

До спеціалізованої ради ДФ 26.232.03  
В Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України  
бульвар Академіка Вернадського, 34, Київ, 03142

## ВІДГУК

Офіційного опонента Гречанюка Миколи Івановича, доктора технічних наук, провідного наукового співробітника Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України на дисертаційне дослідження Ліхацького Річарда Федоровича на тему: «Одержання жароміцних сплавів систем Cu-V та Cu-Cr-Zr-V в умовах електронно-променевої ливарної технології» представлене на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 «Металургія», галузь знань 13 – Механічна інженерія.

На розгляд офіційному опоненту були надані наступні матеріали: дисертація загальним об'ємом 159 сторінок машинописного тексту, що включає 131 сторінку основного тексту включаючи 11 таблиць, 75 рисунків, список використаних джерел зі 160 найменувань, а також додаток на 3 сторінках.

**Актуальність теми дисертації.** Сучасна промисловість постійно потребує інноваційних матеріалів та ефективних способів їх виробництва. Електротехнічна галузь, як одна з найбільш розвинених, орієнтується на використання сплавів, що можуть мати більш високі експлуатаційні характеристики, ніж класична мідь та бронзи. Зростаючий інтерес в цьому питанні виникає до сплавів на основі системи Cu-Cr-Zr, в яких через деформаційну і термічну обробку реалізується механізм дисперсійного зміцнення нерозчинними, або малорозчинними інтерметалідами. Схожий механізм можна реалізувати в мідних сплавах монотектичних систем, зокрема – Cu-V. В більшості випадків перелічені сплави одержують

методами порошкової металургії та піддають інтенсивній пластичній деформації. Це робить вартість готових виробів надзвичайно високою. Таким чином, розробка більш дешевих, в першу чергу ливарних, технологій виробництва мідних сплавів вказаних систем є надзвичайно актуальною задачею. Доволі вдалим в цьому плані можна вважати електронно-променеву ливарну технологію (ЕПЛТ), яка використовувалась для проведення представлених досліджень. Даний спосіб має багато переваг, коли мова йде про плавлення високореакційних і тугоплавких металів, які, власне, і є основними компонентами сплавів досліджуваних систем Cu-V та Cu-Cr-Zr-V. ЕПЛТ також є більш дешевим і продуктивним рішенням їх виробництва в порівнянні з порошковою металургією.

**Загальна характеристика дисертаційної роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та додатків.

**У першому розділі** проаналізовано методи одержання сучасних жароміцних електротехнічних сплавів на основі міді. Досліджено вплив легування елементами, що підвищують жароміцність сплаву. Проведена оцінка впливу легуючих елементів на кондуктивні властивості. Описано особливості підвищення міцності та інших характеристик сплавів застосуванням деформаційної та термічної обробок. Дослідження показали, що створення низьколегованих мідних сплавів з нерозчинними частинками є перспективною задачею. Проаналізовано можливий вплив ванадію на зміну фізичних, механічних та експлуатаційних характеристик як чистої міді, так і сплавів Cu-Cr-Zr.

**У другому розділі** автором описані матеріали, обладнання та методики приготування розплавів, що використовувались при проведенні експериментів, а також методики та методи аналізу, що застосовувались для дослідження властивостей і структури одержаних зразків.

**У третьому розділі** розглянуто особливості розподілу нерозчинних частинок ванадію в міді при заливці та кристалізації сплавів систем Cu-V за

допомогою комп'ютерного моделювання в середовищі Ansys. Автором зазначається, що основним фактором, який впливає на їх розподіл, є сили конвективних потоків, що виникають при охолодженні розплаву у формі. Змодельовані конвективні потоки в розплаві за умов, наближених до експериментальних, мають спіралеподібну форму. Це явище було підтверджено експериментально. Також було розглянуто вплив різних умов заливки на розподіл включень ванадію. Виявлено, що такі фактори, як температура перегріву розплаву, швидкість заливки та особливості підводу розплаву до ливарної форми, можуть призвести до зміни геометрії та розмірів конвективних потоків, а отже – до зміни розподілу включень ванадію в об'ємі виливків.

**У четвертому розділі** наведено результати експериментальних плавок зразків сплавів систем Cu-V та Cu-Cr-Zr-V. Для сплавів Cu-V встановлено, що при вмісті ванадію понад 1 %мас. включення цього елемента мають спіралеподібний розподіл в об'ємі виливка. При вмісті ванадію 0,1-0,3 %мас. розмір включень становить 0,5-2 мкм, їх форма є сферичною, а розподіл рівномірний. Механічні властивості сплаву Cu-0,2V значно кращі, ніж у міді марки МЗ в литому стані ( $\sigma_b = 240$  МПа). Після індукційного переплаву сплави з вмістом ванадію до 0,3 %мас. зберігають сприятливу структуру та практично не змінюють своїх властивостей. Для сплавів Cu-Cr-Zr-V встановлено, що при вмісті цирконію до 0,3 %мас. спостерігається утворення комплексних включень на основі цирконію та ванадію, які знаходяться у площині зерна. Таким чином, цирконій переходить зі свого класичного розташування на межах зерен в їх об'єм. Аналіз механічних властивостей сплаву Cu-0,03Cr-0,05Zr-0,07V показав, що цей сплав має комплекс механічних властивостей на рівні сплаву Cu-0,1Cr-0,1Zr, що свідчить про можливість зниження кількості хрому та цирконію при легуванні таких сплавів з рахунок додавання ванадію до 0,1 %мас. Леговані ванадієм сплави вирізняються високими показниками жароміцності. Для складу Cu-0,2V при 300 °С міцність складала 150 МПа, відносне подовження – 23%, а відносне



звуження – 25%. Для сплаву Cu-0,03Cr-0,05Zr-0,07V при 500 °C ці дані становлять відповідно 135 МПа, 26% та 31%. Це вказує на високу стабільність властивостей, які є досить високими для такого низького вмісту легуючих компонентів у сплаві. Також приведені дослідження зносостійкості та електропровідності. Показано, що експериментальний сплав Cu-0,03Cr-0,05Zr-0,07V чудово проявляє себе в парі тертя з чистою міддю, на що вказує низький показник взаємного зношування. При цьому електропровідність цього сплаву мало відрізняється від міді марки МЗ.

