

Голові спеціалізованої вченої ради ДФ 35.051.033
Львівського національного університету імені Івана Франка
доктору фізико-математичних наук,
професору Якібчуку П.М.

ВІДГУК

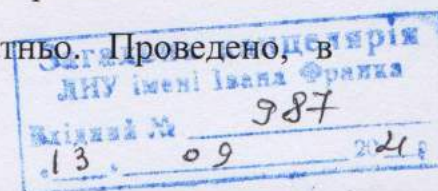
офіційного опонента доктора фізико-математичних наук, професора, завідувача відділу фізики дисперсних систем Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України

Рудя Олександра Дмитровича

на дисертацію **Дуфанець Марти Василівни «Структурна стабільність фаз та електрофізичні властивості високоентропійних сплавів»**, подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

Актуальність теми дослідження. Високоентропійні сплави, для яких характерні високі експлуатаційні характеристики, на даний час досить інтенсивно досліджується. Основною особливістю високоентропійних сплавів є те, що вони утворені на основі твердих розчинів, які є більш стабільними, ніж інтерметалеві сполуки. Сплави з такими структурами мають покращені механічні й електрохімічні характеристики (високу твердість, міцність, зносостійкість, стійкість до окислення, корозії тощо). Завдяки цим властивостям виникає перспектива використовувати ВЕСи як покриття на інструменти, пресформи та як дифузійні бар'єри і магнітом'які плівки. Такі перспективні властивості високоентропійних сплавів пов'язані з повільною дифузією атомів у багатокомпонентній елементній матриці, сильним спотворенням ґратки, яке виникає внаслідок різниці атомних радіусів складових елементів сплаву, та взаємодією між елементами у фазах на основі твердих розчинів

Проте на сьогоднішній час багатокомпонентні високоентропійні екваітомні або близькі до екваітомних сплави вивчені ще недостатньо. Проведено, в



основному; дослідження фазового складу, мікроструктурних і морфологічних особливостей деяких різних за хімічним складом литих високоентропійних сплавів. Для цього використовували насамперед методи скануючої електронної мікроскопії, рентгеноструктурного аналізу, рентгенівської спектроскопії, а також вимірювання деяких фізико-механічних властивостей.

Суттєво стримує розвиток фундаментальних уявлень про високоентропійні сплави, а також не дає можливості знайти нові сфери практичного застосування відсутність єдиної думки про природу явищ та фізичних процесів у цих сплавах, їхні властивості у рідкому стані і їхню трансформацію при охолодженні, а також механізми та послідовності структурно-фазових перетворень під час кристалізації. Саме в рідкому стані відбуваються процеси формування атомарних розчинів і тому у цьому початковому випадку зародження структури найлегше впливати на неї і змінювати у потрібному напрямі. Зважаючи на це, результати досліджень, викладені в дисертаційній роботі, є актуальними.

Структура дисертаційної роботи. Робота містить вступ, чотири розділи, висновки, перелік цитованої літератури та додаток з переліком публікацій здобувача за темою дисертації.

У першому розділі наведено оглядову інформацію про структуру та фізичні властивості високоентропійних сплавів. Особливу увагу звернено на термодинамічні особливості формування та функціонування таких сплавів. Як результат проведеного огляду, у висновках до цього розділу підкреслено мету та актуальність роботи.

Другий розділ дисертаційної роботи стосується опису методики експериментальних досліджень структури сплавів у кристалічному стані та фізичних властивостей у рідкому. Детально описано методику вимірювання електропровідності, термо-ЕРС, в'язкості, густини, та наведено методику оцінки похибок експериментальних досліджень.

У третьому розділі подано результати експериментальних досліджень високоентропійних сплавів з низькою температурою плавлення та дво- три- і чотирикомпонентних сплавів, які формують високоентропійний сплав

BiCuGaSnPb. Тут вивчено температурні залежності в'язкості, електропровідності, термо-ЕРС в широкому інтервалі температур вище точки плавлення.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячений дослідженню структури, морфології поверхні, електрофізичних властивостей густини та молярного об'єму сплавів системи AlCoCrCuFeNi за різного складу та кількості компонент.

Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих в дисертації.

Достовірність результатів роботи забезпечено використанням низки методик, які добре зарекомендували себе раніше. Кожна з цих методик була адаптована для досліджень сплавів як за кімнатних температур, так і після плавлення. Використання апробованих теоретичних підходів, та комп'ютерних методів обробки результатів, відтворюваність результатів та їхнє узгодження як між собою, так і з результатами інших авторів, ґрунтовний аналіз результатів, а також опубліковані результати у рейтингових журналах та апробація на міжнародних наукових конференціях додатково підтверджують обґрунтованість наукових висновків, сформульованих в дисертації.

Новизна отриманих результатів полягає в тому, що 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.

- показано, що в сплавах AlCoCuFe, AlCoCuFeNi та AlCoCrCuFeNi формується двофазова суміш твердих розчинів з ОЦК та ГЦК ґратками. За умови

зменшення вмісту атомів Al посилюється розупорядкування твердого розчину ОЦК фази.

- Встановлено кореляцію між мікротвердістю сплавів і об'ємною часткою фазових складових та їхніми термодинамічними характеристиками.

Значущість дослідження для науки та практики. Завдяки особливому поєднанню компонент, високоентропійні сплави мають унікальні властивості, такі як високі міцність/жорсткість, зносостійкість, підвищену міцність при високих температурах, добру структурну стабільність, стійкість до корозії та окислення. Деякі з цих властивостей не притаманні для класичних сплавів, що робить ВЕС привабливими в багатьох галузях техніки. Практичне значення роботи полягає в тому, що отримані в ній результати можуть бути використані для створення нових високоміцних та зносостійких матеріалів.

Робота є важливою і з фундаментальної точки зору. Зокрема вперше проведено систематичні та комплексні дослідження в'язкості, електропровідності, густини, молярного об'єму та встановлено температурні та концентраційні межі існування атомарних розчинів високоентропійних сплавів у рідкому стані. На основі проведених досліджень запропоновано моделі структури вказаних розплавів, що дає змогу створити рекомендації щодо технології отримання високоентропійних сплавів з рідкого стану.

Повнота викладу основних результатів дисертації в опублікованих працях. Основні результати дисертації висвітлено у 14 наукових публікаціях, серед яких 6 рецензованих статей у виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах даних Web of Science та/або Scopus, 2 статті у фахових наукових виданнях України, 6 публікацій у матеріалах міжнародних і всеукраїнських наукових конференцій.

Дискусійні положення та зауваження до дисертації. Незважаючи на загальне позитивне враження, до роботи є декілька зауважень та запитань:

1. При інтерпретації температурних змін електропровідності легкоплавких сплавів, зокрема сплаву $\text{Cu}_{50}\text{Ga}_{50}$, вказується, що аномальне зростання електропровідності при нагріванні зумовлене зменшенням висоти першого максимуму структурного фактора (ст. 93). Проте, як впливає з теорії Фабера-Займана, електропровідність залежить не так від висоти, як від площі під першим максимумом структурного фактора. На мою думку така інтерпретація є більше формальною, а коректніше було б пов'язувати зміну електропровідності не зі змінами структурного фактора, а з трансформацією атомної структури, яка вже зумовлює його зміну.
2. В параграфі 3.2 дисертацій описано температурні залежності в'язкості розплавів Cu-Bi-Sn-Ga-Pb та розраховано ентропію змішування на їхній основі. Разом з тим, в цьому ж параграфі подано результати розрахунку ентропії плавлення, обчисленої на основі даних електропровідності, обговорення яких міститься в параграфі 3.4, що виглядає нелогічним. Варто було б інформацію про термодинамічні властивості таких розплавів винести в окрему частину роботи з глибшою інтерпретацією.
3. На сторінці 122 вказано, що електропровідність сплаву $\text{Al}_{20}\text{Co}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}$ досліджено в широкому інтервалі температур рідкого стану від температур плавлення до 1750 К. Проте в наступному абзаці обговорюється зміна електропровідності за температур від 300 до 700К.
4. Варто було б вивчити структуру та мікроструктуру легкоплавких сплавів в кристалічному стані та вивчити можливість формування твердих розчинів в них.

Висловлені зауваження не знижують високий науковий рівень роботи. Вони є дискусійними і спрямовані, швидше, на окреслення шляхів подальших досліджень, доцільність продовження яких не викликає сумніву.

Загальний висновок та оцінка дисертації. Робота виконана на належному теоретико-методологічному рівні, є цілісною і завершеною. Тема дисертації є актуальною, її структура добре продумана, а матеріал викладений логічно і

послідовно. Отримані в роботі наукові результати розв'язують важливу наукову проблему – створення нових високоентропійних сплавів та керованої зміни їхніх властивостей. Отримані результати дисертаційної роботи достатньо повно викладені в опублікованих працях. У дисертації не виявлено порушень академічної доброчесності.

Дисертаційна робота Дуфанець Марти Василівни на тему «Структурна стабільність фаз та електрофізичні властивості високоентропійних сплавів» відповідає галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» та вимогам «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах)», затвердженого Постановою Кабінету міністрів України від 23 березня 2016 року №261 (зі змінами і доповненнями від 3 квітня 2019 року №283), п. 10 «Тимчасового порядку присудження ступеня доктора філософії», з наступними змінами, який затверджено Постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 року № 167 та наказу Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 року №40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», а її автор - Дуфанець Марта Василівна заслуговує на присудження їй ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Офіційний опонент:

завідувач відділу фізики дисперсних систем

Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України

доктор фізико-математичних наук, професор

О.Д. Рудь

Підпис О.Д. Рудя засвідчую:

учений секретар Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова

НАН України кандидат фізико-математичних наук



М.І. Савчук