

ВІДГУК
офіційного опонента на дисертаційну роботу
Єфімова Миколи Олександровича
“Фізичні засади зміцнення сплавів алюмінію та покриттів,
що містять квазікристали систем Al-Fe-Cr і Al-Cu-Fe”,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних
наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла

1. Актуальність теми дисертації

Алюміній та сплави на його основі завдяки малій густині та доступності сировини досить широко застосовуються в сучасній промисловості. Недолік таких матеріалів пов'язаний з досить низькою температурою топлення алюмінію та його малою міцністю. Частково ця проблема вирішується шляхом використання різних сплавів на основі алюмінію та застосуванням різних зміцнювальних добавок. В цьому відношенні досягнуто значного успіху, але проблематика поєднання малої густини алюмінієвих сплавів із високою міцністю, зносостійкістю та стабільністю в умовах підвищених температур і складних навантажень залишається ще відкритою. Робота спрямована на формування фізичних засад зміцнення алюмінієвих сплавів та покриттів за рахунок стабільних і метастабільних квазікристалічних фаз систем Al-Fe-Cr і Al-Cu-Fe. Автор переконливо обґрунтовує, що квазікристали, завдяки високій твердості, модулю пружності та низькому коефіцієнту тертя, є ефективними зміцнювачами як у масивних сплавах, так і в покриттях та композитних шарах. Важливо, що актуальність підкріплена не лише широкими промисловими запитам (авіація, машинобудування, моторобудування), а й чітко сформульованою науковою проблемою — розвинути фундаментальні фізичні уявлення стосовно механізму деформації квазікристалів на основі сплавів алюмінію як наукової основи для створення високоефективних сплавів, покриттів та композитних матеріалів з широким спектром службових характеристик.

Використання квазікристалічних фаз як зміцнювальних елементів відкриває нові можливості для створення матеріалів із поєднанням високої міцності, низької густини та стабільності властивостей у широкому температурному діапазоні. Для досліджень автор обрав квазікристали систем Al-Fe-Cr і Al-Cu-Fe, які поєднують доступність компонентів, задовільні технологічні характеристики та перспективні фізико-механічні властивості.

Саме ці задачі, важливі як з наукової, так і практичної точки зору, розв'язує дисертаційна робота М.О. Єфімова. Тому *актуальність* теми даної роботи не викликає сумнівів.

2. Структура та обсяг роботи.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 316 найменувань та додатку.

Повний обсяг дисертації становить 372 сторінок та містить 188 рисунків та 45 таблиць.

У вступі показана актуальність теми дисертаційної роботи, її зв'язок з науковими тематиками, наведено мету, основні задачі дослідження в також наукову новизну та практичну цінність результатів. У першому розділі наведено огляд сучасної наукової літератури, що стосується квазікристалів. У другому розділі описано методи отримання квазікристалів на основі систем Al-Cu-Fe та Al-Fe-Cr, наведено основні методи дослідження структури та механічних характеристик. У третьому розділі подано результати досліджень механічної поведінки ікосаедричних квазікристалів системи Al-Cu-Fe з застосуванням методик ідентифікації. У четвертому розділі автор наводить результати дослідження структури та механічних властивостей сплавів системи Al-Fe-Cr зміцнених наноквазікристалічними частками. П'ятий розділ присвячено дослідженню структури та механічних властивостей покриттів на основі стабільних квазікристалів системи Al-Cu-Fe(Sc). Шостим розділом визначаються фізичні основи формування приповерхневих композитних шарів зміцнених частками квазікристалів системи Al-Cu-Fe в алюмінії та сплаві АМг6.

Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації. В ньому викладені мета та задачі дослідження, наукова новизна отриманих результатів, методики досліджень, основні результати та висновки. Автореферат оформлений належним чином.

3. Публікації.

