

ВІДГУК

офіційного опонента про дисертаційну роботу
Гайворонського Ігоря Володимировича
«СТУКТУРНО-ФАЗОВИЙ СТАН ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ
АЛЮМІНІЮ, ТИТАНУ ТА ЦИРКОНІЮ ПІСЛЯ ІМПУЛЬСНОГО
ЛАЗЕРНОГО ЛЕГУВАННЯ ПЕРЕХІДНИМИ МЕТАЛАМИ.»,
подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних
наук за спеціальністю 01.04.13 – фізики металів

1. Актуальність теми

Протягом останніх кількох десятиріч квазікристалічні сплави стали об'єктом фундаментальних і прикладних досліджень фізики твердого тіла, фізичного матеріалознавства та фізики невпорядкованих систем, насамперед завдяки новим цікавим явищам та ефектам, які виявляються в них, а також через те, що ці сплави володіють унікальними характеристиками, важливими для практичного застосування. Серед них особливий інтерес виявляють легкі сплави на основі Al та Ti в першу чергу завдяки їх практичному застосуванні у авіаційній промисловості, машинобудуванні, хімічному виробництві та електротехніці. Крім того вони виявляють і фундаментальний інтерес з точки зору фізики металів оскільки при зміні температури та складу в них проявляються нові цікаві фізико-хімічні явища та процеси.

Основною проблемою, яка обмежує використання таких сплавів є необхідність зміцнення алюмінію і зменшення крихкості титану. Існуючі традиційні методи хоча і до деякої міри дають можливість модифікувати ці сплави, але не до такої міри як вимагають сучасні потреби. Крім того, часто виникає необхідність зміцнити поверхневі шари і залишити без змін решту матеріалу. Методи дифузного насичення поверхні є відносно дорогими і не завжди є ефективними. Значно більші можливості дає метод лазерного легування. Однак механізм формування фаз, завдяки яким проходить зміцнення на сьогодні вивчений недостатньо. Особливо це стосується умов виникнення квазікристалічних структур та метастабільних інтерметалічних фаз і їх впливу на фізико-механічні властивості.

Зважаючи на сказане вище та враховуючи обмеженість експериментальних даних і теоретичних обґрунтувань у науковій літературі

щодо означеного автором об'єкта та предмета досліджень, можна стверджувати про безперечну актуальність даної дисертаційної роботи.

2. Зміст роботи, ступень обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій.

Здобувачем виконана сучасного рівня експериментальна робота із залученням добре апробованих експериментальних методів досліджень, нових методик інтерпретації результатів та способів покращення властивостей сплавів шляхом зовнішнього енергетичного впливу. Мета роботи відповідає актуальності теми і узгоджується з основними напрямками досліджень вітчизняної та світової науки.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків і переліку використаних літературних джерел. Загальний обсяг роботи - 152 сторінки. Вона містить 52 рисунки, 52 формули, 4 таблиці і список використаних джерел із 215 найменувань. Такі параметри роботи є оптимальними для повного і ґрунтовного представлення основних результатів.

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і завдання досліджень, наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, надано дані щодо апробації результатів досліджень та особистого внеску автора.

У **першому розділі** зроблено короткий літературний огляд основних публікацій, які стосуються квазікристалів та сплавів на їх основі. Розглянуто фізичні основи процесів формування квазікристалів і значну увагу зосереджено на швидке охолодження та швидкий нагрів, тобто на процеси далекі від рівноважних. Оскільки квазікристали володіють специфічною структурою, не характерною для інших кристалічних матеріалів, то стає зрозумілим, чому такі структури ще недостатньо вивчені. Автор детально аналізує існуючі на сьогодні представлення про структуру квазікристалів і розпочинає їх з модельних методів. Проведено класифікацію ікосаедричних фаз у двох- та трьохкомпонентних сплавах. Важливо відзначити, що автор намагається знайти у великій кількості публікацій саме ті, де відображені зв'язок структури з фізичними властивостями. Тут також показано як різні методи отримання квазікристалічних фаз дають змогу досягнути тих чи інших властивостей і якраз автор аргументовано доводить перспективність методу лазерної обробки матеріалів загалом і методу лазерного легування зокрема.

В окремому параграфі розглянуто основні результати дослідження структури квазікристалів. Описуючи характерні особливості різних сплавів, здатних до утворення квазікристалічних фаз, автор більше зосереджує увагу на сплавах Al-Cu-Fe та Ti-Ni-Zr, які вибрані ним для більш детального дослідження. Розглядаючи імпульсну лазерну обробку дисертантом чітко показано, що основні структурні та фазові перетворення, які відбуваються при нагріванні та охолодженні за далеких від рівноважних умов мають місце у приповерхневих шарах.

