

ВІДГУК

Офіційного опонента Мініцького Анатолія Вячеславовича, доктора технічних наук, професора кафедри високотемпературних матеріалів та порошкової металургії Національного технічного університету України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

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 сторінки основного тексту включаючи 11 таблиць, 75 рисунків, список використаних джерел зі 160 найменувань, а також додаток на 3 сторінках.

Актуальність теми дисертації. Загально відомо, що в електротехніці мідні сплави грають ключову роль. Компанії в усьому світі активно розвивають можливості одержання нових мідних сплавів, що мали б краще поєднання фізичних та експлуатаційних властивостей для використання в різних умовах. Одним з важливих аспектів розвитку цього напрямку є отримання жароміцних електротехнічних сплавів. На даний момент такі матеріали одержують або методами інтенсивної пластичної деформації шаруватих заготовок, або методами порошкової металургії, що пов'язано з особливістю систем легування міді такими елементами, як хром, вольфрам, молібден, цирконій та ін. Виплавка таких сплавів в умовах електронно-

променевої ливарної технології (ЕПЛТ) може бути ефективним рішенням для одержання мідних жароміцних композицій з потрібним комплексом механічних властивостей. В представленому дослідженні розглядались технологічні аспекти одержання виробів з мідних сплавів систем Cu-V та Cu-Cr-Zr-V за допомогою методу ЕПЛТ. Можливість створення сплавів міді з ванадієм таким способом є унікальною, адже в більшості випадків такі композиції неможливо одержати ливарними та металургійними методами. Одержання таких сплавів самих-по-собі, а також додавання ванадію до відомих сплавів системи Cu-Cr-Zr, дозволяє знизити вміст хрому та цирконію без втрат міцності та електропровідності. Ці переваги зумовлюють великий інтерес до використання методу ЕПЛТ для виготовлення литих заготовок, напів-фабрикатів та готових виробів зі сплавів систем Cu-V та Cu-Cr-Zr-V.

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

У першому розділі автор аналізує сучасні методи виготовлення жароміцних електротехнічних сплавів на основі міді. В ньому детально розглянуто вплив вибору та кількості легуючих компонентів на характеристики цих сплавів. Описано рішення для підвищення механічних та експлуатаційних властивостей сплавів, включаючи деформаційну, термічну обробку та обробку розплавів при використанні ливарних методів. Узагальнено висновки стосовно створення низьколегованих мідних сплавів з нерозчинними зміцнюючими частинками у їх структурі. Визначено цілі отримання напівфабрикатів з найбільш перспективних сплавів та розглянуто ливарні процеси як технологічно ефективні та економічно доцільні для подальшого промислового вирішення питань виробництва обраних сплавів.

У другому розділі автор описує матеріали та обладнання, що використовувались при проведенні експериментів, а також методики та методи аналізу, що застосовувались для дослідження структурно-фазових

характеристик, механічних та експлуатаційних властивостей одержаних сплавів.

У третьому розділі автор описує проведення теоретичного та комп'ютерного моделювання процесів заливки та кристалізації сплавів системи Cu-V за різних технологічних умов. Аналіз процесу утворення та руху нерозчинних дисперсних включень ванадію в мідному розплаві в процесі охолодження вказав на переважання впливу у їх розподілі конвективних потоків, які виникають через різницю температурних полів. Комп'ютерне моделювання в середовищі Ansys показало спіралеподібний рух конвективних потоків, що далі було підтверджено експериментально. Також були створені моделі заливання при різних температурах перегріву розплаву, швидкостей та особливостей самого процесу заливки металу і їх вплив на процес кристалізації та можливість утворення дефектів.

