В І Д Г У К
офіційного опонента на дисертаційну роботу
Гайворонського Ігоря Володимировича
« Структурно-фазовий стан поверхневих шарів алюмінію, титану та цирконію після імпульсного лазерного легування перехідними металами»
на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.13. – фізика металів

Актуальність теми дисертації

У дисертаційній роботі І.В. Гайворонського знайшла вирішення наукова проблема щодо встановлення механізмів структуроутворення в поверхневих шарах алюмінію, титану та цирконію при лазерному легуванні сумішами порошків металів.

Алюміній та сплави на його основі, сплави на основі титану та цирконію досить важливі для практичного використання в різних галузях. На сьогодні області їх використання охвачують багато сфер людської діяльності, починаючи від побутових потреб та закінчуючи атомною енергетикою, авіаційною та аерокосмічною промисловістю. Хоча і номенклатура цих сплавів досить велика, але таке широке застосування завжди робить актуальною загальною задачею підвищення фізико-механічних характеристик виробів з цих сплавів та продовження строку їх експлуатації.

На сьогодні існують цілий ряд напрямків поліпшення характеристик таких сплавів. Серед цих методів заслуговують увагу методи модифікації, що досить часто дозволяють усунути негативні властивості такого матеріалу, зберігши основні переваги, і значно поліпшити їх експлуатаційні параметри. Серед таких методів відомі методи хіміко-термічної обробки, різноманітні методи створення покрить. Не зважаючи на певні досягнуті успіхи, такі методи мають ряд недоліків. Зокрема, при хіміко-термічній обробці зазвичай модифікація структури відбувається за рахунок впливу (зазвичай термічного) на весь об‘єм або значну його частину. Це не завжди є бажаним та і економічно оправданим. При створенні різного роду покриттів (газотермічними, плазмовим, хімічними методами) досить складно підібрати склад покриттів, який забезпечив надійне з‘єднання покриття з

виробом, особливо у випадку сплавів, поверхня яких пасивована природними оксидами, як у випадку алюмінію та титану.

Певні переваги в цьому відношенні має метод лазерного легування, який є високотехнологічним, відносно дешевим та простим у реалізації і дозволяє модифікувати як поверхню всього виробу, так і його окремі локальні ділянки. Активна взаємодія матричного матеріалу та складу легувальних сумішей в умовах локального нагрівання до високих температур при кристалізації розплаву може приводити до формування різного роду фаз, у тому числі аморфних та квазікристалічних, що можуть характеризуватися високими механічними параметрами. Крім цього, в ході такого легування при певних режимах лазерної обробки забезпечується високий ступінь адгезії матриці та обробленого шару. Досить важливим аспектом лазерного легування є можливість виконувати обробку без додаткових середовищ при охолодженні розплаву, а кристалізація досить часто призводить до утворення нерівноважних фаз, в тому числі і квазікристалічних, з високими механічними параметрами.

Оскільки метод лазерного легування є відносно новим, а у науковій літературі практично відсутні дані про формування структури титанових та цирконієвих сплавів при імпульсному лазерному легуванні, то встановлення механізмів структуроутворення в поверхневих шарах алюмінію, титану та цирконію при лазерному легуванні сумішами порошків металів є досить **актуальною задачею**, що вирішується у дисертаційній роботі Гайворонського І.В.

Робота виконана в рамках фундаментальних досліджень, які проводилися та проводяться на кафедрі фізики твердого тіла Запорізького національного університету в рамках держбюджетних тематик з 2010 по 2019 рік.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

Мета дисертаційної роботи полягала у встановлення механізмів структуроутворення в поверхневих шарах алюмінію, титану та цирконію при лазерному легуванні сумішами порошків металів, взятих у співвідношеннях, що

відповідають стехіометричним пропорціям компонентів для ікосаедричних фаз у системах Al-Cu-Fe та Ti-Ni-Zr.

Робота містить вступ, 5 розділів та додатків, викладених на 152 сторінках. Перелік посилань містить 215 найменувань.

У **вступі** обгрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання, перелічено методи досліджень, вказані наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, наведено інформацію про апробацію результатів дослідження, кількість публікацій за темою дисертації, структуру та обсяг роботи.

Перший розділ дисертаційної роботи являє собою огляд літературних даних, в якому виконано огляд сучасних уявлень про структуру, фізичні властивості та методи отримання квазікристалічних сплавів і матеріалів на їх основі. Розглянуто методики поверхневого зміцнення при поверхневій лазерній обробці металів і сплавів та лазерному легуванні поверхні металевих сплавів. На основі аналізу літературних даних показано, що за умов охолодження розплаву з високими швидкостями, які забезпечуються при імпульсній лазерній обробці, можуть створюватися умови для формування квазікристалічних фаз у поверхневих шарах матриці. При цьому в багатьох областях зони легування відбувається фіксація локальних ділянок з хімічним складом, який відповідає стехіометрії квазікристалічних фаз. Зазначено, що не достатньо вивченими залишаються питання про формування ікосаедричних фаз при імпульсному лазерному легуванні сплавів сумішами порошків перехідних металів, що і дало підставу для формування мети та завдань досліджень. Крім того, вимагають подальшого дослідження проблеми, пов’язані з моделюванням структури ікосаедричних квазікристалів, оскільки існує неоднозначність при індексуванні дифракційних максимумів від зазначеної фази.

