

ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Матвієнко Яни Ігорівни

**“Структура, стабільність та властивості інтерметалевих сполук системи
Al-Cu та композитів на їх основі”,**

представлену на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-
математичних наук за спеціальністю 01.04.13 – фізика металів

Створення композитних матеріалів на основі металевих порошків заданого хімічного складу з необхідним комплексом фізико-механічних властивостей та реакційною здатністю на сьогодні є одним з важливих напрямів фізики металів та фізичного матеріалознавства. Серед таких композитів можна виділити системи Al-Cu як доевтектичного, так і евтектичного складів, які характеризуються малою густиною ($2,9 - 3,3 \text{ г/см}^3$), низькою температурою плавлення ($548,2^\circ \text{C}$), хорошим співвідношенням «висока мікротвердість (модуль Юнга) – прийнятна пластичність» і є перспективними для використання в авіаційній та автомобільній промисловості, а також для адитивних технологій. У свою чергу, композити Al-Cu із вмістом міді до 80 мас.% мають більшу густину, але завдяки високій мікротвердості можуть застосовуватись в машинобудуванні, а також для виготовлення сенсорів, актуаторів та матеріалів для термічного синтезу. Багатошарові фольги Al/Cu аналогічного складу можуть бути застосовані для твердофазного з'єднання матеріалів і для створення мікроактуаторів. Тому розробка композитів на основі системи Al-Cu може, зокрема, сприяти підвищенню енергоефективності транспортних засобів.

Необхідно відзначити, що для отримання металевих композитних матеріалів із прогнозованими властивостями важливим є визначення їх структурно-фазового стану до та після відповідних термомеханічних обробок. Водночас в науковій літературі немає єдиної думки щодо характеристик фазових перетворень у композитах системи Al-Cu, синтезованих у нерівноважних умовах. Зокрема, згідно з відомими експериментальними даними механоактиваційне оброблення елементарних порошків Al і Cu

призводить до утворення метастабільної неупорядкованої фази із об'ємноцентрованою кубічною ґраткою, яку пов'язують із Al_4Cu_9 фазою, але дані стосовно її структури та стехіометрії, а також послідовності фазових перетворень після термомеханічних обробок порошкових композитів Al-Cu є суттєво неповними. Практично нез'ясованим залишається і питання щодо впливу малих добавок (до 5 мас.%) графіту на зміну структурно-фазового стану і механічні властивості порошкових композитів Al-Cu хімічного складу, близького до евтектичного, отриманих механічним легуванням і наступними термомеханічними обробками.

Таким чином, на сьогодні існує ряд невирішених питань щодо фізики фазових перетворень у композитах, отриманих у суттєво нерівноважних умовах. З іншого боку, прогнозування фізичних характеристик металевих композитів залежно від термомеханічних режимів їх формування є необхідною умовою створення сучасних конструкційних матеріалів. Тому дисертаційна робота Матвієнко Я.І. "Структура, стабільність та властивості інтерметалевих сполук системи Al-Cu та композитів на їх основі", що присвячена дослідженню фазового складу та фізичних характеристик композитів на основі системи Al-Cu, отриманих в умовах активної механотермічної обробки, безумовно, є **актуальним науковим дослідженням**,

Дисертаційна робота Матвієнко Я.І. була виконана в рамках плану науково-дослідних робіт, які проводяться в Інституті металофізики імені Г. В. Курдюмова НАН України. Дисертація "Структура, стабільність та властивості інтерметалевих сполук системи Al-Cu та композитів на їх основі" викладена на 163 сторінках, з них 116 сторінок основного тексту, який містить 69 рисунки, 25 таблиць. Список використаних джерел становить 189 найменувань.

Перший розділ дисертації присвячено викладенню літературних даних щодо отримання порошкових композитів Al-Cu методом механоактиваційного оброблення елементарних порошків та багатошарових фольг Al/Cu методом фізичного осадження, дослідження їх структурно-фазового стану до та після термомеханічних обробок, умов та схем формування неупорядкованої ОЦК-

Al_4Cu_9 фази, а також впливу добавок графіту (до 9 мас.%), на структурно-фазовий стан порошкових композитів Al-Cu/C і їх механічні властивості. Приділено увагу розгляду практичного застосування таких систем. Необхідно відзначити ґрунтовний характер літературного огляду, залучення до розгляду значної кількості літературних джерел. Це дозволило автору кваліфіковано обґрунтувати та сформулювати задачі власного дослідження.

У **другому розділі** дисертації надається опис методів синтезу порошкових композитів Al-Cu і Al-Cu/C та багатошарових фольг Al/Cu , що досліджуються, та методів, які використовувалися при встановленні їх структурно-фазового стану, а також методик вимірювання механічних властивостей. Зокрема, вказуються характеристики вихідних сумішей елементарних порошків Al і Cu (із вмістом міді 17, 33 і 80 мас.%) без і з графітовою добавкою (5 мас.%), різні енерго-часові впливи на них в процесі механічного легування, а також наводяться характеристики порошкових композитів Al-Cu і Al-Cu/C після спікання та його режими, використані у роботі. Вказано також певні характеристики багатошарових фольг Al/Cu .

У **третьому розділі** викладені результати експериментального дослідження структурно-фазового стану порошкових композитів Al-Cu і Al-Cu/C із вмістом міді 17, 33 та 80 ваг. % після механічного легування за різних режимів та їх термомеханічних обробок. Окрім того, наведено результати досліджень мікроструктури та фазового складу, а також реакційної здатності та механічних властивостей порошкових композитів Al-Cu і Al-Cu/C після холодного пресування та спікання у порівнянні із сплавами аналогічного складу.

У **четвертому розділі** наведені результати експериментального дослідження структурно-фазового стану багатошарових фольг Al/Cu із вмістом міді 33 і 80 ваг. %. у вихідному стані (після осадження) та після відпалів. Досліджено вплив модифікації мікроструктури та фазового складу багатошарових фольг на їх механічні властивості та реакційну здатність.

У п'ятому розділі на основі експериментальних результатів рентгеноструктурного аналізу та літературних даних побудовано елементарні ґратки і відповідні рентгенівські дифрактограми інтерметалевих фаз та пересичених твердих розчинів. Підтверджено можливість формування метастабільної неупорядкованої Al_4Cu_9 фази та уточнено її структуру у вигляді ОЦК-ґратки із параметром $a = 0,2951$ нм (структурний тип A2, пр. група $Im\bar{3}m$) із заповненістю атомами Al і Cu (50 на 50 ат. %), що подібна до β -фази. Показано можливість її впорядкування у рівноважну $\gamma_2\text{-Al}_4\text{Cu}_9$ фазу (структурного типу D8₃). Зроблено припущення про дифузійний і зсувний механізми перетворень у порошкових композитах і багатошарових фольгах, відповідно.

Необхідно відзначити **комплексний характер** досліджень, виконаних в дисертаційній роботі Матвієнко Я. І. для визначення впливу високоенергетичного механоактиваційного оброблення елементарних порошків Al і Cu без/з добавкою графіту, їх наступних термомеханічних обробок, а також відпалів багатошарових фольг Al/Cu, отриманих методом електронно-променевого осадження, на структуроутворення у композитах Al-Cu і Al-Cu/C. Для цього залучалися рентгеноструктурний аналіз, диференційна скануюча калориметрія, ядерний магнітний резонанс, раманівська спектроскопія, а також сканувальна електронна мікроскопія. Механічні властивості зразків досліджувалася із використанням методу динамічного індентування. Спільне використання вказаних методик дозволило встановити зв'язок між закономірностями фазоутворення у досліджуваних композитах на основі системи Al-Cu після відповідних обробок, а також структурою і стабільністю синтезованих інтерметалевих сполук та механічними властивостями і реакційною здатністю композитів.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів і висновків дисертаційної роботи забезпечується добре продуманою та аргументованою постановкою експериментальних задач, використанням вказаних вище сучасних експериментальних методів дослідження, результати яких є

взаємодоповнюючими, коректним методичним забезпеченням обробки отриманих експериментальних результатів з широким залученням для порівняння відомих у літературі даних інших авторів, мінімізацією можливих експериментальних похибок.

