

До разової спеціалізованої ради ДФ 35.051.118  
Львівського національного університету  
імені Івана Франка  
м. Львів, вул. Університетська, 1

## **ВІДГУК**

офіційного опонента, доктора фізико-математичних наук, завідувача відділу  
фізико-математичного моделювання низьковимірних систем Інституту  
прикладних проблем механіки і математики імені Я.С. Підстригача

### **Поповича Дмитра Івановича**

на дисертаційну роботу Ємельянченка Владислава Васильовича  
«Формування високоентропійних сплавів в умовах швидкого охолодження  
розплаву при лазерному легуванні металів», представлену на здобуття ступеня  
доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю  
105 Прикладна фізика та наноматеріали

### **1. Актуальність теми дисертаційного дослідження**

Високоентропійні сплави є відносно новим класом металевих сплавів що викликають підвищену зацікавленість в останні роки. Такі сплави є комбінацією декількох елементів, переважно не менш як п'яти, змішаних у приблизно рівних атомних пропорціях. В цьому випадку ентропія змішування елементів розплаву набуває максимального значення і її вклад перевищує ентальпію утворення певних дво- та трьохкомпонентних інтерметалічних фаз. Як наслідок, у багатьох випадках при кристалізації ВЕСів утворюються лише прості тверді розчини заміщення на основі ГЦК та ОЦК ґраток. Крім високої міцності ВЕСи характеризуються високою твердістю в литому і відпаленому станах. Для цього класу сплавів характерні термостабільність структури, властивостей та висока зносостійкість.

Одним з можливих потенційних застосувань ВЕСів є їх використання в якості захисних покриттів з підвищеними фізико-механічними властивостями. Серед відомих методів одержання таких покриттів найбільш перспективним та технологічним є лазерне легування. Треба зазначити, що у науковій літературі досліджень процесів фазоутворення ВЕСів у нерівноважних умовах ще недостатньо, зокрема мало досліджень, які б враховували характерний для лазерного легування гетерогенний характер процесів зародкоутворення і кристалізації.

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 дисертаційної роботи.

**Мета дослідження** – експериментальне дослідження структурно-фазового стану високоентропійних сплавів систем Co-Cr-Fe-Ni, Al-Co-Cr-Fe-Ni, Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni одержаних за допомогою лазерного легування поверхневих шарів технічно чистих алюмінію та заліза еквіатомними сумішами порошків перехідних металів; розрахунок температурних залежностей часу гетерогенного зародкоутворення у високоентропійних сплавах систем Al-Co-Cr-Fe-Ni та Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni; моделювання процесів гетерогенної кристалізації у високоентропійних сплавах системи Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni.

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

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі загальної та прикладної фізики Запорізького національного університету та на кафедрі фізики металів Львівського національного університету імені Івана Франка. Значну частину результатів виконано в рамках виконання робіт з держбюджетних тем: «Формування дисперсних квазікристалічних та кристалічних фаз в умовах нерівноважної кристалізації при лазерному легуванні металевих сплавів» (2017-2019 рр., № держреєстрації 0117U000511) та «Оптимізація фізичних властивостей нанокompозитів на основі металевих евтектик для безсвинцевих припоїв» (2022-2023 рр., № держреєстрації 0122U001521).

## **3. Наукова новизна одержаних результатів**

Автором вперше експериментально досліджено структурно-фазовий стан покриттів з високоентропійних сплавів систем Co-Cr-Fe-Ni, Al-Co-Cr-Fe-Ni, Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni одержаних методом лазерного легування на поверхні технічно чистого заліза та алюмінію. Теоретично розраховано температурні залежності часу гетерогенного зародкоутворення для багатокомпонентних твердих розчинів заміщення, встановлено критичні швидкості охолодження для сплавів систем Al-Co-Cr-Fe-Ni та Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni, проаналізовано вплив хімічного складу на значення цих критичних швидкостей. Проведено моделювання процесів гетерогенної кристалізації для високоентропійних сплавів системи Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni,

встановлено кореляцію між об'ємною часткою ГЦК фази та густиною центрів гетерогенної кристалізації в одиниці об'єму.