У четвертому розділі автор провів експериментальну виплавку сплавів систем Cu-V та Cu-Cr-Zr-V. В сплавах з вмістом ванадію більше 1% мас. було виявлено спіралеподібний розподіл включень. Експериментально підтверджено, що додавання ванадію у мідь у межах 0,1-0,3 мас.% призводить до формування рівномірно розподілених нерозчинних зміцнюючих включень ванадію діаметром 0,5-2 мкм. Механічні властивості сплаву Cu-0,2V у литому стані ($\sigma_b = 240$ МПа) перевищують є вищими ніж у міді марки МЗ. Після переплавляння індукційним способом одержаних в умовах ЕПЛТ зразків сплавів Cu-V практично повністю зберігаються їх структурні особливості та властивості. Додавання ванадію до сплавів систем Cu-Cr-Zr при вмісті цирконію до 0,3 мас.% призводить до утворення первинних інтерметалідних включень, що сприяє зменшенню вмісту цирконію на межах зерен і позитивно впливає на міцність та електропровідність сплаву. Аналіз механічних властивостей економнолегованого сплаву Cu-0,03Cr-0,05Zr-0,07V показав можливість зменшення кількості хрому та цирконію таких сплавів при легуванні ванадієм до 0,1 мас.% зі збереженням комплексу властивостей. Леговані

ванадієм сплави відзначаються високою міцністю при підвищених температурах (до 300 °C), показуючи стабільність властивостей при низькому вмісті легуючих компонентів. Електропровідність досліджуваних сплавів відрізняється від електротехнічної міді не більше ніж на 8%.

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 в теоретичному та науково-практичному аспектах підтверджується використанням методів системного аналізу актуальних джерел інформації, застосуванням сучасних засобів моделювання, планування експериментів, обґрунтуванням підбору складів експериментальних сплавів, використанням сучасного обладнання для проведення мікроструктурного аналізу, механічних випробувань, в тому числі за високих температур, визначення електропровідності та зносостійкості досліджуваних зразків.

В практичному значенні важливість роботи підтверджується широкими можливостями застосування одержаних сплавів в багатьох галузях в якості контактних пар, деталей двигунів, високострумових комутаторів, тощо.

Наукова новизна роботи полягає у розробці нових технологічних підходів одержання сплавів системи Cu-V високопродуктивним ливарним способом, а також в можливості покращення експлуатаційних властивостей низьколегованих хром-цирконієвих бронз при спрощені та здешевлені їх виробництва:

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 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 повною мірою 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 має високий науковий рівень і відповідає вимогам, які пред'являються до робіт на здобуття наукового ступеня «доктора філософії». Однак, у роботі є декілька незрозумілих питань:

1. В першому розділі роботи автор не повністю розкриває закономірності зниження електропровідності мідних сплавів не заглиблюючись у вплив структури сплавів на ці властивості.

2. В другому розділі мало обґрунтовано вибір конкретного найбільш оптимального технологічного режиму одержання сплавів системи Cu-V.

3. В четвертому розділі мало пояснюється вибір режимів термічної обробки для різних сплавів.

4. Чи можливо в подальшому одержання досліджуваним способом сплавів міді з додаванням молібдену, гафнію, або вольфраму, які так само здатні підвищувати експлуатаційні характеристики мідних сплавів електротехнічного призначення?

Загальний висновок

Дисертаційну роботу «Одержання жароміцних сплавів систем Cu-V та Cu-Cr-Zr-V в умовах електронно-променевої ливарної технології» виконано на високому науково-технічному рівні. Вона містить нові рішення важливих наукових та практичних задачі – одержання мідних сплавів системи Cu-V електротехнічного призначення, які по суті є металоматричними композитами і мають високий рівень міцності та жароміцності при збереженні електропровідності на доволі високому рівні. Створене технологічне рішення їх одержання в умовах електронно-променевої ливарної технології є досить ефективним, економічно вигідним та високопродуктивним способом, альтернативним багатостадійній деформаційній обробці та методам порошкової металургії.

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., проф. кафедри ВТМтаПМ
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Анатолій МІНІЦЬКИЙ

Підпис А. В. Мініцького засвідчую:

