

ВИСНОВОК

Про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

Ліхацького Річарда Федоровича

за темою «**Одержання жароміцних сплавів систем Cu-V та Cu-Cr-Zr-V в умовах електронно-променевої ливарної технології**»,
поданої на здобуття наукового ступеня **доктора філософії**
за спеціальністю **136 – «Металургія»**

Дисертаційна робота Ліхацького Річарда Федоровича присвячена створенню та дослідженню технологічних рішень, спрямованих на одержання мідних жароміцних сплавів електротехнічного призначення, які поєднують високий рівень експлуатаційних характеристик з максимальним збереженням електропровідності за рахунок зниженого вмісту легуючих елементів та ефективного зміцнення великою кількістю нерозчинних зміцнюючих частинок мікронного та субмікронного розмірів. Поставлені задачі роботи було вирішено завдяки ефективному легуванню міді ванадієм, хромом та цирконієм, що вдалося реалізувати завдяки використанню електронно-променевої ливарної технології.

Актуальність роботи.

Серед сучасних електротехнічних матеріалів мідь та її сплави є незамінними, тому з кожним роком зростає їх виробництво, особливо тих, які застосовуються для роботи в екстремальних умовах. Ведучі світові компанії, такі як такі як ABB, Siemens, General Electrics, Mitsubishi Electric, Fuji Electric, China Electric Power Equipment and Technology Group, Alstom та інші, постійно розробляють нові мідні сплави та технології виробництва з них виробів для застосування у передових зразках техніки. Для цього класу матеріалів важливими є такі характеристики, як електропровідність, комплекс високих механічних властивостей за умов підвищених температур, зношуванні та електродугової ерозії.

Таким чином, особливий інтерес в розрізі наведених вимог викликають жароміцні мідні сплави з високими кондуктивними властивостями та

підвищеною зносостійкістю. Вони мають надзвичайно широкі сфери застосування в сучасному електричному транспорті, комутаційних вузлах мереж з високим струмом та інших струмонавантажених деталях. Використання кондуктивних мідних сплавів для роботи в екстремальних умовах постійно зростає також в машинобудуванні, енергетичній, авіакосмічній промисловості та інших галузях, що підкреслює актуальність розробок і досліджень в цьому напрямку.

Найбільш поширеними промисловими електротехнічними жароміцними мідними сплавами є хром-цирконієві бронзи. Максимальні показники міцності та жароміцності при досить низькій, але задовільній електропровідності мають сплави з вмістом хрому понад 5 мас.% та цирконію понад 3 мас.% . За більш помірних вимог доцільніше використовувати хром-цирконієві бронзи з меншим вмістом легуючих елементів, так як їх електропровідність буде вищою, а виробництво простішим і дешевшим. Прикладами є композиції типу Cu-5Cr-2Zr та Cu-2Cr-1Zr. Виробництво таких матеріалів часто вимагає комплексних високовартісних технологічних рішень, які передбачають застосування методів порошкової металургії та інтенсивної пластичної деформації.

Окрім хрому та цирконію електротехнічні жароміцні сплави на основі міді легують елементами, що незначно знижують електропровідність. До них відносяться срібло, кадмій, ванадій та гафній. На сьогоднішній день питання розробки мідних жароміцних сплавів електротехнічного призначення, зокрема легованих ванадієм, залишається маловивченим, але викликає все більший інтерес. Промислове виготовлення готових виробів з таких матеріалів також є складною задачею, яка вимагає більш економічно доцільних технологічних рішень, зокрема – застосування ливарних технологій.

Одним із найбільш підходящих технологічних рішень в даному випадку є електронно-променева ливарна технологія (ЕПЛТ). Вона дозволяє переплавляти високореакційні та тугоплавкі метали, чинити рафінуючий

вплив на рідкий метал, перегрівати та одержувати максимально однорідні розплави. Все це забезпечується за рахунок поєднання незалежного концентрованого джерела нагріву, вакууму та електромагнітного перемішування розплаву.

Одержання сплавів систем Cu-V та Cu-Cr-Zr-V в умовах електронно-променевої ливарної технології залишалось досі невивченим. З урахуванням монотектичного типу діаграми стану мідь-ванадій та меншої на 25 % густини ванадію, приготування таких розплавів та їх подальше лиття потребували визначення оптимальних робочих технологічних параметрів та знаходження доцільної концентрації легуючих елементів в одержуваних сплавах. Даний спосіб можна розглядати як більш дешевий та продуктивний в порівнянні з тими, що базуються на методах порошкової металургії.