У другому розділі дисертаційної роботи дано інформацію про матеріали, які піддані легуванню, та про легуючі компоненти, описано специфіку методу лазерного легування та описано методики експериментальних досліджень

властивостей одержаних об‘єктів: рентгенівська дифракція, оптична та растрова мікроскопія, мікротвердість. Використаний в роботі комплекс металофізичних методів досліджень є достатнім для отримання достовірних експериментальних даних, які відповідають поставленим в роботі задачам.

У **третьому розділі** наведено результати досліджень особливостей формування структури технічного алюмінію А8 при лазерному легуванні сумішшю порошків міді та заліза. Показано, що в зоні лазерного легування фіксується гетерофазна структура, однією із складових якої є квазікристалічна ікосаедрична ψ-фаза. Пояснено підвищення середніх значень мікротвердості в зоні легування одночасною дією декількох факторів: збільшення ступеня дисперсності структури, утворенням інтерметалідних фаз, включаючи ікосаедричну фазу, та формуванням твердого розчину в гратці алюмінію. Досліджено термічну стійкість фазового складу зони лазерного легування. Встановлено, що ікосаедрична ψ-фаза є термічно стабільною до температури плавлення алюмінієвої матриці. Додаткове зростання середніх значень мікротвердості при тривалих відпалах зони лазерного легування обумовлено збільшенням кількості інтерметалідів за рахунок гомогенізації структури за хімічним складом. Виявлено вплив імпульсної лазерної обробки в режимі оплавлення поверхні на структуру сплаву системи Al-Cu-Fe. Отримані результати пояснені з використанням ізотермічних перерізів діаграм фазової рівноваги даної системи сплавів при різних температурах.

У четвертому розділі було проаналізовано можливість формування ікосаедричної фази у системі Ti-Ni-Zr методом лазерного легування. Досліджувалося формування фазового складу поверхневих шарів титану та цирконію після лазерного легування сумішами порошків перехідних металів (Zr + Ni та Ti + Ni, відповідно). При різних співвідношеннях між металами у легувальній суміші фіксувалося формування в структурі зони лазерного легування інтерметалідних фаз, серед яких і кубічної апроксиманти ікосаедричної фази. Виявлено, що імпульсне лазерне легування в системі сплавів Ti-Ni-Zr не

приводить до формування ікосаедричної ψ-фази при всіх застосованих режимах обробки. Основною причиною цього вказується недостатність енергетичних параметрів використаного імпульсного лазера для досягнення концентраційно-кінетичних умов у зоні лазерного легування, необхідних для формування ікосаедричної фази, на що вказує наявність кубічної фази-апроксиманти. Запропоновано новий спосіб поверхневого зміцнення титанових сплавів, який полягає в нанесенні легувальних органічних сумішей на зразок виробу та подальше імпульсне лазерне оплавлення поверхні.

П'ятий розділ присвячено побудові моделі оберненої квазікристалічної ікосаедричної гратки методом розмноження груп точок, утворених кінцями базисних векторів. Перерізи тривимірної моделі було співставлено з експериментальними електронограмами від ікосаедричних фаз. Виявлено кореляцію між кількістю накладань точок, отриманих в процесі моделювання, та інтенсивностями відповідних рефлексів на експериментальних електронограмах. Встановлену кореляцію інтерпретовано з точки зору ймовірності потрапляння вузлів високовимірної гратки в проекційну область при генерації груп точок, утворених кінцями базисних векторів.

Наприкінці оригінальних розділів наведено 6 загальних висновків, у яких відображено усі найбільш значущі результати роботи.

Знайомство з оригінальними результатами дисертаційної роботи дозволяє сформулювати положення, які визначають її **наукову новизну**:

1. Вперше виявлено, що ікосаедрична ψ-фаза є термічно стабільною при тривалій термічній дії відпалів зони лазерного легування в структурі лазерно-легованих сплавів Al-Cu-Fe до температури плавлення алюмінієвої матриці.
2. Запропоновано спосіб лазерного зміцнення поверхневих шарів титанових сплавів, який здійснюється лазерним оплавленням поверхні з органічним покриттям, що обумовлює формування карбідів та нітридів титану в зоні лазерної дії.