**У висновках** викладені найбільш важливі наукові та практичні результати, одержані в дисертаційному дослідженні.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність і новизна** підтверджується застосуванням сучасних методів дослідження, таких як системний аналіз інформаційних джерел, електронна мікроскопія, визначення локального хімічного складу структурно-фазових складових матеріалу, механічні випробування, в тому числі за високих температур, визначення електропровідності та зносостійкості досліджуваних зразків.

**В практичному значенні** важливість роботи підтверджується потенційно широкою сферою застосування таких сплавів в транспортній галузі в якості контактних елементів струмоприймачів та деталей двигунів.

**Наукова новизна роботи** полягає у розробленні нової технології одержання мідних сплавів, легованих ванадієм та покращення електротехнічних властивостей низьколегованих хром-цирконієвих бронз шляхом додавання ванадію:

Вперше одержано зразки сплавів системи Cu-V з вмістом ванадію 0,2-2 мас.% в умовах електронно-променевої ливарної технології. Структура зразків характеризувалися рівномірним розподілом включень ванадію та високою дрібнодисперсністю. Включення мали розміри близько 1-3 мкм. Найкращий комплекс структурних характеристик та механічних

властивостей відповідає сплаву Cu-0,2V, який можливо піддавати вторинній переробці без втрати властивостей.

Встановлено, що додавання до 0,1 мас.% ванадію може суттєво знизити вміст хрому та цирконію в жароміцних бронзах без втрати міцності, що помітно з порівняння властивостей відомого сплаву Cu-0,4Cr-0,1Zr та експериментального сплаву Cu-0,03Cr-0,05Zr-0,07V.

Показано, що ванадій знижує вміст цирконію на межах зерен міді, зв'язуючись з ним та розташовуючись всередині зерен у вигляді сферичних дисперсних включень, підвищуючи електропровідність матеріалу. При цьому, після деформації та рекристалізації дисперсні частинки зміцнюючих фаз знаходяться на межах перекристалізованих зерен, що вказує на стримання ними процесів збиральної рекристалізації та підвищення високотемпературної міцності.

#### **Повнота викладення дисертаційної роботи у наукових фахових виданнях**

Достовірність наукових положень дисертації підтверджується публікаціями та виступами на наукових конференціях.

Матеріали дисертації повно викладені у 12 наукових працях. 5 статей здобувача опубліковано у наукових фахових виданнях України. Апробацію дисертаційної роботи представлено тезами доповідей у збірниках матеріалів Міжнародних науково-практичних конференцій.

#### **Зауваження до дисертації**

Робота характеризується глибоким рівнем знань і відповідає вимогам, що пред'являються до робіт на здобуття наукового ступеня «доктор філософії». Проте, є кілька правок та зауважень відносно даної дисертаційної роботи:

1. В другому розділі мало описується застосований процес деформації та термічної обробки. В цілому в дисертаційній роботі не

обґрунтовано вибір однакового типу термічної обробки для сплавів систем Cu-V та Cu-Cr-Zr-V.

2. В четвертому розділі дані елементного розподілу компонентів деяких зразків для конкретних елементів не несуть ніякої видимої інформативності. Можливо, було б варто їх прибрати та збільшити розмір основних рисунків мікроструктури.

3. Дослідження зносостійкості сплавів можна було провести не лише з чистою міддю, але й з низьколегованою промисловою хром-цирконієвою бронзою чи з розробленими експериментальними сплавами. Довговічність таких контактних пар теоретично могла б бути суттєво більшою.

4. Автор досліджує малолеговані сплави на основі міді з добавками Cr, Zr, V, в яких концентрація легуючих компонентів в більшості випадків не перевищує 1 % мас. Не зрозуміло, яким чином дисертанту вдається контролювати такі незначні концентраційні діапазони при електронно-променевій плавці зазначених сплавів.

### **Загальний висновок**

Дисертаційну роботу «Одержання жароміцних сплавів систем Cu-V та Cu-Cr-Zr-V в умовах електронно-променевої ливарної технології» виконано на високому науковому рівні. Робота присвячена вирішенню важливих наукових та практичних задач – одержання литих мідних сплавів електротехнічного призначення з підвищеними механічними властивостями та жароміцністю за допомогою електронно-променевої ливарної технології, яка може використовуватись як високопродуктивна альтернатива поширеним технологіям порошкової металургії. До того ж, можливість подальшого переплаву одержаних в умовах електронно-променевої ливарної технології мідних сплавів легуваних ванадієм додатково підсилює аргументи щодо доцільності розроблених технологічних рішень.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Ліхацького Річарда Федоровича на тему «Одержання жароміцних сплавів



систем Cu-V та Cu-Cr-Zr-V в умовах електронно-променевої ливарної технології» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 13 – Механічна інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6–9 «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 від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Ліхацький Річард Федорович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 136 «Металургія»

Офіційний опонент,

д. т. н., пров. н. с.

ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України



Микола ГРЕЧАНЮК

Підпис М. І. Гречанюка засвідчую:

в.о. ученого секретаря

ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України

к. ф.-м. н., с. д.



Денис МИРОНЮК