Матеріали дисертації повною мірою викладено у 68 публікаціях, з яких 21 стаття, 32 тези доповідей на міжнародних і українських наукових конференціях та 2 статті в Енциклопедії Сучасної України та Збірнику «Наука про матеріали: досягнення та перспективи».

4. Наукова новизна

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у цілісному експериментально-теоретичному дослідженні механічної поведінки ікосаедричних квазікристалів системи Al-Cu-Fe та у встановленні ролі нано квазікристалічних частинок у зміцненні сплавів Al-Fe-Cr. Вперше на основі мікроідентифікації в широкому температурному діапазоні показано, що твердість квазікристалів зберігається на плато до $\sim 600^\circ\text{C}$, а далі різко знижується, тоді як характеристика пластичності δ_H досягає порогових значень ($\sim 0,9$), що корелює з появою макропластичності. Узгоджено температурну залежність модуля Юнга для квазікристалів Al-Cu-Fe з універсальними закономірностями для ковалентних та іонно-ковалентних кристалів. Для сплавів Al-Fe-Cr встановлено критичний вплив структурного стану зміцнюючих частинок на рівень пластичності: за однаковим хімічним складом частинок (квазікристал/кристалічний інтерметалід) рівень пластичності кардинально відрізняється, що автор пов'язує з механікою міжфазних границь і впливом фазонних дефектів на процеси генерації дислокацій. Запропоновано фізичну

модель локальної деформації навколо нано-квазікристалічних зміцнюючих частинок з можливим перехідним шаром-апроксимантом, що призводить до релаксації напружень.

Новизною роботи було визначення режимів високошвидкісного повітряно-паливного напилення квазікристалічних покриттів в температурному діапазоні поблизу $0,85 T_{пл}$, що дозволило зберігати квазікристалічну структуру порошків в покриттях та підвищити адгезійну міцність покриттів.

В роботі вперше досліджено поверхневі шари з квазікристалічних порошків $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$ (в якості зміцнюючої фази) на алюмінії та сплаві АМг6, що були модифіковані ультразвуковою ударною обробкою. Доведено, що квазікристалічні зміцнюючі частинки діють в якості додаткових джерел дислокацій, сприяють збільшенню щільності дислокацій та утворенню дислокаційних комірок. Отримані композитні шари мають підвищений рівень твердості та досить високий рівень внутрішніх стискаючих напружень, що сприяє підвищенню опору зносу модифікованої поверхні.

5. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.

Дисертацію М.О. Єфімова було виконано відповідно до тематики наукових досліджень відділу фізики високоміцних та метастабільних сплавів Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України. Дослідження було проведено в рамках виконання низки наукових тем відомчого замовлення, різного роду вітчизняних конкурсних тематик та декількох міжнародних проектів.

6. Теоретична та практична цінність одержаних результатів

Теоретична важливість роботи полягає в розвитку уявлень про дислокаційно-фазову взаємодію та визначенні критерію переходу до макропластичності в досліджених квазікристалах. В роботі показано, що міцність сплавів алюмінію, зміцнених нано-квазікристалічними частинками обумовлена поєднанням високої твердості та високим модулем пружності квазікристалів, високою об'ємною часткою наноквазікристалічних зміцнюючих частинок в алюмінієвій матриці; додатковим зміцненням матриці за рахунок здрібнення зерен матриці $\alpha-Al$ до розмірів 200–500 нм в результаті деформації та розчинення легуючих елементів у твердому розчині; наявністю певної кількості твердих оксидів в матриці алюмінію.

Практична важливість роботи полягає в отриманні методом високошвидкісного повітряно-паливного напилення покриттів зі збереженням квазікристалічної фази, які мають високу твердість (до 7 ГПа), високу адгезію до підкладки (до 26,7 МПа при випробуваннях на відрив), низьку поруватість (5-7 %) та підвищену зносостійкість. Показано, що за 300 °С розроблені сплави перевищують відомі деформівні аналоги за міцністю, що відкриває шлях до застосувань у вузлах з підвищеними температурами та тертям.

