

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації «Структурна стабільність фаз та електрофізичні властивості високоентропійних сплавів» здобувачки ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки за спеціальністю» 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» Дуфанець Марти Василівни

1. Актуальність теми дисертації

Дослідження нового класу матеріалів – високоентропійних сплавів, які базуються на високій ентропії змішування (кількості складових від 5 до 13 компонентів) викликає особливе зацікавлення в останні роки. Такі сплави складаються з твердих розчинів з простими кристалічними структурами та відмінною комбінацією властивостей, які можливо змінювати в широких межах. Високоентропійні сплави мають високу твердість, зносостійкість, як за нормальних умов, так і за підвищених температур, стійкість до окислення, корозійну та радіаційну стійкість вищу. Додаткове поліпшення механічних характеристик цих сплавів може бути досягнуто за рахунок створення нанокристалічної структури. Тому, з'ясування закономірностей формування структури, фазового складу та електрофізичних властивостей сплавів є важливим і актуальним завданням, вирішення якого дозволить в майбутньому створювати високоентропійні сплави з наперед заданими характеристиками.

Тему дисертації затверджено на засіданні Вченої ради Львівського національного університету імені Івана Франка, протокол № 43/12 від 06.12.2017 (уточнено – протокол № 10/5 від 26.05.2021).

2. Зв'язок дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри

Дисертаційна робота виконана у лабораторіях кафедри фізики металів фізичного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка. Значну частину результатів отримано в рамках виконання робіт з держбюджетних тем: Фл-52Ф “Взаємозв'язок структурного стану, елементного складу та термодинамічних умов охолодження розплаву при формуванні властивостей високоентропійних металевих сплавів” (номер державної реєстрації 0115U003252, термін виконання 01.01.2017–31.12.2019 рр.) та Фл-17 П “Синтез, структура та властивості нанокомпозитних матеріалів на основі легких високоентропійних сплавів” (номер державної реєстрації 0121U109730, термін виконання 01.01.2021–31.12.2022 рр.).

3. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів

Дисертаційна робота є самостійно виконаним науковим дослідженням. Наведені в роботі результати досліджень отримані здобувачкою особисто або за її безпосередньої участі. Експериментальні дослідження та вдосконалення методик вимірювань проведено за активної участі дисертантки. Аналіз отриманих даних, їхню інтерпретацію та узагальнення здобувачка проводила спільно з науковим керівником та співавторами публікацій. Вона самостійно опрацювала і систематизувала наукові літературні дані, готувала зразки, здійснила високотемпературні вимірювання електропровідності, в'язкості та термоЕРС, виконала основні розрахунки, сформулювала висновки. Результати досліджень, які наведені у дисертаційній роботі, належать авторці і є її науковим доробком.

4. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором вирішень, висновків, рекомендацій

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 та поставленим завданням. Обґрунтованість і достовірність результатів підтверджується їхньою апробацією на міжнародних конференціях та публікаціями у провідних міжнародних фахових виданнях. Матеріали дисертації доповідалися також на наукових семінарах кафедри фізики металів Львівського національного університету імені Івана Франка. Все це підтверджує їхню достовірність.

5. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру

У дисертаційній роботі вперше:

- систематично експериментально досліджено структурно-чутливі властивості (в'язкість, електропровідність, термоЕРС) багатоелементних розплавів еквіатомних композицій, що є компонентами низькотемпературних багатокомпонентних високоентропійних сплавів;
- показано, що складна структура ентропії процесу “плавлення-затвердіння” зумовлена перебудовою характеру взаємодії між частинками, що приводить до упорядкування розплаву;
- виявлено, що електропровідність Cu-Ga відповідає умові, коли хвильовий вектор $2k_f$ співпадає з положенням першого піку структурного фактору.
- визначено, що в сплавах AlCoCuFe, AlCoCuFeNi та AlCoCrCuFeNi формується двофазова суміш твердих розчинів з ОЦК та ГЦК ґратками.

- відповідно до термодинамічних та структурних критеріїв та ґрунтуючись на даних X-променевого фазового аналізу показано, що структура еквіатомних високоентропійних сплавів AlCoCrCuFeNi має двофазовий характер і містить тверді розчини з ОЦК (тип B2) та ГЦК – граткою (тип A1).

