

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

РЕЦЕНЗІЯ

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

Актуальність теми дисертації.

Потреба у використанні нових металевих матеріалів із вдосконаленими експлуатаційними характеристиками та фізико-механічними властивостями завжди є актуальною для розвитку техніки і технологій. Останнім часом суттєво зріс інтерес до нового класу матеріалів – високоентропійних сплавів (ВЕС), що містять декілька, більше 5-ти, основних елементів з еквіатомним або близьким до нього вмістом. Деякі композиції цих сплавів характеризуються високою твердістю і міцністю, зносостійкістю та стійкістю до окислення і корозії, термостабільністю, що дає можливість розглядати їх як перспективні матеріали нового покоління для низки конструкційних і функціональних застосувань. На сьогодні багатоконпонентні ВЕС вивчені недостатньо. А тому вельми актуальними є фундаментальні дослідження природи явищ та фізичних процесів у цих сплавах, їхньої структури у рідкому стані та її трансформації під час охолодження, а також механізмів структурно-фазових перетворень під час кристалізації і зокрема в сильно нерівноважних термодинамічних умовах, що виникають в технологічних процесах лазерної обробки.

Практична цінність роботи

Отримані наукові результати та фізичні закономірності становлять практичний інтерес для створення нового класу покриттів на металах і сплавах з покращеними експлуатаційними властивостями, зокрема і створення захисних покриттів на виробах з промислових сплавів у локальних місцях з високим ступенем адгезії. Отримані результати також можуть бути використані для розробки методичних та наукових засад виготовлення високоентропійних сплавів, зокрема методом лазерного легування, оптимізації виробничих

процесів, та цілеспрямованого керування структурою та властивостями високоентропійних сплавів, а також для навчання студентів за напрямками прикладної та загальної фізики, зокрема у матеріалознавчих курсах.

Ступінь наукової обґрунтованості результатів, сформульованих в роботі

Дисертація оформлена у послідовному та логічному порядку, виконана на високому науково-методичному рівні та відповідає критеріям наукового стилю. Автор опрацював наявні результати досліджень з даної тематики, опубліковані закордонними та українськими вченими, з метою порівняння і підтвердження їх узгодженості. Основний матеріал роботи представлено чітко і структуровано, розрахунки та моделювання виконані на високому теоретичному рівні. Експерименти виконувалися на сучасному лазерному обладнанні, а дослідження структури та властивостей ВЕС проводилися за допомогою добре апробованих методів, що не дають приводу сумніватися в їх достовірності. Про високу наукову обґрунтованість результатів роботи також свідчить їх публікація у рецензованих журналах, що входять до баз даних Scopus та Web of Science та доповіді автора на міжнародних конференціях.

Наукова новизна

Основні наукові результати, які представлені в дисертаційній роботі Ємельянченка В. В., та відображають новизну роботи є такими:

1. Встановлено, що лазерне легування алюмінію та заліза еквіатомними сумішами порошків перехідних металів є ефективним методом одержання на їх поверхні високоадгезійних покриттів, що містять типові для високоентропійних сплавів фази та мають підвищені значення мікротвердості.
2. Показано, що при лазерному легуванні алюмінію та заліза еквіатомними сумішами порошків перехідних металів відбувається формування дисперсних структур з типовими для високоентропійних сплавів багатокомпонентними розчинами заміщення на базі ОЦК та ГЦК ґраток; що призводить до суттєвого підвищення мікротвердості поверхневих шарів.
3. Вперше запропоновано модель, що враховує реальні умови охолодження розплаву і гетерогенний характер зародкоутворення при лазерному легуванні, та дає можливість більш коректно розрахувати температурні залежності часу зародкоутворення для конкуруючих фаз і встановити

критичні швидкості охолодження для сплавів системи Al-Co-Cr-Fe-Ni та Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni.

4. Вперше теоретично встановлено кореляцію між густиною центрів гетерогенної кристалізації та об'ємною часткою ГЦК фази у сплавах систем Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni. Показано, що збільшення густини центрів гетерогенної кристалізації призводить до зростання об'ємної частки ГЦК фази.
5. Встановлено, що лазерна обробка технічно чистого титану VT1-0 та титанового сплаву VT-6 в атмосферах повітря та азоту викликає зростання мікротвердості в зоні лазерної обробки внаслідок комплексного впливу трьох факторів: підвищення ступеня дисперсності структури, утворення нітридів та пересичених твердих розчинів втілення азоту та кисню у гратці α -титану.

Зв'язок роботи з державними програмами, планами, темами

Дослідження, представлені в дисертаційній роботі, були проведені на кафедрі загальної та прикладної фізики Запорізького національного університету в рамках держбюджетної теми «Формування дисперсних квазікристалічних та кристалічних фаз в умовах нерівноважної кристалізації при лазерному легуванні металевих сплавів» (2017-2019 рр., № держреєстрації 0117U000511), а також на кафедрі фізики металів Львівського національного університету імені Івана Франка відповідно до держбюджетної теми «Оптимізація фізичних властивостей нанокompозитів на основі металевих евтектик для безсвинцевих припоїв» (2022-2023 рр., № держреєстрації 0122U001521)

Структура і зміст дисертації (Характеристика основних положень роботи)

Дисертація Ємельянченка В. В. є науковим дослідженням, яке представлено на 150 сторінках друкованого тексту, в якому викладені результати дослідження фазового складу та морфології високоентропійних сплавів отриманих автором на поверхнях металів методом лазерного легування. Робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів та загальних висновків та містить список умовних скорочень, 18 таблиць і 36 рисунків, та список використаних джерел, який налічує 146 посилань.

