

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, професора, професора
кафедри фізики металів фізичного факультету Київського національного
університету імені Тараса Шевченка

Семенька Михайла Петровича

на дисертаційну роботу Ємельянченка Владислава Васильовича

"Формування високоентропійних сплавів в умовах швидкого охолодження розплаву при лазерному легуванні металів", представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 10 "Природничі науки" за спеціальністю 105 " Прикладна фізика та наноматеріали "

1. Актуальність теми дисертаційного дослідження

Високоентропійні сплави є новим та перспективним класом матеріалів у сучасній матеріалознавчій науці. Вони відрізняються від традиційних сплавів тим, що складаються з п'яти або більше компонентів, взятих у еквіатомному або близькому до нього співвідношенні. Основною особливістю високоентропійних сплавів є те, що вони утворені на основі твердих розчинів, які є більш стабільними, ніж інтерметалеві сполуки. Ці сплави демонструють унікальні механічні властивості, такі як висока твердість, міцність, зносостійкість, стійкість до окислення, корозії, що робить їх привабливими матеріалами для застосування у широкому спектрі галузей. Особливу зацікавленість становлять покриття з високоентропійних сплавів, оскільки у багатьох випадках доцільним є отримання високих експлуатаційних характеристик не у всьому об'ємі виробу, а лише на певних ділянках поверхні, які найбільше піддаються інтенсивному механічному впливу. Серед відомих методів одержання таких покриттів лазерне легування є одним з найбільш перспективних внаслідок високої технологічності процесу. Незважаючи на досить значну кількість досліджень щодо процесів структуроутворення ВЕСів у нерівноважних умовах, проблема формування типу структури ВЕСів, утвореної при лазерному легуванні з урахуванням гетерогенного характеру процесів зародкоутворення та кристалізації, залишається практично не вивченою. Зважаючи на це тематика дисертаційної роботи є актуальною та важливою.

Мета дослідження – експериментальне дослідження структурно-фазового стану, розрахунок температурних залежностей часу зародкоутворення та моделювання процесів кристалізації у високоентропійних сплавах систем Co-Cr-Fe-Ni, Al-Co-Cr-Fe-Ni, Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni при отриманні їх методом лазерного легування.

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

Дослідження, результати яких представлені в дисертаційній роботі, виконано на кафедрі загальної та прикладної фізики Запорізького національного університету відповідно до 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 нанокмполімерів на основі металевих евтектик для безсвинцевих припоїв» (2022-2023 рр., № держреєстрації 0122U001521)

3. Наукова новизна одержаних результатів

У рамках цього дисертаційного дослідження вперше:

- систематично експериментально досліджено структурно-фазовий стан високоентропійних покриттів одержаних при лазерному легуванні алюмінію та заліза еквіатомними сумішами порошків перехідних металів

- розраховано температурні залежності часу зародкоутворення для конкуруючих фаз і встановлено критичні швидкості охолодження для сплавів систем Al-Co-Cr-Fe-Ni та Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni з урахуванням гетерогенного характеру зародкоутворення при лазерному легуванні

- проаналізовано вплив хімічного складу сплавів систем Al-Co-Cr-Fe-Ni та Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni на значення критичних швидкостей охолодження розплаву

- теоретично встановлено кореляцію між густиною центрів гетерогенної кристалізації та об'ємною часткою ГЦК фази у сплавах системи Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni

4. Наукове та практичне значення

Отримані в роботі наукові результати і встановлені фізичні закономірності є корисними для більш повного розуміння процесів кінетики фазоутворення ВЕСів та становлять практичний інтерес при створенні методичних та наукових засад розробки високоентропійних сплавів для цілеспрямованого керування їхніми структурою та властивостями. Робота має і практичне значення, оскільки отримані в ній результати можуть бути корисними при створенні захисних покриттів з високим ступенем адгезії на виробах з промислових сплавів.