#### **4. Наукове та практичне значення результатів**

Результати дисертаційного дослідження можуть бути використані для цілеспрямованого керування структурою та властивостями ВЕС-покривів та дають можливість підвищення фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалів за рахунок оптимізації їх локальних ділянок. Крім того, отримані в роботі наукові результати є корисними з точки зору поглиблення та більш повного розуміння закономірностей фазоутворення ВЕСів у нерівноважних умовах

#### **5. Повнота викладення матеріалу дисертації у наукових публікаціях**

За матеріалами дисертаційного дослідження опубліковано 5 статей, що індексуються наукометричними базами Web of Science та Scopus: одна, у виданні, що належить до першого (Q1) квартилю, та чотири – до третього (Q3) квартилю. Також опубліковані тези 5 доповідей на всеукраїнських та міжнародних конференціях. Публікації відтворюють основний зміст дисертації, об'єм і характер досліджень.

#### **6. Відсутність порушень академічної доброчесності**

В дисертаційному дослідженні «Формування високоентропійних сплавів в умовах швидкого охолодження розплаву при лазерному легуванні металів» та у наукових публікаціях за темою дисертації порушень академічної доброчесності не виявлено.

#### **7. Структура та зміст дисертації, її завершеність та відповідність встановленим вимогам**

Дисертаційна робота повністю відповідає вимогам до оформлення дисертацій, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

Подане дисертаційне дослідження є кваліфікаційною науковою працею на правах рукопису і складається з анотації, вступу, 4 розділів, висновків, переліку використаних джерел з 146 найменувань та додатку. Зміст основної частини викладений на 149 сторінках машинописного тексту та містить 36 рисунків, 18 таблиць та додаток.

У **вступі** обґрунтовано тему та актуальність роботи, сформульовано її мету та завдання, відображено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

В **першому розділі** наведено детальний аналіз літературних даних за темою дисертації. Розглянуто відомості про структуру та фізичні властивості високоентропійних сплавів, перераховано напівемпіричні критерії утворення багатокомпонентних твердих розчинів. Особливу увагу наділено проблематиці впливу високих швидкостей охолодження розплаву на процеси структуроутворення ВЕСів. Все це дозволило зробити ряд висновків, які стали основою для формулювання мети роботи та проведення відповідних експериментальних і теоретичних досліджень.

В **другому розділі** описано вихідні матеріали, використані в роботі, методику лазерного легування та методи дослідження використані в роботі, описано методику проведення теоретичних розрахунків.

В **третьому розділі** наведено експериментальні результати роботи. Детально описано результати досліджень структури, фазового складу та мікротвердості високоентропійних покриттів систем Co-Cr-Fe-Ni, Al-Co-Cr-Fe-Ni та Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni, одержаних методом лазерного легування. Окрім того, описано вивчення структури, фазового складу та механічних властивостей поверхневих шарів титанових сплавів ВТ1-0 та ВТ-6 після лазерної обробки в атмосферах аргону, азоту та повітря.

**Четвертий розділ** присвячено аналізу результатів теоретичних розрахунків. Представлено результати розрахунку температурних залежностей часу зародкоутворення та моделювання процесів кристалізації у високоентропійних сплавах систем Al-Co-Cr-Fe-Ni та Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni при отриманні їх методом лазерного легування з урахуванням характерних для даного методу швидкостей охолодження розплаву та гетерогенного характеру процесів зародкоутворення і кристалізації. Розраховано критичні швидкості охолодження, необхідні для пригнічення процесів формування твердих розчинів з ГЦК та ОЦК ґратками, проаналізовано вплив хімічного складу на значення цих критичних швидкостей.

