

## Відгук

офіційного опонента на дисертацію **Паренюка Олександра Анатолійовича** на тему **«Одержання спеціальних мідних сплавів, зміцнених ультрадисперсними вкрапленнями на основі FeCrC, сформованими в розплаві під дією змінного електромагнітного поля»**, подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів»

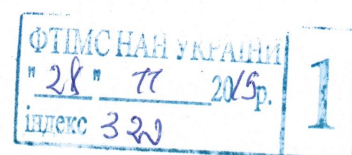
### **Актуальність теми дисертації і її відповідність спеціальності 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів»**

Мідь займає важливі позиції у промисловості, що обумовлене високим рівнем її тепло- та електропровідних властивостей. У той же час використання чистої міді обмежується внаслідок недостатніх значень твердості, міцності та зносостійкості, особливо при експлуатації за підвищених температур, що стимулює розробку нових та вдосконалення існуючих сплавів на мідній основі та технологій їх отримання. Тому дисертаційна робота Паренюка О.А. є актуальною, оскільки направлена на створення енергозберігаючої, екологічної технології виплавки мідних сплавів, з покращеними експлуатаційними та спеціальними властивостями. Значимість цієї роботи для України полягає в тому, що спеціальні мідні сплави використовуються у важливих галузях вітчизняної економіки, зокрема, залізничному електротранспорті, безперебійне функціонування якого дозволяє забезпечити необхідні показники перевезень. З огляду на вищевказане, тематика дисертаційного дослідження Паренюка О.А. є своєчасною та значимою, як в науковому, так і в прикладному плані.

Дисертація повністю відповідає вимогам паспорту спеціальності 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів».

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційна робота виконана у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів Національної Академії Наук України в рамках цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс») (постанова Президії НАНУ №247 від 12.12.2012 р.) за темою П-02.13.640 «Розробка МГД-технології одержання дисперснозміцнених матеріалів на основі міді для струмоз'ємних деталей залізничного транспорту», згідно з державним контрактом №Р7.6-2013



«Ресурс», № ДР 0113U002628 (розпорядження Президії НАН України №168 від 14.03.2013 р.).

### **Обґрунтованість, повнота, достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій**

Дисертація містить всю необхідну інформацію, яка дозволяє оцінити суть отриманих автором результатів. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, дисертаційної роботи Паренюка О.А. забезпечується коректністю поставлених завдань, опрацюванням достатньої кількості сучасних джерел, як вітчизняних, так і закордонних, використанням сучасних методів досліджень, проведенням ґрунтового теоретичного аналізу та експериментальних досліджень в лабораторних та промислових умовах, результати яких є взаємодоповнюючими та не мають суперечностей. Зроблені в роботі висновки і рекомендації не суперечать фундаментальним законам тепломасообміну та впливу змінних електромагнітних полів на рідкі та тверді матеріали.

### **Загальна характеристика дисертації**

Дисертаційна робота, загальним обсягом 162 сторінки, складається з розширеної анотації, вступу, п'яти розділів, висновків по кожному розділу, та загальних висновків, переліку використаних джерел (129 найменувань) і трьох додатків (список наукових публікацій за темою дисертації, акти впровадження розробленої технології). Основна частина дисертації викладена на 140 сторінках та включає 56 рисунків, 4 таблиці. Матеріал викладено з дотриманням послідовності та логічних зв'язків між розділами. Роботу написано зрозуміло з використанням загальноприйнятих технічних термінів.

Дисертант досить повно проаналізував сучасні науково-технічні джерела інформації за темою роботи, обґрунтувавши актуальність та важливість поставленого завдання. На базі розгляду вимог до спеціальних мідних сплавів, призначених для експлуатації, в тому числі і за підвищених температур, автор показав неможливість одночасного значного покращення характеристик міцності і зносостійкості сплаву та збереження високих показників електропровідності та теплопровідності притаманних міді. Змістовно та аргументовано представив своє бачення вирішення наведеної проблеми із застосуванням сплавів з обмеженою розчинністю компонентів у рідкому стані, при умові встановлення режимів впливу електромагнітного поля на процес їх виплавки в індукційній тигельній печі. Правильно і чітко сформульовані завдання дисертаційного дослідження.

Методи та обладнання, які було використано у роботі вичерпно представлені у методичній частині. Паренюк О.А. застосував оригінальні методики дослідження та використав класичний підхід, що полягав у попередньому теоретичному аналізі, на основі якого було проведено фізичне моделювання на низькотемпературному металевому сплаві з наступною перевіркою результатів на сплаві Cu-FeCrC.