5. Повнота викладення матеріалу дисертації у наукових публікаціях

Результати роботи дисертанта представлені у наукових публікаціях автора та апробовані на наукових конференціях і семінарах. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 5 статей, що індексуються в міжнародних наукометричних базах даних Web of Science та/або Scopus. Одна з них опублікована у міжнародному фаховому виданні другого квартиля (Q2), та чотири – у виданнях третього квартиля (Q3). Крім того, опубліковані тези 5 доповідей. На основі аналізу обсягу та змісту публікацій можна стверджувати, що вони цілковито відображають результати дисертаційної роботи. В них детально описані усі результати проведених досліджень, які свідчать про розкриття теми дисертації, досягнення її мети й обґрунтування наукової новизни.

Відсутність порушень академічної доброчесності

Порушень академічної доброчесності в дисертаційній роботі В.В. Ємельянченка "Формування високоентропійних сплавів в умовах швидкого охолодження розплаву при лазерному легуванні металів" та в його наукових публікаціях за темою дисертації не виявлено.

6. Структура та зміст дисертації, її завершеність та відповідність встановленим вимогам

Представлена дисертаційна робота відповідає вимогам до оформлення дисертацій відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

Дисертація В.В. Ємельянченка являє собою обґрунтоване, логічно побудоване, завершене наукове дослідження. Вона складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел (146 найменувань) та додатку. Дисертація викладена на 149 сторінках та містить 36 рисунків, 18 таблиць та додаток.

У **вступі** приведені обґрунтування актуальності теми, сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, перераховано використані методи, а також окреслено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, виділено особистий внесок здобувача та відомості про апробацію результатів роботи.

Перший розділ носить оглядовий характер і присвячений висвітленню літературних відомостей про структуру та фізичні властивості високоентропійних сплавів. Значна увага приділена впливу кінетичних факторів на процеси структуроутворення ВЕСів, розглянуто критерії формування твердих розчинів у високоентропійних сплавах. Як результат проведеного огляду, у висновках до цього розділу підкреслено мету та актуальність роботи.

Другий розділ дисертаційної роботи стосується опису методики експериментальних та теоретичних досліджень. Детально описано методи і обладнання, які були використані під час проведення XRD та EDS аналізу, оптичної та електронної мікроскопії, наведено методики теоретичних розрахунків температурних залежностей часу зародкоутворення для конкуруючих фаз та моделювання процесів кристалізації у високоентропійних сплавах різних систем при отриманні їх методом лазерного легування.

У **третьому розділі** досліджено фазовий склад, структуру та механічні властивості ВЕСів систем Co-Cr-Fe-Ni, Al-Co-Cr-Fe-Ni та Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni, одержаних методом лазерного легування поверхні технічно чистих алюмінію та заліза еквіатомними сумішами порошків перехідних металів. Окрім того, було виконано спробу одержання ВЕС-покриттів на поверхні титанових сплавів VT1-0 та VT-6 та вивчено структуру поверхневих шарів після лазерної обробки в різних газових атмосферах: азоту, повітря та аргону.

У **четвертому розділі** було здійснено розрахунок температурних залежностей часу зародкоутворення для конкуруючих фаз 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.

Наведені в кінці дисертаційної роботи **висновки** достатньою мірою обґрунтовані в попередніх розділах. Їх достовірність забезпечена використанням комплексу сучасних апробованих взаємодоповнюючих методик та методів досліджень, чисельним узгодженням отриманих експериментальних результатів і результатів розрахунків, відтворюваністю отриманих результатів на багатьох зразках.

Далі наводиться **список використаної літератури** а також **додаток** в якому наведено список публікацій здобувача за темою дисертації.

7. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків, сформульованих у дисертації

Для виконання та написання дисертації В.В. Ємельянченко виконав детальний аналіз великої кількості зарубіжних наукових статей, пов'язаних з темою роботи, і значною мірою опирався на сучасний стан досліджень за обраною темою. Робота виконана на належному теоретико-методологічному рівні, є цілісною і завершеною. Тема дисертації є актуальною, її структура добре продумана, матеріал викладено послідовно і логічно. Отримані в роботі наукові результати розв'язують важливу наукову проблему - створення покриттів з високоентропійних сплавів та керованої зміни їхніх властивостей. Отримані результати дисертаційної роботи достатньо повно викладені в опублікованих працях. Достовірність результатів роботи забезпечено використанням низки загальноновизнаних сучасних експериментальних методик для проведення структурних досліджень. Методика теоретичних розрахунків є коректною, одержані результати розрахунків узгоджуються з експериментальними результатами. Рукопис дисертації написаний з використанням адекватної фахової термінології та українською літературною мовою.

8. Дискусійні положення й зауваження щодо змісту та оформлення дисертації.

1. Для визначення параметрів комірки одержаних структур використано дифракційні максимуми в так званій «прецизійній області» - при великих кутах дифракції. Це хоча і дозволяє звести похибку методу до мінімуму, але не завжди дозволяє визначити з великою точністю параметр комірки. Зумовлено це тим, що на положення дифракційних максимумів (перш за все, але не тільки) може суттєво впливати якість юстування гоніометра та якість виготовлення зразків. Це і обумовлює додаткові зсуви дифракційних максимумів в ту чи іншу сторону кутів дифракції. Як на мене, такі прецизійні дослідження по положенню одного дифракційного максимуму можна зробити лише з використанням еталонів і то, при умові аналізу форми дифракційного профілю.

2. Формування покриттів на підкладках при високих температурах внаслідок різниці коефіцієнтів термічного розширення, невідповідностей параметрів ґратки і т.д. зазвичай супроводжується виникненням напруженого стану (в тому числі і

макронапруг). Нажаль в роботі це питання не аналізується, хоча і воно може бути важливим для подальшої експлуатації виробів.

3. В п.3 загальних висновків відмічено, що внаслідок високої температури топлення матриці формування на ній високоентропійних фаз внаслідок лазерного легування не відбувається. Але, як на мене, це не головна причина, оскільки потужність лазерного достатня для оплавлення поверхні титану, про що свідчать і результати досліджень лазерної обробки титанових сплавів. Скоріш за все визначальну роль в цьому відношенні відіграє невідповідність параметрів покриття та матриці, та/або стан поверхні титанової матриці.

4. Назва роботи присвячена лазерному легуванню. Але, як на мене, хоча і легування матриці відбувається в процесі лазерної обробки, результати фазового аналізу, результати досліджень складу, властивостей і т.д. однозначно свідчать про формування на поверхні відповідних матриць покриттів із високоентропійних сплавів методом лазерної обробки.

5. В теоретичному аналізі наведено різні оцінки для багатокomпонентних сплавів. Було б цікаво провести такі оцінки в наближенні, коли із багатокomпонентного розплаву утворюються зародки кристалічних фаз що найменше з чистих компонентів, а бажано було б і двох компонентних фаз. А потім порівняти відповідні величини (наприклад, швидкості охолодження) з відповідними параметрами для складів, що відповідають високоентропійним сплавам.

Втім, зазначені зауваження та застереження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Загальний висновок про відповідність роботи встановленим вимогам.

Вважаю, що дисертація Ємельянченка Владислава Васильовича "Формування високоентропійних сплавів в умовах швидкого охолодження розплаву при лазерному легуванні металів" є цілісною і завершеною науковою працею, виконаною на високому науковому рівні, отримані результати є достовірними, висновки – обґрунтованими

Дисертаційна робота " Формування високоентропійних сплавів в умовах швидкого охолодження розплаву при лазерному легуванні металів " відповідає 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 (з наступними змінами), 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 у галузі знань 10 "Природничі науки" за спеціальністю 105 "Прикладна фізика та наноматеріали".

Офіційний опонент:

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

Михайло СЕМЕНЬКО