

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 ”**, представлену на здобуття
ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю
105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

Актуальність теми дисертації.

Високоентропійні сплави, як новий клас матеріалів, мають перспективу широкого використання в промисловості завдяки унікальному поєднанню механічних властивостей. Зокрема такі сплави мають підвищені значення твердості, міцності, зносостійкості, стійкості до високотемпературної корозії та інших фізичних параметрів. Все це стає можливим в першу чергу завдяки формуванню стабільних багатокомпонентних твердих розчинів заміщення на базі ґраток ОЦК, ГЦК або ГЦУ. Незважаючи на значну кількість наукової інформації про структуру, мікроструктуру та властивості двокомпонентних твердих розчинів, багатокомпонентні розчини та високоентропійні сплави на їхній основі досліджені не достатньо, що вимагає подальших наукових пошуків.

Окремим та важливим розділом матеріалознавства є вдосконалення властивостей поверхні матеріалів за допомогою високоентропійних сплавів. Використовуючи метод лазерного поверхневого легування на поверхні металевих сплавів можна отримувати високоентропійні фази, які б змінювали властивості лише поверхні матеріалу, не змінюючи об'ємних властивостей. Саме висвітленню цього питання присвячена ця робота, що формує її актуальність

Практична цінність роботи

Практична цінність отриманих у дисертації результатів пов'язана з можливістю їхнього використання для створення режимів обробки матеріалів з покращеними фізичними властивостями. Інформація про атомну структуру та мікроструктуру покриттів залежно від режимів лазерної обробки дає змогу цілеспрямовано керувати структурою покриттів, а, відповідно, і їхніми механічними властивостями. Теоретичне моделювання процесу кристалізації, проведені в роботі, дозволять вдосконалити експериментальні методи отримання високоентропійних сплавів на поверхні об'ємних сплавів.

Ступінь наукової обґрунтованості результатів, сформульованих в роботі

Дисертаційна робота виконана на високому науково-методичному рівні, а сучасні методи досліджень та інтерпретації результатів експерименту та обчислень не дають приводу сумніватися в їхній достовірності. Зокрема, фазовий склад поверхневих шарів зони лазерного легування досліджено методом рентгенівської дифрактометрії, що разом з мікроструктурними дослідженнями дає вичерпну інформацію про формування фаз на поверхні металевих сплавів в процесі їхнього легування. Для теоретичних розрахунків автором було запропоновано моделі, що базуються на добре відомих виразах та дають змогу врахувати вплив швидкостей охолодження розплаву на фазовий склад легуваних шарів. Це дозволило отримати результати максимально близькі до експериментальних. Стиль викладу результатів досліджень є науковим, а матеріал дисертації викладено в логічній послідовності.

Беззаперечним свідченням високої наукової обґрунтованості результатів роботи є їхня публікація в провідних журналах та представленні наукового доробку автора на численних міжнародних та вітчизняних конференціях.

Наукова новизна

Найбільш вагомими результатами дисертаційної роботи Ємельянченка В. В., які відображають новизну роботи, є такі:

1. Вперше 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 приводить до суттєвого підвищення мікротвердості поверхневих шарів порівняно з матричними значеннями.
2. Встановлено, що внаслідок високої температури плавлення матриці при лазерному легуванні поверхневих шарів технічно чистого титану еквіатомними сумішами порошків перехідних металів формування багатокомпонентних твердих розчинів заміщення, характерних для високоентропійних сплавів, не відбувається навіть за умов охолодження розплаву зі швидкостями $10^4 \dots 10^5$ К/с.
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. 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.

Зв'язок роботи з державними програмами, планами, темами

Результати досліджень, представлених в дисертаційній роботі, виконано 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 в рамках держбюджетної теми «Оптимізація фізичних властивостей нанокompозитів на основі металевих евтектик для безсвинцевих припоїв» (2022-2023 рр., № держреєстрації 0122U001521)

Структура і зміст дисертації

Дисертація Ємельянченка В. В. містить власні результати дослідження фазового складу та морфології високоентропійних сплавів отриманих методом лазерного легування на поверхнях металів. Робота викладена на 150 сторінках друкованого тексту та складається з анотації, вступу, чотирьох розділів та загальних висновків. Дисертація містить 36 рисунків та 18 таблиць.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, описано мету досліджень та задачі, які були поставлені для досягнення мети, сформульовано новизну роботи та її практичне значення, а також подано інформацію про апробацію результатів досліджень.

