

## **РЕЦЕНЗІЯ**

доктора ф.-м. наук, професора Малихіна С.В.

на дисертаційну роботу **Рябоштана Валентина Анатолійовича**  
**«Термічна стабільність нано- та мікрокристалічних псевдосплавів  
на основі міді»**

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 132 – Матеріалознавство

### **1. Актуальність теми**

Дисертаційна робота Рябоштана В. А., присвячена дослідженню особливостей формування мікро- та нанокристалічних матеріалів вакуумних конденсатів міді з низькою концентрацією легуючого елемента (молібден/тантал) та їх структурного стану, а також вивченню термічної стабільності структури та механічних властивостей. Саме стабільність є актуальною проблемою для всіх дисперсних сплавів та композиційних матеріалів. Розширення температурно-часових інтервалів стабільності структури і відповідних фізико-механічних властивостей вказаних структур є одним із головних завдань сучасного матеріалознавства.

Перспективним напрямком розв'язання цієї проблеми є розробка технологій одержання так званих псевдосплавів: - композитів, що складаються з компонентів, які не мають взаємної розчинності і хімічних сполук у рівноважних умовах. У цьому сенсі дисертант вважає за необхідне вивчення псевдосплавів міді з домішками танталу та молібдену у кількості до декількох відсотків. Основною робочою гіпотезою здобувача є те, що нерозчинні домішки в кількості, недостатній для утворення власної фази, сегрегуються на границі зерен та впливатимуть на стабільність усєї структури на наноструктурному рівні. Попередні дослідження показують значне підвищення термічної стабільності псевдосплавів міді, отриманих методом вакуумної конденсації. Тому вивчення впливу домішок та їх взаємодії з матричним металом безумовно є перспективним напрямом досліджень.

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

Дисертація виконувалась відповідно до наукової програми 132 «Матеріалознавство» в наступних держбюджетних темах: «Розробка матеріалознавчих основ структурної інженерії на основі Cu і Al» (ДР № 0119U002567), «Підвищення характеристик виробів військового призначення шляхом аналізу та синтезу властивостей матеріалів на основі мікроструктурних моделей» (ДР № 0117U004970), яка була впроваджена на кафедрі матеріалознавства навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту НТУ «ХП».

## **3. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації**

Робота Рябоштана В.А. є завершеною науковою роботою, містить дві анотації – українською та англійською мовами, вступ, шість розділів, висновки, список літератури і додаток.

Дисертація присвячена дослідженню механізмів формування зернограничних сегрегацій легуючих елементів, їх зв'язку з матричним металом та факторів, що забезпечують найбільший вклад в супротив температурному впливу.

Об'єктом дослідження є процеси та явища, що призводять значного підвищення термічної стабільності та механічних властивостей у системах Cu-Mo та Cu-Ta, при вмісті легуючого компонента в діапазоні від 0,1 до 2,5 ат%.

У роботі виконано дослідження умов формування аномальних пересичених твердих розчинів у фольгах мідь - молібден (мідь-тантал) при конденсації із парової фази. На основі отриманих даних запропоновано механізм, за яким відбувається формування пересиченого розчину. Експериментально встановлено, що температура і часові інтервали для їх розпаду набагато вищі, ніж для аналогічних процесів в інших сплавах на основі міді. Показано, що розпад твердого розчину може відбуватись у дві стадії при різних температурах відпалу і супроводжується піками підвищення твердості.

Другий пік твердіння здобувач пов'язує з характером взаємодії нерозчинних домішок та границь зерна матричного металу.

Велика частина роботи стосується формуванню сегрегацій молібдену та танталу на границях зерен мідної матриці та їх впливу на структуру і її властивості. В роботі запропоновані умови утворення зернограничних сегрегацій та закономірності їх руйнування під впливом температури. Розглядаються два найвірогідніші механізми супротиву зростанню зерна матриці: кінетичний (піннінг Зіннера) та термодинамічний. Результати показують, що температура початку росту зерен мідної матриці лімітується не механічною дією частинок молібдену або танталу, а руйнуванням адсорбційних шарів домішок атомарної товщини. Також показано, що частинки другої фази навіть після відпалу при високій температурі зберігають певну структурну відповідність у вигляді часткової когерентності, а термічна стабільність таких матеріалів зумовлена спільним вкладом як термодинамічного, так і кінетичним механізмами.

*Висновки*, сформульовані у роботі, висвітлюють результати дослідження як вирішення висунутих в дисертації завдань. В цілому висновки відповідають вимогам, які висуваються до результатів дисертаційного дослідження на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

*Список літератури* досить широко охоплює предметне поле дослідження, певною мірою відображає опрацювання автором значної кількості вітчизняних та іноземних джерел матеріалознавського змісту, деяких наукових робіт, присвячених композиційним та наноматеріалам.

*Додаток* містить інформацію про практичне впровадження результатів дисертації.

#### **4. Наукова новизна одержаних результатів**

Здобувачем зафіксовано низку нових явищ під час експерименту та висунуто ряд тез, що пояснюють ці явища. На основі експериментальних

результатів проведено моделювання фізичної взаємодії між атомами легуючого компоненту та поверхнею зерна матричного металу.