Поєднання ретельно виконаних експериментальних досліджень та їх коректного аналізу дозволило Матвієнко Я. І. отримати ряд **нових наукових результатів**, найголовнішими з яких є такі:

- вперше визначено умови формування метастабільної неупорядкованої Al_4Cu_9 фази у широкому концентраційному діапазоні в результаті високоенергетичного механоактиваційного оброблення у планетарному млині елементарних порошків Al і Cu без і з графітовою добавкою та відпалів багат шарових фольг Al/Cu. Уточнено її структуру у вигляді ОЦК-гратки структурного типу A2 із параметром $a = 0,2951$ нм. Показано можливість її впорядкування у $\gamma_2\text{-Al}_4\text{Cu}_9$ фазу (структурного типу D8₃) в композитах із вмістом міді 80 мас. %.

- на основі встановлених залежностей між параметрами гратки Al і Cu від часу механічного легування у порошкових композитах Al-Cu і Al-Cu/C та від температури відпалу у БФ Al/Cu встановлено, що процес фазоутворення у всіх композитах відбувається шляхом формування пересиченого твердого розчину Al(Cu) і Cu(Al). Розвинуто уявлення про механізми ГЦК \rightarrow ОЦК перетворень в матеріалах системи Al-Cu, отриманих у нерівноважних умовах. Показано, що у порошкових композитах і багат шарових фольгах евтектичного складу воно відбувається за участі фази нижчої симетрії ОЦТ $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$.

- вперше показано, що введення 5 мас. % графіту до елементарних порошків Al і Cu сприяє їх кращому подрібненню та насиченню дефектами в процесі механічного легування. Кристалічний графіт під час помолу, перетворюючись на аморфний, обволікає металеві частинки, перешкоджає їх агломерації та уповільнює реакційні процеси.

- одержано нові результати про вплив модифікації структурно-фазового стану порошкових композитів Al-Cu і Al-Cu/C після холодного пресування та

спікання, а також відпалів багатошарових фольг Al/Cu на їх механічні властивості та реакційну здатність. Підтверджено ефективність введення 5 мас.% графітової добавки, а також формування метастабільної неупорядкованої ОЦК- Al_4Cu_9 фази у порошкових композитах Al-Cu і Al-Cu/C та багатошарових фольгах Al/Cu після відповідних обробок для створення металоматричних композитів із підвищеним рівнем мікротвердості і прийнятним коефіцієнтом пластичності.

Практичне значення отриманих результатів визначається розробкою наукових засад формування порошкових композитів Al-Cu та Al-Cu/C, а також багатошарових фольг Al/Cu із підвищеним рівнем механічних властивостей та реакційної здатності. Отримані у роботі наукові результати можуть бути використані у науково-дослідній роботі інститутів Національної Академії Наук України, а також при викладанні спеціальних курсів з фізики металів, наносистем та вуглецевих матеріалів, зокрема, на фізичному факультеті Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Розглядаючи дисертаційну роботу Матвієнко Я. І. , необхідно висловити ряд зауважень:

1. Кількісний рентгеноструктурний аналіз зразків композитів у представленій роботі виконувався з використанням прямого методу, який передбачає розрахунок факторів інтенсивності структурних максимумів для зразків Al-Cu, отриманих при різних умовах, за яких зразки, взагалі кажучи, можуть мати різну морфологію та упорядкування. У той же час, при проведенні профільного аналізу у роботі використовувалися модельні еталонні зразки систем Al-Cu. Тому коректніше було б скористатись методом зовнішнього еталону для більш точного визначення об'ємної частки кожної із фаз, або, принаймні, порівняти кількісні дані фазового аналізу, отримані двома методами, хоча б для декількох зразків.
2. При оцінці розмірів блоків когерентного розсіювання методом Вільямсона–Холла апроксимація контурів структурних ліній здійснювалася лоренціанами. Точність такої оцінки була б вищою, якби

для порівняння було виконано апроксимацію іншими функціями, в першу чергу, гауссианами.