7. Достовірність та надійність отриманих результатів.

Достовірність та надійність отриманих результатів підтверджена проведенням систематизованих експериментів, використанням обґрунтованих експериментальних методик та взаємодоповнюючих методів досліджень мікроструктури, хімічного і фазового складу матеріалів, їх механічних характеристик, а також співставленням власних результатів з наявними літературними даними.

8. Особистий внесок здобувача.

Особистий внесок здобувача у виконання даного дослідження полягає в постановці та самостійному проведенні експериментів, отриманні значної кількості експериментальних даних, активній участі в їх аналізі і систематизації та написанні публікацій.

9. Недоліки та зауваження

Зазначаючи на великий обсяг проведених досліджень і кваліфікований виклад результатів, потрібно зауважити, що дисертація має ряд недоліків, які заслуговують на обговорення.

1. Отримана емпірична температурна залежність модуля Юнга квазікристалу Al-Cu-Fe у вигляді поліному другого ступеня (рівн. (3.5)) хоча і подібна до раніше отриманих температурних залежностей модуля Юнга для ковалентних та іонно-ковалентних кристалів, боридів, карбідів, композитів та металів (рівн.(3.4)) не може бути однозначним аргументом того, що зв'язок в квазікристалах має переважно ковалентний характер. Це також знаходить протиріччя з попереднім твердженням автора, що залежність $E(T)$ на рис.3.26 подібна за формою до температурних залежностей модуля Юнга металів (стор.156).
2. Поняття «квазікристалічної фази» й «кристалічної» фази використовуються в тексті без достатніх пояснень. Зокрема, твердження про зміну типу ґратки зміцнюючих частинок потребує уточнення – бажано вказати, про яку саме фазу йдеться.
3. Автор констатує, що плазмові та детонаційні покриття з порошків Al-Cu-Fe мають ламелярну будову з прошарками оксидів. Однак у тексті не приділено уваги тому, як ці оксиди впливають на властивості покриттів. В роботі варто було б обговорити, чи знижує оксидна фаза міцність або твердість покриттів і наскільки саме покриття, нанесені методом високошвидкісного повітряно-паливного напылення, виграють за рахунок відсутності оксидів та збереження фазового складу, аби повніше обґрунтувати переваги такого методу напылення.
4. В дисертації вжито термін «макропластичність», однак його значення не роз'яснено належним чином. Слід дати коротке визначення, що мається на увазі під макропластичністю квазікристалів.
5. Частина результатів, які було отримано в дисертації стосується квазікристалів системи Al-Cu-Fe легованих Sc. Проте в дисертації не

висвітлено на які саме властивості (міцність, термостабільність, зносостійкість) впливає легування скандієм.

6. У тексті дисертації зустрічаються орфографічні помилки, стилістичні огріхи та неточності, так, наприклад, у розділі 4 автор наводить пластичність сплавів Al-Fe-Cr як «5–8 % мас.» при кімнатній температурі (с. 198), що є некоректним позначенням для відносного подовження.

Проте, вище наведені зауваження не знижують цінності основних наукових результатів роботи, і не є принциповими по відношенню до основних висновків.

Вважаю, що дисертація Єфімова М.О. «Фізичні засади зміцнення сплавів алюмінію та покриттів, що містять квазікристали систем Al-Fe-Cr і Al-Cu-Fe» за **актуальністю, науковому вмісту, достовірністю, новизні наукових і практичних результатів** відповідає всім вимогам МОН України до докторських дисертацій її автор, Єфімов Микола Олександрович заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри фізики металів фізичного
факультету Київського національного
університету імені Тараса Шевченка

Михайло СЕМЕНЬКО

26.08.2025

Підпис Семенька М. засвідчую

Проректор з науково-педагогічної роботи

(Гуманітарні питання)

Тарас КОМПАНЕЦЬ