Результатом першого розділу є зроблений автором висновок про недостатнє розуміння фізичних явищ та процесів, які супроводжують умов їх виникнення, механізму утворення та стабільності.

Другий розділ дисертації присвячено методичним питанням роботи, які полягали у синтезі сплавів для дослідження, виборі методів дослідження, способів аналізу та інтерпретації отриманих даних. Слід відзначити, що досліджувані сплави характеризуються високою хімічною активністю і тому для розв'язання поставлених у меті роботи завдань дисертанту прийшлося провести значний об'єм досить складних експериментальних досліджень, які пов'язані з контролем якості синтезу зразків, дотриманні умов проведення експерименту, а також однозначністю інтерпретації отриманих результатів. Автор детально аналізує похибки визначення параметра кристалічної гратки, звертаючи особливу увагу на прецизійне знаходження положення дифракційних піків. З аналізу цього розділу видно, що автор аргументовано вибрал методи експериментальних досліджень і намагався глибоко проаналізувати отримані результати із використанням сучасних наукових поглядів та методів інтерпретації.

У третьому розділі розпочинається виклад основних результатів дисертаційної роботи. Тут представлено результати дослідження процесів фазоутворення в поверхневих шарах алюмінію після лазерного легування порошками міді та заліза. Встановлено, що після такого технологічного процесу відбувається формування гетерогенної композитної структури, основною складовою якої є ікосаедрична фаза. В роботі проведено дослідження залежності термічної стабільності такої структури залежно від параметрів лазерного легування. Важливим результатом є встановлення того, що суттєве покращення властивостей має місце не лише після лазерного легування, а також і в результаті подальших структурно-фазових перетворень, а саме

завдяки утворенню нових інтерметалічних фаз при відпалі. Заслуговує уваги поєднання даних Х-променевого фазового аналізу і даних металографії з результатами вимірювання залежності мікротвердості від глибини. Це дало змогу не лише значення товщини приповерхневого шару з модифікованою структурою і, як результат, з покращеними властивостями, а й визначити роль дифузійних процесів і механізм їх протікання на різних віддалях від активної зони взаємодії лазерного випромінювання з поверхнею сплаву.

Розділ завершується висновками, які коротко відображають його зміст. Заслуговує особливої уваги висновок про високу термічну стабільність \square -фази, при тривалих ізотермічних відпалах, навіть при температурах, близьких до температури плавлення основного компонента.

Четвертий розділ містить результати структурних досліджень лазерно-легованих сплавів системи Ti-Ni-Zr, в якій також можливе формування стабільної ікосаедричної фази. Встановлено, що після лазерного легування утворюються мікрообласті з відмінним між собою хімічним складом, а значить виникає нерівноважний стан з багатофазною структурою. Інтерпретація структурних даних, отриманих після лазерного легування проводилась з врахуванням структурного та фазового стану відповідних подвійних систем і особливо системи Ti-Zr. Слід відзначити, що легування проводилось у двох різних умовах: в середовищах повітря і аргону. Ефективність лазерного легування сплавів цієї системи підтверджена даними вимірювання мікротвердості, яка показала зростання у 5-6 разів порівняно з вихідним станом нелегованого цирконію.

Розділ завершується висновками, серед яких особливої уваги заслуговує твердження про те, що в зоні лазерного легування, окрім інтерметалічних сполук ще утворюються нітридні і карбідні фази, що пояснюється взаємодією елементів матриці з органічними сполуками зв'язуючої речовини обмазки. Це вказує на додаткові можливості поверхневого зміцнення титану та його сплавів шляхом лазерного карбідування та нітридування.

П'ятий розділ дисертації є заключний і він присвячений одній з фундаментальних проблем, які з'являються при вивченні ікосаедричних квазікристалів, а саме моделюванню оберненої гратки. Вершини ікосаедра задавались дванадцятьма вузлами, які були прийняті за вихідну структурну групу. Автором представлено детальні математичні перетворення, які дали змогу отримати загальний алгоритм побудови оберненої ікосаедричної гратки.

Важливо відзначити, що при побудові моделі методом розмноження модельних груп було встановлено кореляцію між само накладань вузлів та інтенсивністю рефлексів, отриманих експериментально.

Загальні висновки за результатами дисертаційної роботи відображають одержані автором результати, розкривають її наукову та практичну значимість.

Серед основних наукових результатів, одержаних в роботі, слід відмітити наступні.