При теоретичному аналізі дисертант врахував неоднорідність розподілу електромагнітного поля в тиглі індукційної печі та розглянув різні способи введення добавки, обґрунтовано вибравши більш раціональний. Дослідив вплив на розчинення добавки магнітогідродинамічних (встановлено залежність коефіцієнту масообміну від електромагнітної сили) та гідродинамічних чинників (визначено необхідність забезпечення найменших розмірів добавки FeCrC та турбулізації розплаву для підвищення масообміну). На основі формули Стокса-Ейнштейна автором з'ясовано, що на коефіцієнт взаємної молекулярної дифузії міді та добавки FeCrC найбільше впливає співвідношення кінематичних в'язкостей міді та легуючої добавки, що затягує процес формування емульсованого сплаву з включеннями однорідними за складом на основі лігатури. Досить цікаво та нестандартно вирішена проблема зниження силового впливу електромагнітного поля при використанні традиційного графітового тиглю. Для чого запропоновано та обґрунтовано застосування у якості нагрівача графітовий диск, що плаває на поверхні розплаву, захищає його від окислення та обмежує переміщення добавки (яка теж має меншу щільність ніж мідний розплав і знаходиться на його дзеркалі), залишаючи її у зоні дії електромагнітних сил на початковому етапі плавки. Проведено якісний аналіз ефективності використання нагрівача виготовленого з графіту та визначено оптимальні його відносні розміри з прив'язкою до розміру вогнетривкого тиглю індукційної печі.

За допомогою досліджень на низькотемпературному сплаві Bi-Zn з'ясовано, як на початковому етапі сплавлення рух розплаву впливає на диспергування добавки цинку в об'ємі вісмуту при різній інтенсивності перемішування. Дисертантом визначено та охарактеризовано відповідними критеріями умови формування однорідної структури сплаву з дрібнодисперсними вкрапленнями та показано при якій швидкості охолодження можливо зафіксувати 100% ультрадисперсних включень.

Результати теоретичного аналізу, фізичного моделювання і зроблені на їх основі висновки підтверджено достатньою кількістю експериментів на натурному сплаві в індукційній тигельній печі. Зокрема, було підтверджено експериментально пришвидшення масообміну між добавкою і основою сплаву при використанні способу виплавки із графітовим диском та встановлено

режими електромагнітного впливу для диспергування добавки, її розподілу в об'ємі сплаву та стабілізації мікроемульсованого розплаву.

У підсумку дисертантом було розроблено нову технологію виплавки мідного сплаву з ультрадисперсними включеннями тугоплавкої зміцнюючої добавки на основі FeCrC з використанням змінного електромагнітного поля, що дає можливість знизити витрати електроенергії та покращити екологічність процесу. Впровадження розробленої технології при виробництві струмоз'ємних деталей постійного струму для потреб «Укрзалізниці» підтверджено відповідними актами.

### **Наукова новизна результатів дисертаційної роботи**

На мою думку в дисертації Паренюка О.А. отримано нові наукові результати, цінність яких полягає в тому що:

- отримали подальший розвиток уявлення про сплавлення компонентів монотектичного сплаву на основі міді з тугоплавкою добавкою на основі FeCrC, яка має інтервал кристалізації та евтектичну фазу у своєму складі із значно вищою в'язкістю порівняно з міддю. Встановлено, що при взаємодії твердої добавки FeCrC з рідкою міддю в інтервалі температур між ліквідусом і солідусом добавки, відбувається диспергування легкоплавкої та тугоплавкої фази лігатури і їх розосередження на початковому етапі сплавлення, внаслідок переходу в рідкий стан легкоплавкої високов'язкої складової лігатури;

- розвинуто уявлення про вплив змінного електромагнітного поля на процес диспергування добавки на основі заліза у мідному розплаві за температур, що входять в інтервал кристалізації добавки та інтенсифікації його за рахунок виникнення магнітогідродинамічних мікротечій, пришвидшення масообміну в розплаві при забезпеченні значення об'ємних електромагнітних сил більше  $1 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^3$ ;

- вперше визначено, що у процесі виплавки однорідного мікроемульсованого сплаву Cu-FeCrC доцільно регулювати рівень впливу електромагнітного поля відповідно до етапу плавки. Зокрема, руйнування добавки до дисперсних розмірів проводити при питомій потужності поля 0,40-0,45 кВт/кг, переведення розплаву в мікроемульсований стан при питомій потужності 0,8-1,0 кВт/кг. Підготовку до розливання шляхом охолодження розплаву від температур зони мікроемульсійного стану до температури монотектики за рахунок зниження впливу електромагнітного поля до 0,15-0,20 кВт/кг;

- вперше встановлено, що застосування розроблених режимів електромагнітного впливу при виплавці монотектичного сплаву Cu з 4% мас.

FeCrC та забезпечення швидкості охолодження  $\sim 1000$  К/с вдається зафіксувати структуру з розміром включень зміцнюючої фази  $\leq 1$  мкм та щільністю їх розподілу  $1 \cdot 10^5$  мм<sup>-2</sup>, при зменшенні вмісту FeCrC до 1% мас., за швидкості охолодження  $\sim 100$  К/с, фіксується розмір включень зміцнюючої фази  $< 1$  мкм, а при зниженні концентрації лігатури до 0,7% мас. розмір вкраплень знижується до ультрадисперсного діапазону ( $\leq 0,5$  мкм).

Загалом формулювання наукової новизни у роботі є досить зрозумілими та добре передають суть.