Перший оглядовий розділ стосується загальної інформації про високоентропійні сплави, умови та методи їхнього синтезу, структуру ВЕСів та фізичні властивості. Також описано вплив швидкостей охолодження розплаву на структуроутворення високоентропійних сплавів.

У другому розділі подано інформацію про методику синтезу високоентропійних сплавів, які використано в роботі, а також описано методи експериментальних досліджень та теоретичних розрахунків. Зокрема, описано метод X-променевого дослідження структури сплавів, металографічний та електронно-мікроскопічний методи вивчення мікроструктури. Наприкінці другого розділу подано коротку інформацію про методи теоретичних розрахунків для вивчення процесів кристалізації сплавів.

Третій розділ присвячений представленню експериментальних результатів дослідження формування ВЕС-покриттів в результаті лазерного легування. В

цьому розділі описано особливості формування високоентропійних сплавів на поверхнях заліза, алюмінію та титану. Зокрема, виявлено неоднорідний розподіл компонентів по зоні легування, частково пояснено причини такого розподілу компонентів, досліджено мікротвердість легованих шарів. Оскільки автору не вдалось одержати ВЕСи на поверхні титанових сплавів, ним було проведено дослідження структурного стану та властивостей поверхневих шарів титанових сплавів VT1-0 та VT-6 після лазерних обробок у різних атмосферах.

У четвертому розділі дисертації здійснено розрахунки кінетики формування фаз під час швидкої кристалізації високоентропійних сплавів систем Al-Co-Cr-Fe-Ni та Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni за умови лазерного легування. Зокрема, використовуючи теорію нерівноважної кристалізації, запропоновано напівемпіричну модель, що враховує швидкість охолодження розплаву в процесі формування ГЦК та ОЦК фаз. На основі здійснених розрахунків отримано та проаналізовано залежності часу зародкоутворення та залежності величини переохолодження від швидкості охолодження для твердих розчинів з різним типом кристалічної структури.

Повнота викладу матеріалів у роботах, які опубліковані автором

Результати рецензованої роботи відображено у публікаціях автора та широко апробовано на наукових конференціях. За матеріалом дисертаційної роботи опубліковано 10 праць, з яких 5 статей у провідних закордонних та вітчизняних фахових журналах, включених у наукометричні бази даних Scopus та Web of Science, та 5 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях та семінарах.

Відомості про дотримання академічної доброчесності

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

Зауваження до дисертації

1. Для нанесення металевих порошків на поверхню оброблюваної деталі автор використовував клей БФ-6. Проте в роботі не вказано, як впливають залишки цього клею на формування структури та властивостей високоентропійних сплавів на поверхні.

2. Очевидно, що під час формування високоентропійних сплавів на поверхні матеріалу, який є одним з компонентів ВЕС, необхідно враховувати неоднорідність складу отриманих сплавів від глибини. На жаль, автор роботи не завжди проводить такий аналіз.

3. В роботі не зроблено аналізу залежності товщини та фазового складу високоентропійних сплавів, отриманих на поверхнях металів, від режимів лазерного опромінення. Також не вказано, чому саме було використано режими лазерної обробки, описані на початку кожного параграфу експериментальної частини.

4. Формування мікроструктури високоентропійних сплавів у зоні лазерного легування автор пояснює дією ефекту Марангоні-Гіббса. На мою думку, варто було б здійснити детальніший аналіз вказаного ефекту, що дало б додаткову корисну інформацію про механізми формування досліджених сплавів.

Проте, 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 пошуку нових високоентропійних матеріалів для вдосконалення поверхні металевих сплавів. У роботі та наукових публікаціях дисертанта немає порушень академічної доброчесності. Вважаю, що за актуальністю, новизною, практичним значенням та обсягом результатів 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:

Доктор фізико-математичних наук,
професор, завідувач науково-дослідної частини
Львівського національного університету
імені Івана Франка

Юрій ПЛЕВАЧУК