 30 матеріалів міжнародних конференцій. Обсяг публікацій відповідає вимогам до докторських дисертацій.

8. Відповідність реферату змісту дисертації

Реферат повністю відображає структуру роботи; містить мету, задачі, новизну, методики; містить основні результати роботи, оформлений згідно з чинним вимогами. Автореферат повністю відповідає змісту дисертації.

9. Зауваження щодо дисертаційної роботи

1. Доцільно було б надати більш розгорнуту кількісну оцінку внеску дислокаційного зміцнення сплавів і композитів розробленими дисперсними частками.

2. Кінетичні аспекти взаємодії частинок з розплавом розглянуті стисло. Яким чином збільшується «живучість» і ефективність модифікування запропонованими дисперсними частками?

3. У роботі вивчалось одержання композитів з використання трьох технологій: лігатурного методу, теплової екструзії, вакуум-компресійного просочування. Який з цих методів пропонується як найбільш ефективний і економічно доцільний?

4. У ряді випадків бракує аналізу довготривалої термостабільності структур розроблених композитів.

5. В роботі відсутнє порівняння розробок із закордонними аналогами.

6. В тексті автореферату та дисертації є незначні похибки: використано різні температурні шкали ($^{\circ}\text{C}$ та K), використовуються терміни «відливка» або «вилівка» замість виливок (наприклад, С. 103).

Зроблені зауваження та побажання не мають принципового характеру до суті дисертації і не знижують її загальної позитивної оцінки.

10. Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам

В дисертаційній роботі Щерецького О. А. наведено результати виконаного на високому науковому рівні дослідження, які мають науковий та практичний інтерес. Дисертація є завершеним фундаментально-прикладним дослідженням, в якому: розширено уявлення про гетерогенне зародкоутворення в розплавах; встановлено закономірності міжфазної взаємодії частинок різного типу і природи з сплавами алюмінію та міді;

обґрунтовано умови застосування дисперсних частинок; створено нові композиційні матеріали; розроблено технологічні рішення для ливарного виробництва та адитивних технологій.

Висновок

Дисертаційна робота «Теоретичні та прикладні основи використання дисперсних частинок для керування структурою та властивостями сплавів і композиційних матеріалів» за актуальністю, ступенем обґрунтованості наукових положень, фундаментальною та практичною цінністю, обсягом та рівнем одержаних результатів, повнотою їх викладення в опублікованих працях є закінченою кваліфікаційною працею, яка відповідає вимогам МОН України щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук, а саме, 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. Робота включає раніше не захищені наукові положення і отримані автором нові науково-обґрунтовані результати в області металознавства та ливарного виробництва.

З урахуванням вищенаведеного вважаю, що її автор, Щерецький Володимир Олександрович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.04 – Ливарне виробництво.

Офіційний опонент:
 доктор технічних наук, доцент,
 завідувач кафедри машин і
 технології ливарного виробництва
 Національного університету
 «Запорізька політехніка»

Валерій ІВАНОВ

Підпис Валерія ІВАНОВА засвідчує
 учений секретар НУ «Запорізька політехніка»
 кандидат соціологічних наук, доцент



Віктор КУЗЬМІН