1. Встановлено, що високі швидкості охолодження при імпульсній лазерній обробці литого сплаву квазікристалічного складу обумовлюють зростання кількості ікосаедричної фази в зоні оплавлення

2. Показано, що відпал лазерно-легованих сплавів системи Al-Cu-Fe супроводжується формуванням інтерметаліда Al_7Cu_2Fe в структурі зони лазерного легування, що обумовлює зростання середніх значень мікротвердості та їх вирівнювання за глибиною зони.

3. Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій.

Достовірність експериментальних результатів визначається сучасними методами експериментальних досліджень: X-промений фазовий аналіз, прецизійне вимірювання параметрів гратки, металографічний аналіз, метод растрової електронної мікроскопії і метод вимірювання мікротвердості. Для всіх цих методів оцінювалась похибка вимірювання і вишукувалися шляхи підвищення точності отриманих даних. Процедури розрахунків були достатньо фізично обґрунтовані і використовували добре апробовані математичні методи. Наведені в дисертаційній роботі результати узгоджуються з існуючими положеннями фізики квазікристалів та літературними даними.

4. Повнота відображення в опублікованих роботах наукових положень, висновків та результатів.

Основні результати дисертаційної роботи та сформульовані в ній висновки висвітлені у 5 статтях, 3 з яких індексовані і базі даних «Scopus», 1 патент на винахід і одна публікація в матеріалах конференції, індексованій в базі даних «Scopus» та у 7 тезах доповідей конференцій. Публікації відтворюють основний зміст дисертації, об'єм і характер досліджень.

5. Рекомендації по використанню результатів дисертації.

Результати дисертаційної роботи можна рекомендувати до використання організаціям та установам, які займаються створенням зносостійких покриттів на контактних ділянках сплавів на основі алюмінію, титану та цирконію в мавіабудуванні. Модель оберненої гратки ікосаедричного квазікристалу можна застосувати при індексації експериментальних електронограм від ікосаедричних фаз. Запропоновані методи, моделі можуть бути використані для подальших досліджень процесів фазоутворення в багатокомпонентних металічних системах.

6. Зауваження до змісту та тексту дисертації та автореферату.

Незважаючи на сукупність оригінальних і важливих результатів у опонента є ряд зауважень і побажань.

1. Дослідження проводились на сплавах технічної чистоти, в яких супутні домішки могли взаємодіяти між собою та з основними елементами, а тому цікаво було б спрогнозувати цей вплив у порівнянні зі сплавами високої чистоти..

2. У другому розділі вказано, що інтервал розмірів порошків був 25-50 мкм, але не вказано який розподіл за розмірами і як процес лазерного легування залежав від розміру частинок суміші.

3. При фазовому аналізі проводилось порівняння міжплощинних віддалей з еталонними значеннями, але не враховувались можливі зміни цих віддалей після лазерного легування.

4. Автором не зроблено ніяких припущення щодо частки та розміру пор, які виникали після релаксації напружень

5. Є деякі неточності оформлення дисертації. Наприклад, на рис. 3.16 та рис. 4.1 надписи зроблені англійською мовою.

Висновок

Наведені вище зауваження, зважаючи на кваліфікаційний характер дисертаційної роботи, не зменшують у цілому її високої оцінки. Дисертація є завершеним науковим дослідженням і містить результати, які є важливими для фізики металів. Вирішені в дисертації наукові задачі, обсяг достовірного експериментального матеріалу, рівень інтерпретації результатів, обґрунтованість наукових положень та практичних рекомендацій відповідають

вимогам до кандидатських дисертацій. Матеріали роботи досить повно відображені у провідних фахових наукових журналах, обговорювались на конференціях високого рангу та відомі спеціалістам. Автореферат адекватно відображає зміст дисертації і наукових праць, зазначених у посиланнях. Матеріали рецензованої дисертаційної роботи є новими й оригінальними.

На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертаційна робота Гайворонського Ігора Володимировича «Структурно-фазовий стан поверхневих шарів алюмінію, титану та цирконію після імпульсного лазерного легування перехідними металами» відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженному Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 569 зі змінами, затвердженими Постановами Кабінету Міністрів України № 656 від 19 серпня 2015 року та № 1159 від 30 грудня 2015 року, а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.13 – фізики металів.

Офіційний опонент

завідувач кафедри фізики металів

Львівського національного університету

Імені Івана Франка

доктор фізико-математичних наук,

професор

С.І.Мудрий

Підпис С.І.Мудрого підтверджую

Вчений секретар Львівського

національного університету

імені Івана Франка

доцент



О.С.Грабовецька