6. Перелік наукових праць, які відображають основні результати дисертації

Основні положення дисертації опубліковано у 8 наукових працях, серед яких шість статей у виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, в тому числі одна наукова публікація у виданні, віднесеному до першого–третього кuartилів (Q2) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

6.1 Статті у закордонних виданнях, індексованих SCOPUS та/або Web of Science

1. V. Sklyarchuk, Yu. Plevachuk, **M. Dufanets** S. Mudry, Y. Kulyk. Structural-Phase State of Nanocrystalline Al-based High-Entropy Alloys with Transition Elements // *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering*, Lviv, Ukraine, UKRAINE SECTION July 2 – 6, 2019. UKRCON-2019 P. 538-541. (Особистий внесок здобувача: участь у проведенні мікроструктурних досліджень високоентропійних розплавів, формулюванні постановки задачі та основних висновків на основі отриманих результатів)
2. **M. Dufanets**, V. Sklyarchuk, Yu. Plevachuk, Y. Kulyk, S. Mudry. The structural and thermodynamic analysis of phase formation processes in equiatomic AlCoCuFeNiCr high entropy alloys. // *J. of Mater Eng and Perform* 29, 7321–7327 (2020). (Особистий внесок здобувача: участь у постановці задачі, отриманні, обговоренні та інтерпретації експериментальних результатів, формулюванні висновків)
3. Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk, G. Pottlacher, T. Leitner, P. Švec Sr., P. Švec, L. Orovcik, **M. Dufanets**, A. Yakymovych. The liquid AlCu₄TiMg alloy: thermophysical and thermodynamic properties. // *High Temperatures–High Pressures* 49(1-2) (2020) 61-73. (Кuartиль **Q2**) (Особистий внесок здобувача: участь у постановці задачі, формулюванні основних положень та висновків)

6.2 Статті у наукових фахових виданнях України категорії «А»

1. В.М. Склярчук, А.С. Якимович, **М.В. Дуфанець** Розрахунок в'язкості розплавів системи Al-Cu. // *Металофизика. Новейшие технол.* 2008, т.30, с.313-319. (Особистий внесок здобувача: участь у формулюванні

постановки задачі та основних висновків на основі аналізу отриманих результатів, інтерпретація результатів досліджень).

2. **М.В. Дуфанець**, В.М. Склярчук, Ю.О. Плевачук. Структурно-чутливі властивості бінарних підсистем на основі Cu високоентропійного сплаву Bi–Cu–Ga–Sn–Pb// *Український фізичний журнал*. 2020, 65(12) 1082-1086 (1089-1093 En). (Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень електрофізичних властивостей розплавів, участь у формулюванні основних положень та висновків, написання статті)
3. **M. Dufanets**, V. Sklyarchuk, Yu. Plevachuk. Thermophysical properties of multicomponent model high-entropy melts.// *Journal of Physical Studies*, 2020, 24(4), 4602 (4p.) (Особистий внесок здобувача: участь у проведенні експериментальних досліджень, обговоренні та інтерпретації результатів, написання статті)

6.3. Публікації у інших наукових фахових виданнях України

4. V. Sklyarchuk, Yu. Plevachuk, **M. Dufanets**. Structure-sensitive properties of model high-entropy liquid alloys. *Visnyk of the Lviv University. Series Physics*. 2016. Issue 52. P. 91-101. (Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень вимірювання в'язкості, електропровідності та термоЕРС модельних розплавів, участь у формулюванні основних положень та висновків).
5. Ю. Плевачук, В. Склярчук, І. Штаблавий, А. Якимович, **М. Дуфанець**. Густина і молярний об'єм високоентропійних сплавів // *Вісник Львівського університету. Серія фізична* 2017. Т. 54. Р. 64–73. (Особистий внесок здобувача: участь у формулюванні постановки задачі та основних висновків, аналіз, обробка та інтерпретація результатів досліджень).
7. *Апробація основних результатів дослідження на конференціях, симпозіумах, семінарах тощо*
 1. Formation of nanocrystalline structure in high-entropy alloys / V. Sklyarchuk, Yu. Plevachuk, **M. Dufanets**, Yu. Kulyk // 7th International Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" NANO-2019. 27-30.08.2019. Lviv, Ukraine. – P.675.
 2. Viscosity and electrophysical properties of the Cu–Pb system – a component for modelling high-entropy alloys / **M. Dufanets**, Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk // XIV International conference on crystal chemistry of intermetallic compounds. 22-26.09.2019.: Book of Abstr. Lviv, Ukraine, 2019. – P 78.

3. Structural and microstructure of Al-based high-entropy alloys with transition elements / **M. Dufanets**, Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk // XXII International Seminar on Physics and Chemistry of Solids, Lviv, June 17-19, 2020.: Book of Abstr. Lviv, Ukraine, – P 49.
4. **Dufanets M.**, Plevachuk Yu., Sklyarchuk V., Kulyk Yu. Formation of metal nanoclusters in Al-based high-entropy alloys with transition elements // “Nanotechnology and nanomaterials” (NANO-2020), 26-29 August 2020, Lviv, Ukraine, Book of Abstracts. P. 358.
5. І. П. Паздрій, **М. В. Дуфанець**. Структурні критерії формування фазового складу еквіатомних сплавів та його вплив на механічні властивості. // технології в машинобудуванні : збірник наукових праць ІХ-ої Міжнародної науково-технічної конференції, 03-07 лютого 2020 року, Львів-Плай. — Львів, 2020. — С. 130–132.
6. М. Дуфанець. Структурно-фазовий стан нанокристалічних високоентропійних сплавів алюмінію з перехідними елементами // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики Еврика-2019, 14-16 травня 2019 року, Львів, тези доповідей. с.А6