Сукупність вказаних переваг та особливостей обумовлює високий науково-практичний інтерес до використання саме електронно-променевої ливарної технології для одержання сплавів систем Cu-V та Cu-Cr-Zr-V.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Результати дисертаційної роботи виконувались відповідно науково-дослідним роботам Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України за відомчими темами: №: III-29-20-696 «Дослідження процесів мікролегування і модифікування кольорових сплавів синтезованими фазами та реагентами в різному агрегатному стані» (№ ДР 0120U100614, 2020-2022 рр.); темами програмно-цільової та конкурсної тематики НАН України – Науково-дослідні роботи молодих учених НАН України № II-15-21-704 «Розробка високоефективного комбінованого ливарно-індукційного методу одержання плоских біметалевих і багат шарових виробів» (№ ДР 0121U111987, 2021-2022 рр.), в якій автор приймав участь як відповідальний виконавець; III-39-22-718 «Дослідження кристалізації сплавів з використанням температурно-кінетичних та МГД-дій на метал литих заготовок» (№ ДР 0122U000617, 2023-2025 рр.); III-43-23-722

«Фундаментальні основи і створення новітніх процесів одержання з алюмінієвих сплавів литих та композиційних матеріалів, з використанням концентрованих джерел нагріву і термодинамічних дій на рідкий метал та при його твердінні» (№ ДР 0123U101341, 2023-2025 рр.).

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше було одержано виливки сплавів системи Cu-V з вмістом ванадію від 0,2 до 2 мас.% в умовах електронно-променевої ливарної технології, які характеризувалися рівномірним розподілом включень ванадію, що мали розміри близько 1-3 мкм та встановлено, що найкраще поєднання структурних характеристик та механічних властивостей відповідає сплаву Cu-0,2V, який майже повністю зберігає свої структурно-фазові та механічні характеристики після повторного індукційного переплаву. Застосований спосіб відрізняється від існуючих аналогів більшою економічною привабливістю та можливістю одержання литих заготовок металоматричних композитів Cu-V із ендегенно-сформованими зміцнюючими частинками.

Ванадій є тугоплавким та високореакційним металом, який майже не розчиняється в міді ні в рідкому, ні в твердому стані. Така властивість з однієї сторони обумовлює застосування ванадію в якості ефективного зміцнювача, а з іншої свідчить про технологічні труднощі в одержанні сплавів системи Cu-V. Вибір електронно-променевої ливарної технології для вирішення цієї задачі є надзвичайно ефективним рішенням завдяки можливості приготування розплаву вказаної системи у вакуумі з використанням концентрованого джерела нагріву та електромагнітного перемішування розплаву. Проведені дослідні плавки показали, що при високому вмісті ванадію (1-2 % мас.) не вдається повністю пригнітити зворотню седиментацію та злипання частинок ванадію під час кристалізації розплаву у формі. Натомість, виплавка сплавів з концентрацією ванадію, яка є близькою до перитектичної (0,1-0,3 % мас.), дозволяє одержати виливки з рівномірно розподіленими зміцнюючими частинками мікронного та субмікронного розміру. Таке технологічне рішення потенційно є більш

привабливим за більш застосовувані методи порошкової металургії через можливість використання великої кількості вторинної сировини та ефективну переробку простим і доступним методом індукційного переплаву.

2. Отримали подальший розвиток уявлення про фактори впливу на процеси кристалізації та структуроутворення в литих композитах системи Cu-V, які засновуючись на математичному моделюванні та експериментальному підтвердженні показують, що процеси кристалізації та переміщення теплових полів в міді після заливки у форму більшою мірою впливають на утворення, переміщення та розподіл частинок ванадію, ніж гідродинамічні фактори та формування конвективних потоків розплаву у формі. Така відмінність від схожих систем монотектичного типу, полягає у меншій густині ванадію та більшій схильності до зворотної седиментації, що ставить на перше місце задачу пригнічення спливання ванадієвих часток після їх утворенні в розплаві.