3. Експериментальні дані текстурного аналізу, що свідчать про зсувний характер ГЦК \rightarrow ОЦК перетворення, є неповними, оскільки прямі полюсні фігури (ППФ) $\{011\}$ і $\{001\}$ для ОЦК фази після відпалу при 150 °С у роботі представлені тільки для багатошарових фольг Al/Cu із вмістом міді 80 ваг. % Cu періоду 30 нм. Але варто було б виконати аналогічні дослідження також і для багатошарових фольг Al/Cu евтектичного складу.
4. Важливий результат про впорядкування метастабільної неупорядкованої ОЦК-фази (структурного типу A2) у γ_2 -Al₄Cu₉ фазу (структурного типу D8₃) зроблено, виходячи із присутності надструктурних (210), (300), (522) і основних піків від стабільної Al₄Cu₉ фази на рентгенівських дифрактограмах порошкових композитів Al-Cu/C і багатошарових фольг Al/Cu із вмістом міді 80 мас.% після відпалу при температурі 500°С і вище. У той же час, дані щодо формування стабільної γ_2 -Al₄Cu₉ фази з неупорядкованої метастабільної ОЦК-фази були б більш повними, якби були проаналізовані співвідношення інтенсивностей регулярних максимумів ($h+k+l=4n$) і надструктурних піків (h,k,l непарні).
5. На жаль, поза увагою у роботі залишились результати щодо особливостей елементного складу та хімічного зв'язку у порошкових композитах Al-Cu/C, отримані методом рентгенівської фотоелектронної спектроскопії, які було представлено в одній із публікацій авторки.

Проте, висловлені зауваження не ставлять під сумнів справедливості основних результатів та висновків роботи.

За результатами проведених при виконанні дисертаційної роботи досліджень автором опубліковано 13 друкованих праць, з яких 2 статті опубліковані в іноземних виданнях, 6 статей у спеціалізованих наукових виданнях, що відносяться до переліку наукових фахових видань України, затвердженого наказами МОН України і входять до міжнародної

наукометричної бази даних Scopus, 5 – у збірниках праць міжнародних конференцій. Представлені роботи та автореферат, в якому визначено особистий внесок здобувача, повністю відображають зміст та висновки дисертаційної роботи. Необхідно відзначити високу якість оформлення дисертаційної роботи. Зокрема, робота написана чітко та зрозуміло, викладення матеріалу логічне та послідовне, кількість стилістичних та граматичних огріхів, друкарських помилок мінімальна. Наведені графіки та діаграми побудовані ретельно та якісно, містять усю необхідну інформацію,

У цілому оцінюючи дисертаційну роботу Матвієнко Яни Ігорівни “Структура, стабільність та властивості інтерметалевих сполук системи Al-Cu та композитів на їх основі”, вважаю що за рівнем наукової новизни, обґрунтованості та достовірності отриманих результатів, а також зважаючи на актуальність та практичну цінність виконаних досліджень вона відповідає всім вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженим постановою КМ України від 24 липня 2013 р. №567 щодо кандидатських дисертацій, а її авторка Матвієнко Яна Ігорівна заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю.01.04.13 – фізика металів.

Завідувач кафедри загальної фізики
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка,
д. ф.-м. н., професор



М.О. Боровий

Підпис зав. кафедри Борового М.О. засвідчую:

Підпис засвідчую
Боровий М.О.
Н.Г. Ульяна Н.В.
03.12.2020р.