8. Наукове значення та практична цінність виконаного дослідження

Отримані в роботі наукові результати і встановлені фізичні закономірності становлять практичний інтерес при створенні методичних та наукових засад розробки високоентропійних сплавів для цілеспрямованого керування їхніми структурою та властивостями, а також використання цього класу сплавів при виготовленні виробів з покращеними властивостями. Важливим є вплив концентрації хімічних елементів на фазовий склад, розподіл елементів між фазовими складовими, структуру і фізико-механічні властивості високоентропійних сплавів.

9. Практична цінність результатів дослідження із зазначенням підприємства або галузі, де вони можуть бути застосовані

Високоентропійні сплави мають комплекс унікальних властивостей, які перевершують за своїми характеристиками більшість сучасних металевих та неметалевих матеріалів. Зокрема, дані матеріали поряд з характеристиками, типовими для металевих сплавів, мають унікальні та незвичайні властивості, які властиві, наприклад, металокерамікам: високу твердість і стійкість по відношенню до високотемпературного руйнування, дисперсійне тверднення, позитивний температурний коефіцієнт зміцнення і високий рівень міцності при підвищених температурах, привабливу зносостійкість, корозійну стійкість

і низку інших характеристик. Крім того, до складу високоентропійних сплавів входять як правило недороговартісні метали, що, у свою чергу, знижує вартість кінцевого продукту.

Унікальні властивості високоентропійних сплавів привертають увагу як об'єкти фундаментальних досліджень, так і з практичної точки зору. Зокрема, їх можна використовувати:

- в атомній енергетиці, оскільки вони мають високу радіаційну стійкість;
- як вогнетривкі матеріали (завдяки високій міцності при підвищеній температурі та стійкості до окислення),
- як м'які магнітні матеріали (суперпарамагнітні або феромагнітні властивості);
- як матеріали для інструментальної промисловості (низькі коефіцієнти тертя, зносостійкі і оптимальне поєднання міцнісних властивостей і надпластичності);
- як стійкі до корозії поверхневі покриття,
- як стійкі до втомлюваності матеріали в аерокосмічній промисловості (низька густина);
- як матеріали для зберігання водню;
- як біоматеріали для виготовлення імплантів.

З огляду на це, розвиток наукових досліджень та технологій, пов'язаних з отриманням та вдосконаленням властивостей високоентропійних сплавів, безумовно є перспективним.

10. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення

Дисертація за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам МОН України.

Дисертацію заслухано та обговорено на фаховому семінарі кафедри фізики металів фізичного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка (протокол № 12 від 14 червня 2021 року). У ході обговорення дисертації суттєвих зауважень, які стосуються суті роботи, не було висунуто.

На основі вищесказаного можна зробити такі висновки, щодо поданої дисертаційної роботи:

1. За актуальністю обраної теми, обсягом, достовірністю та рівнем апробації отриманих результатів, науковою новизною, обґрунтованістю висновків, практичною цінністю дисертаційна робота «Структурна стабільність фаз та електрофізичні властивості високоентропійних сплавів» відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та п. 10 «Тимчасового порядку присудження ступеня

доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України від 06 березня 2019 р. № 167, зі змінами згідно з Постановою Кабінету Міністрів України від 09 червня 2021р №608).

2. Дисертація відповідає спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали галузі знань 10 Природничі науки.

3. Наукові праці Дуфанець М.В., опубліковані за результатами дисертаційної роботи, за кількістю та якістю відповідають п. 11 «Тимчасового порядку присудження ступеня доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України від 06 березня 2019 р. № 167, зі змінами згідно з Постановою Кабінету Міністрів України від 09 червня 2021р №608).

4. Дисертація «Структурна стабільність фаз та електрофізичні властивості високоентропійних сплавів» Дуфанець Марти Василівни рекомендується для подання до розгляду та захисту у спеціалізованій вченій раді.

Рецензенти:

доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри фізики металів
Львівського національного
університету імені Івана Франка

Щерба І.Д.

кандидат фізико-математичних наук, доцент
доцент кафедри фізики металів
Львівського національного
університету імені Івана Франка

Королишин А.В.

17.06.2021р.
(дата)

Підписи проф. Щерби І.Д. та доц. Королишина А.В. засвідчую.

Вчений секретар
Львівського національного
університету імені Івана Франка, доц.



Грабовецька О.С.