У вступі викладено актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження, а також визначено задачі для досягнення поставленої мети. Також

тут висвітлено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок дисертанта та апробацію результатів дисертації.

У першому розділі викладено огляд характеристик високоентропійних сплавів, передумови їх утворення, особливості структури і властивостей, та описано методи їх отримання.

У другому розділі міститься виклад методики синтезу високоентропійних сплавів, а також матеріали, методи та обладнання для проведення експериментальних досліджень і методика теоретичних розрахунків.

Третій розділ присвячений вивченню структури, фазового складу та механічних властивостей багатокомпонентних сплавів Co-Cr-Fe-Ni, Al-Co-Cr-Fe-Ni, та Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni, отриманих методом лазерного легування. Представлено результати рентгеноструктурних і мікроскопічних досліджень формування ВЕСів методом лазерного легування на поверхні металів, зокрема заліза, алюмінію і титану. Проведено аналіз структурних параметрів отриманих сплавів та виявлено залежність структури і фазового складу від складу компонентів еквіатомної суміші. Виявлено, що внаслідок високої температури плавлення матриці при лазерному легуванні поверхневих шарів технічно чистого титану еквіатомною сумішшю порошків Al, Co, Cr, Fe та Ni не відбувається формування багатокомпонентних твердих розчинів заміщення. Досліджено мікротвердість поверхневих шарів за глибиною зони лазерного оплавлення, та показано, що лазерне оплавлення титану VT1-0 та сплаву VT-6 в атмосферах повітря та азоту зумовлює зростання мікротвердості в зоні лазерної обробки в 1,3 та 4,5 разів, відповідно.

У четвертому розділі дисертації проведено моделювання процесу кристалізації високоентропійних сплавів, викладено теоретичний аналіз впливу швидкості охолодження розплаву на фазовий склад, та розрахунки температурних залежностей критичного часу зародкоутворення. Дисертантом запропоновано напівемпіричну модель, що враховує швидкість охолодження розплаву в процесі формування ГЦК та ОЦК фаз у сплавах систем Al-Co-Cr-Fe-N та Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni при їх отриманні за допомогою лазерного легування

Повнота викладу матеріалів у роботах, які опубліковані автором

Дослідницька робота дисертанта відображена у наукових публікаціях та була широко представлена на наукових конференціях. Зокрема, на основі дисертаційної роботи опубліковано 10 робіт, включаючи 5 статей у провідних спеціалізованих журналах, включених до баз даних Scopus та Web of Science, а

також представлено 5 доповідей на міжнародних наукових конференціях та семінарах.

Відомості про дотримання академічної доброчесності

Порушень академічної доброчесності в дисертаційній роботі Ємельянченка В. В. та його наукових публікаціях не виявлено.

Зауваження до дисертації

1. У роботі не розглянуто вплив високих швидкостей нагрівання, які характерні для лазерної обробки, на формування розплаву, тобто плавлення за нерівноважних умов. Оскільки для багатокомпонентних розплавів характерні нерівноважні, метастабільні стани, пов'язані зі структурою вихідних твердих фаз, а також залежність будови і властивостей розплавів від температури і тривалості витримки, швидкості зміни температури, то оцінка швидкостей нагрівання дала б уявлення, як формується розплав на поверхні, яка його температура. Оскільки ці процеси є доволі складними для експериментального вивчення, то моделювання могло б доповнити картину процесу лазерного легування.

2. Для утворення ВЕСів у поверхневих шарах металів застосовується метод нанесення обмазки товщиною 120 -150 мкм. Автором не розкрито, яким методом контролювали товщину обмазки, та яка різнотовщинність нанесеного шару. Експерименти проведені лише при двох товщинах, що не дає уявлення про вплив товщини обмазки на утворення ВЕС покриття.

3. У дослідженні не розглянуто утворення гартівних напружень, які можуть виникати при ЛО та впливати на значення мікротвердості поверхневих шарів.

4. У тексті, а також у Переліку умовних скорочень, не розшифровано аббревіатури ТТТ-діаграми, ГРС-методи, ГЩУ, а на рис. 3.9 (Розподіл легуючих елементів за глибиною поперечного перерізу ЗЛЛ) не позначена величина по осі У

Однак, наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації, яка засвідчує високий рівень кваліфікації здобувача.

Висновок щодо відповідності дисертації встановленим нормам.

Дисертація Ємельянченка Владислава Васильовича на тему «**Формування високоентропійних сплавів в умовах швидкого охолодження розплаву при лазерному легуванні металів**», подана на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 105

«Прикладна фізика та наноматеріали», є завершеним дослідженням, в якому розглянуто актуальні проблеми створення нових покриттів на основі високоентропійних сплавів для вдосконалення фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей поверхні металів, металевих сплавів та виробів з них. Порушень академічної доброчесності у дисертації та наукових публікаціях здобувача не виявлено. Вважаю, що дисертаційна робота відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022 року, а її автор, Ємельянченко Владислав Васильович, заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії в галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Рецензент:

Кандидат фізико-математичних наук,
старший дослідник, доцент кафедри фізики металів
Львівського національного університету
імені Івана Франка

Юлія Никируй