Приготування сплавів системи Cu-V передбачає значний перегрів розплаву для розчинення ванадію та переходу в область гомогенності, тому після потрапляння рідкого металу у форму утворення частинок ванадію відбувається значно раніше кристалізації міді. При дозованому заливанні розплаву у форму частинки ванадію починають утворюватися та укрупнююватися в ливарній чаші, тому такий спосіб лиття не є ефективним. Утворені частинки ванадію розташовуються всередині зерен міді, що вказує на їх здатність бути зародками кристалізації, проте більші скупчення ванадію спостерігаються на межах крупних зерен, що свідчить про залежність їх розташування від переміщення фронту кристалізації. Зі зменшенням вмісту ванадію та прискоренням кристалізації вдається досягти найбільш рівномірного розподілу його частинок та їх мінімальних розмірів.

3. Вперше встановлено, що додавання до 0,1 мас.% ванадію дозволяє в рази знизити кількість хрому та цирконію в жароміцних бронзах без втрати міцності, що доводиться при порівнянні властивостей

відомого промислового сплаву Cu-0,4Cr-0,1Zr та експериментального сплаву $\text{Cu-0,03Cr-0,05Zr-0,07V}$ електронно-променевої виплавки, міцність та жароміцність яких знаходяться на рівні 245 та 135 МПа відповідно.

Жароміцні хром-цирконієві бронзи зміцнюються основним чином за рахунок утворення сполук Cu_2Zr , яка схильна до сигрегацій на межах зерен, Cr_2Zr і виділення частинок хрому. Без додавання до сплаву цирконію необхідно суттєво збільшувати вміст в ньому хрому, що погано впливає на електропровідність. Так само не є доцільним легування міді лише цирконієм. Додавання невеликої кількості ванадію, частинки якого здатні рівномірно розподілятися в об'ємі сплаву та мають менші розміри за фази, що містять хром і цирконій, виконують функції основної зміцнюючої фази Cr_2Zr , але за рахунок одночасно більшої кількості та менших розмірів дозволяють зменшити потребу в інших легуючих елементах.

4. Вперше визначено, що ванадій здатен зменшувати концентрацію цирконію на межах зерен міді, зв'язуючись з ним та розташовуючись всередині зерен у вигляді сферичних дисперсних включень, і тим самим підвищуючи електропровідність матеріалу, яка є вищою за значення відомих аналогів на величину близько 5 %.

Ванадій при додаванні в хром-цирконієві бронзи утворює в розплаві більш легкоплавкий об'єм відшарованого сплаву з хромом та цирконієм. Внаслідок цього, при кристалізації утворюється більша кількість дисперсних зміцнюючих частинок на основі ванадію, до складу яких входить хром та цирконій. Також це дозволяє зменшити концентрацію цирконію на межах зерен та перевести його до частинок, які зміцнюють об'єм зерна. При цьому, після пластичної деформації та рекристалізації такі частинки будуть розташовуватись на межах перекристалізованих зерен, стримуючи їх зростання та як наслідок – розміцнення сплаву при високих температурах.

Апробація результатів дисертації

Основні результати досліджень викладено в дисертації та опубліковано у 13 роботах, які включають 5 статей у наукових журналах фахових видань, затверджених ДАК МОН України, 8 тез доповідей у збірках наукових праць міжнародних конференцій.

Дотримання принципів академічної доброчесності

За результатами науково-технічної експертизи дисертація Ліхацького Р.Ф. визнана оригінальною роботою, яка не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень без відповідних посилань.

Перелік публікацій за темою дисертації

Публікації у наукових фахових виданнях України:

1. Ліхацький Р. Ф. Спеціальні сплави та композити на основі міді та методи їх одержання. Процеси лиття. 2020. – № 1(139) – С. 61-68. <https://doi.org/10.15407/plit2020.01.061>

2. Ліхацький Р. Ф., Ворон М. М., Нарівський А. В. Особливості застосування хром цирконієвих бронз та способи покращення їх властивостей. Процеси лиття. 2022. – № 1(147) – С. 75-83. <https://doi.org/10.15407/plit2022.01.075>