3. Вперше метод розмноження груп точок, утворених кінцями базисних векторів, було використано для побудови моделі оберненої гратки квазі-кристалічної ікосаедричної фази та використано її перерізи для ідентифікації дифракційних рефлексів від ікосаедричних фаз.

Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій.

Достовірність експериментальних результатів визначається використанням сучасних добре відомих структурних методів досліджень: XRD-методу, оптичної металографії, електронної мікроскопії, дюрометричному аналізі. Також у роботі було використано комп'ютерне моделювання.

Наведені в дисертаційній роботі результати узгоджуються з існуючими положеннями фізики металів та літературними даними.

Повнота відображення в опублікованих роботах наукових положень, висновків та результатів

Основні результати дисертаційної роботи та сформульовані в ній висновки висвітлені у 5-ти статтях у виданнях України та інших країн (3 з яких індексовані в наукометричній бази даних Scopus), одному патенті на винахід, одних матеріалах конференції, індексованому в Scopus та 7 тезах доповідей конференціям. Публікації відтворюють основний зміст дисертації, об'єм і характер досліджень.

Рекомендації по використанню результатів дисертації.

Одержані результати можна рекомендувати до використання організаціям та установам, які займаються розробкою та виробництвом захисних покриттів для деталей у авіа- та автомобіле- будуванні та при виготовленні захисних оболонок в активній зоні реактора в ядерній енергетиці. Розроблену модель оберненої гратки ікосаедричного квазікристалу можна використовувати при дифрактометричних дослідженнях для індентифікації ікосаедричних фаз на експериментальних електронограмах та дифрактограмах.

Результати роботи можна використовувати в навчальному процесі навчальних закладів, що вивчають структуру некристалічних матеріалів та дифракційні методи їх досліджень.

Зауваження до змісту та тексту дисертації та автореферату.

Незважаючи на сукупність оригінальних і важливих результатів до роботи є ряд зауважень і побажань.

1. Як на мій погляд, літературний огляд слід було б починати з особливостей лазерної обробки та легування, оскільки назва роботи та її мета не містять напряму задач, пов‘язаних з формуванням квазікристалічних фаз. Останні є бажаним результатом такої роботи. Але вони не обов‘язково могли б сформуватися при такій обробці, хоча саме лазерне легування могло б призвести до утворення структурно-фазвого стану, що значно поліпшив параметри сплавів.

2. У дисертації вказується, що збільшення ступеня дисперсності структури при імпульсній лазерній обробці й лазерному легуванні має приводити до підвищення рівня механічних властивостей. При цьому, автор обмежився лише вимірюванням середніх значень мікротвердості за глибиною зони легування. Проте, навіть метод мікротвердості дає можливість досліджувати тріщиностійкість, яка є досить важливим параметром поверхневих шарів. Дослідження зносостійкості, корозійної стійкості, адгезії дало б більш цілісне уявлення про вплив нерівноважної кристалізації на фізико-механічні властивості досліджених металевих систем.

3. Експериментальні дифрактограми, на яких стрілками відзначені індекси площин для наявних в структурі фаз, слід було доповнити таблицями з інформацією про міжплощинні відстані, відносні інтенсивності та з інформацією про наявність чи відсутність кожної фази, а якщо на одному рисунку присутні дифрактограми з відмінним фазовим складом.

4. В роботі не досить чітко визначені проблеми формування квазікристалічної фази при використанні методу лазерного легування в системі Ti-Ni-Zr.

5. Робота містить деяку кількість недоліків редакційного характеру. Зокрема, наприкінці першого розділу десь загубилося посилання на [190], яке присутнє в списку використаних джерел та інші.

Висновок.

Проте, зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи Гайворонського І.В. Матеріали роботи досить повно відображені у провідних фахових наукових журналах, обговорювались на конференціях високого рангу та відомі спеціалістам. Без сумніву, вона представляє собою завершену кваліфікаційну працю, яка базується на значному об'ємі експериментального і теоретичного матеріалу, важливості, надійності та коректності отриманих результатів. Автореферат адекватно відображає зміст дисертації та наукових праць, зазначених у посиланнях. Матеріали дисертаційної роботи є новими й оригінальними. Вважаю можливим класифікувати подану до захисту дисертацію як закінчене та самостійне наукове дослідження, яке свідчить про високу кваліфікацію автора.

Сказане вище дає підстави для висновку, що дисертаційна робота **Гайворонського Ігоря Володимировича** «Структурно-фазовий стан поверхневих шарів алюмінію, титану та цирконію після імпульсного лазерного легування перехідними металами» відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженому 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 – фізика металів.

Доктор фіз.-мат. наук, професор,
професор кафедри фізики металів
фізичного факультету Київського
національного університету
імені Тараса Шевченка М.П. Семенько

Підпис засвідчую
Вчений секретар
Карауляна Н.В.
02.10.2019