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

## **8. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків, сформульованих у дисертації**

Дисертаційну роботу написано грамотно, послідовно та логічно. Достовірність результатів проведеного дисертаційного дослідження

забезпечують: теоретичне та методологічне обґрунтування вихідних положень дослідження, відображених у коректно сформульованій меті й завданнях, які впливають з неї, застосування сучасного обладнання, адекватного об'єкту дослідження згідно з поставленим завданням. Рукопис дисертації є завершеною науковою роботою, написаний українською літературною мовою. Наведені в дисертаційній роботі результати узгоджуються з існуючими положеннями фізики твердого тіла та літературними даними.

## **9. Дискусійні положення й зауваження щодо змісту та оформлення дисертації.**

Можна виділити ряд зауважень і побажань.

1. У тексті роботи недостатньо детально пояснено наведений на стор. 78 розподіл легуючих хімічних елементів за глибиною поперечного перерізу зони лазерного легування (рис. 3.9), зокрема, не вказано причини низького вмісту всіх компонентів на глибині близько 17 мкм.
2. На стор. 77 наведено зображення ділянки з підвищеною кількістю пор у поперечному перерізі зони лазерного легування (рис. 3.8с). Наведене у роботі пояснення причин утворення цих пор на мою думку не є переконливим.
3. В таблиці 3.3 наведеній на стор. 85 один з стовбців підписано як «Параметри ґраток, нм», хоча параметри ґраток у таблиці очевидно записані в ангстремах.
4. У розділі 3 на частині дифрактограм вказані індекси площин (рис. 3.7, рис. 3.14, рис. 3.15, рис. 3.19, рис. 3.20) в той час як на інших дифрактограмах вони не зазначені (рис. 3.1, рис. 3.12). Доцільніше б було дотримуватись єдиної стилістики при оформленні всіх дифрактограм.
5. При розрахунках температурних залежностей критичного часу зародкоутворення у розділі 4.1 припускалось, що склад твердих розчинів є ідентичним до складу розплаву. Разом з тим відомо, що у ВЕСах систем Al-Co-Cr-Fe-Ni та Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni при формуванні двох твердих розчинів їх хімічний склад може не відповідати хімічному складу розплаву. Наприклад, у еквіатомному сплаві AlCoCrCuFeNi впорядкована ОЦК фаза є насиченою алюмінієм, в той час як ГЦК фаза має високий вміст міді. Крім того, високі швидкості охолодження можуть впливати на хімічний склад цих фаз. Чи не створює таке припущення суттєвої похибки при визначенні критичних швидкостей охолодження?

6. У розділі 4.1 на графіках для позначення твердих розчинів використовуються підписи англійською мовою (BCC, FCC) в той час як в тексті вони зазначаються українською (ОЦК, ГЦК).

Однак, усі зазначені зауваження жодною мірою не знижують загальної позитивної оцінки поданого дисертаційного дослідження, не стосуються новизни роботи, практичної значимості та її основних висновків.

**Загальний висновок про відповідність роботи встановленим вимогам.**

Дисертація «Формування високоентропійних сплавів в умовах швидкого охолодження розплаву при лазерному легуванні металів» є завершеним науковим дослідженням і містить результати, які є важливими в галузі фізики металів. Вирішені в дисертації наукові задачі, обсяг достовірного експериментального матеріалу, рівень інтерпретації результатів, обґрунтованість наукових положень та практичних рекомендацій відповідають вимогам «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у вищих навчальних закладах (наукових установах)», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 261 від 23.03.2016 р. (зі змінами і доповненнями від 03.04.2019 р. № 283), зокрема, вимогам, передбаченим «Порядком присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженим Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, а також вимогам, передбаченим пунктом 2 Вимог до оформлення дисертацій, затверджених Наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40, а її автор – Ємельянченко Владислав Васильович – заслуговує присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

**Офіційний опонент:**

завідувач відділу фізико-математичного моделювання низьковимірних систем Інституту прикладних проблем механіки і математики імені Я.С. Підстригача, доктор фізико-математичних наук, професор

Дмитро ПОПОВИЧ