3. Ліхацький Р. Ф., Ворон М. М., Матвієць Є. О., Перехода В. В. Фактори впливу на розподіл частинок ванадію в литих композитах системи Cu-V електронно-променевої виплавки. Процеси лиття. 2023. – № 3(153) – С. 61-74. <https://doi.org/10.15407/plit2023.03.061>

4. Ліхацький Р. Ф., Матвієць Є. О. Структура виливків литих композитів системи Cu-V, одержаних електронно-променевим литтям. Металознавство та обробка металів. 2023. – №3 (29). – С. 56-67. <https://doi.org/10.15407/mom2023.03.056>

5. Ліхацький Р. Ф. Створення та обробки мідних сплавів, легованих хромом, цирконієм та ванадієм. Металознавство та обробка металів. 2023. – №4 (30). – С. 3-13. <https://doi.org/10.15407/mom2023.04.003>

Публікації у збірниках матеріалів конференцій:

1. Ліхацький Р. Ф., Ворон М. М. Одержання дисперснозміцнених мідних композитів в умовах електронно-променевої ливарної технології. Матеріали наук.-практ. конф. мол. вчених України «Нові матеріали і технології в машинобудуванні». Київ: "КПІ ім. І. Сікорського" – 28-29 квітня 2020. – С. 77-79.

2. Ліхацький Р. Ф., Ворон М. М. Одержання мідного литого композиту системи Cu-V в умовах електронно-променевої ливарної технології. Матеріали XVI міжнародної наук.-практ. конф. «Литво. Металургія». Запоріжжя – 2020. – С. 80-82.

3. Ліхацький Р. Ф., Ворон М. М. Одержання сплавів системи Cu-V електронно-променевою плавкою. Матеріали VIII наук.-практ. конф. мол. вчених «Нові технології і матеріали у машинобудуванні». Київ-Сичавка: ФТІМС НАН України – 3-6 вересня 2020. – С. 21-23.

4. Ліхацький Р. Ф., Ліхацький І. Ф. Отримання сплавів системи Cu-St-Zr в умовах електронно-променевої ливарної технології. Матеріали VIII наук.-практ. конф. мол. вчених «Нові технології і матеріали у машинобудуванні». Київ-Сичавка: ФТІМС НАН України – 3-6 вересня 2020. – С. 24-25.

5. Ліхацький Р. Ф., Ворон М. М. Механічні властивості сплавів системи Cu-V отриманих в умовах електронно-променевої ливарної технології. Матеріали XVII міжнародної наук.-практ. конф. «Литво. Металургія». Запоріжжя – 2021. – С. 111-113.

6. Ліхацький Р. Ф. Перспективи підвищення зносостійкості контактних пар електротранспорту. Матеріали VIII наук.-техн. конф. асп. та мол. вчених «Наукова весна». Дніпро: НТУ «ДП» – 1-3 березня 2023. – С. 24-25.

7. Ліхацький Р. Ф. Дослідження мікроструктури хром-цирконієвої бронзи легованої ванадієм та гафнієм. Матеріали XV наук.-практ. конф. мол. вчених України «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» – 27-28 квітня 2023. Київ – С. 226-229.

8. Ліхацький Р. Ф. Технологічні особливості електронно-променевої плавки хром-цирконієвих бронз, легованих ванадієм. Матеріали ІХ міжн. наук.-техн. конф. «Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві». Краматорськ: ДДМА – 25-27 вересня 2023. – С. 73-74.

Виходячи з аналізу вищенаведених робіт, можна зробити висновок про успішне виконання встановлених вимог щодо необхідної кількості наукових публікацій перед представленням дисертаційної роботи Ліхацького Р. Ф. до захисту, а також про достатню повноту висвітлення наукових і практичних результатів в опублікованих матеріалах.

Розглянута дисертаційна робота Ліхацького Р. Ф. «Одержання жароміцних сплавів систем Cu-V та Cu-Cr-Zr-V в умовах електронно-променевої ливарної технології», представлена на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 136 – Металургія, за своїм науковим рівнем, новизною отриманих результатів, теоретичною та практичною цінністю, змістом та оформленням повністю відповідає вимогам, що пред'являють до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії та відповідає напрямку наукового дослідження освітньо-наукової програми Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України.

Голова семінару
пров. н.с., д. т. н.

Інна ШАЛЕВСЬКА

Секретар семінару
ст.н.с., к. т. н.

Олена МИХНЯН