Зафіксовано, що молібден і тантал залежно від технологічних умов одержання конденсатів проявляють 1) схильність до формування зернограничних сегрегацій, та 2) до формування аномальних пересичених розчинів у міді з ГЦК кристалічною решіткою. Встановлено, що ступінь розчинності збільшується з підвищенням концентрації легуючого елементу, швидкості осадження та із зниженням температури підкладки. Запропоновано якісний механізм утворення цих розчинів. Він полягає у кінетичному захваті атомів легуючого елементу фронтом кристалізації під час сумісної конденсації у вакуумі із парової суміші. Виявлено температурно-часові інтервали розпаду розчинів, початок яких значно вище, ніж інтервали аналогічних процесів в масивних сплавах на основі міді. Показано, що старіння може мати двоетапний характер.

Виявлено, що когерентний зв'язок між матричним металом та частинками легуючих елементів, що був утворений під час формування вихідної структури, зберігається навіть після відпалу при температурах, близьких до температури плавлення міді. Вперше виявлено ефект спадковості у відпаленій структурі досліджуваних матеріалів у вигляді ділянок, вільних від частинок другої фази.

Встановлено, що осадження у вакуумі при більш низькій температурі стимулює адсорбційні процеси і формування атомарно розподілених атомарно распределених шарів легуючих елементів на границях зерен матричного металу, що вносить вагомий вклад у гальмування руху границі зерна, знижуючи їх поверхневу енергію.

Виявлено, що температура початку росту зерен мідної матриці лімітується не механічною дією частинок молібдену або танталу (механізм Зіннера), а руйнуванням атомно розподілених адсорбційних шарів домішок. Встановлено, що частинки другої фази зберігають певну структурну відповідність у вигляді часткової когерентності навіть після відпалу за високої температури.

## **5. Достовірність отриманих результатів та висновків**

Достовірність отриманих результатів зумовлено поставленими метою та завданнями, а також використанням відповідної методології дослідження. Крім того, достовірність заявлених положень обґрунтовується комплексним підходом у вивченні визначеного об'єкта, що також зумовлює і низку певних методів, які були використані в процесі дослідження.

## **6. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання**

Отримані результати є важливим доповненням у розуміння процесів, що відбуваються при формуванні структури та фізико-механічних властивостей псевдосплавів одержуваних різними технологіями. Показано, що термічна стабільність отриманих матеріалів набагато вища за термічну стабільність інших зразків на основі міді. Тобто на практиці ці знання можна використати для підвищення температури початку рекристалізації нано- і субмікрокристалічних металів. Окрім того дослідження формування й розпаду аномальних пересичених розчинів танталу та молібдену у міді показують перспективу отримання дисперсно зміцнених композиційних матеріалів такого складу.

## **7. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладення наукових положень та результатів в опублікованих працях**

Дисертація виконана з дотримання вимог академічної доброчесності, отримані результати дають підстави говорити про оригінальність роботи. У тексті містяться авторські ідеї, і не виявлено використання ідей інших науковців без посилання на їх роботи.

Основні ідеї автора та результати дослідження викладено у двох фахових статтях, двох закордонних статтях, а також дисертант активно приймав участь в

українських та закордонних конференціях, де була проведена апробація ідей, що викладено у дисертаційному дослідженні.

## **8. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи**

1. Дослідження впливу механізму гальмування границь зерен Зіннера потребує більш поглибленого аналізу.

2. Роботу можна доповнити вивченням впливу на структуру матричного металу інших нерозчинних у міді тугоплавких елементів.

3. Представлення деяких експериментальних результатів потребує більш наглядних графічних інтерпретацій.

4. Подекуди помітно не вистачає досліджень структури у деяких температурних режимах.

Тематика потребує подальших досліджень як для подолання зауважень та недоліків, представлених вище, так і через загальну перспективність напрямку. Існуючі недоліки не роблять роботу менш значущою, менш оригінальною та не знижують цінність наукового дослідження.

## **9. Висновки**

Дисертаційна робота Рябоштан В.А. є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить науково-обґрунтовані результати, має наукову новизну та дає перспективи подальших досліджень. Тема дослідження відповідає галузі знань 132 – «Матеріалознавство» та спеціальності 13 – «Механічна інженерія». Отже, враховуючи актуальність теми, отримані результати та певну практичну значущість вважаю, що дисертаційна робота Рябоштана Валентина Анатолійовича «Термічна стабільність нано- та мікрокристалічних псевдосплавів на основі міді» відповідає вимогам 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради Закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12.01.2022 р. № 44 та вимогам до оформлення дисертації МОН України від 12.01.2017 № 40, а сам автор,

Рябоштан Валентин Анатолійович, заслугоує присудження йому наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 132 «Матеріалознавство».

Рецензент – доктор фізико-математичних наук, професор,  
завідувач кафедри фізики металів та напівпровідників

Національного технічного університету  
«Харківський Політехнічний Інститут»



Сергій МАЛИХІН

Підпис *проф. Сергій Малихін*  
ЗАСВІДЧУЮ:  
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР  
НАЦІОНАЛЬНОГО-ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"  
"25" 01 2024 р.

ЗАЙЦЕВ Ю. І.