### **Практичне значення дисертаційної роботи**

Практичне значення результатів дисертації полягає у розвитку теорії та технології спеціальних мідних сплавів, що мають покращені експлуатаційні властивості за підвищених температур, за рахунок формування структури з рівномірним розподілом ультрадисперсних включень зміцнюючої фази на основі FeCrC. Технологію, що розроблено, реалізовано в умовах ТОВ «Інтер-Контакт-Пріор» та виготовлено спеціальний сплав Cu-FeCrC для струмоз'ємних вставок пантографів електрифікованої залізниці. Струмоз'ємні вставки виготовлені з використанням цього матеріалу характеризуються ультрадисперсними ( $\leq 1$  мкм) розмірами та рівномірним ( $> 1 \cdot 10^5$  мм<sup>-2</sup>) розподіленням зміцнюючих включень у структурі робочого шару, внаслідок чого прогнозується підвищений ресурс їх пробігу, порівняно з матеріалами аналогічного застосування, як вітчизняними, так і зарубіжними. При цьому наведені у роботі технологічні прийоми та рекомендації дають змогу заощадити електричну енергію при виплавці сплаву на 3 кВт·год/кг.

Крім того створений спосіб виплавки сплавів на основі металів з високою електропровідністю є досить універсальним та може використовуватись не тільки для мідних, але й інших сплавів наприклад на основі алюмінію, срібла тощо.

### **Висвітлення основних результатів дисертаційної роботи в наукових публікаціях**

Основні результати отримані при виконанні дисертаційної роботи представлено у 21 опублікованій праці, зокрема, у 5 статтях науково-фахових журналів, що входять до переліку МОН України, одна стаття у виданні, що включено до наукометричної бази даних «Scopus», 1 праця у збірнику наукових статей, 13-ти тезах доповідей конференцій і 1 патенті України на корисну модель. Загалом вказані публікації добре передають основний зміст дисертації,

достатньо повно відображають результати теоретичних і практичних досліджень та пройшли апробацію на всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях.

Автореферат дисертації містить всю необхідну інформацію для оцінки дисертації, цілком ідентичний роботі, включає основні наукові положення, висновки і рекомендації, які приведені у дисертації.

### Зауваження до дисертації

Дисертація виконана на високому науковому рівні з урахуванням існуючих вимог до оформлення таких робіт, однак хочу зауважити, що:

1. У роботі недостатньо повно розкрита теплофізика процесів, які досліджувались, зокрема, бажано було підрахувати скільки енергії у процесі виплавки сплаву йде на процеси нагріву, плавлення та перегрівання добавки в залежності від її кількості.

2. Для досліджень мікроструктури одержаних зразків було використано методи оптичної мікроскопії. Було б доцільно, для розширення уявлень щодо особливостей складу окремих фаз та включень, дослідити розподіл хімічних елементів у зразках, скориставшись методами растрової електронної мікроскопії в комплексі з рентгенівським мікроаналізом.

3. В роботі використовували графітовий дисковий нагрівач, але не досліджено можливість додаткового науглецювання частинок зміцнюючої фази FeCrC від матеріалу нагрівача.

4. Розділ 4, що присвячений фізичному моделюванню виглядає перевантаженим подробицями та залежностями, частину з яких не було використано на натурному сплаві.

5. Щодо розділу 4 варто зауважити, що фізичне моделювання на сплаві Ві-Zn проведено тільки для двох концентрацій, на мою думку, доцільно було провести фізичне моделювання для ширшого переліку концентрацій, зокрема, ближче до лінії монотектики, як у натурному сплаві.

6. На ст. 98 використано інше ніж у всій роботі позначення швидкості охолодження.

7. У роботі не розшифровано скорочення ККД.

8. Частина номерів формул наведено в круглих дужках, а частина без них, доцільно було дотримуватись однакового формату у всій роботі.

9. На стор 107 в табл 5.1 у останньому рядку таблиці приведено лише одне значення в інших стовпчиках прочерки при цьому будь-які пояснення відсутні.

10. Варто зауважити, що на ст. 108 наведено частину рис. 5.1 (а), тоді як його продовження рис. 5.1 (б) знаходиться на ст. 109. Краще було б рисунок розмістити на одній сторінці.

Наведені зауваження є несуттєвими, не знижують наукової і практичної цінності роботи, не ставлять під сумнів новизну та достовірність матеріалів дисертації.

### Висновки

Дисертація Паренюка Олександра Анатолійовича за темою «Одержання спеціальних мідних сплавів, зміцнених ультрадисперсними вкрапленнями на основі FeCrC, сформованими в розплаві під дією змінного електромагнітного поля» є завершеною та цілісною науковою роботою, що містить нові, достатньо обґрунтовані, з огляду на кількість і якість проведених автором досліджень, науково-практичні результати, спрямовані на створення технології виплавки мідних сплавів, з покращеними експлуатаційними і спеціальними властивостями. Дана дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 9; 11; 13 «Порядку присудження наукових ступенів» затверджених постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 (зі змінами затвердженими постановами № 656, № 1159, № 567) та іншим чинним вимогам МОН України до кандидатських дисертацій, а здобувач – Паренюк Олександр Анатолійович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів».

Офіційний опонент  
кандидат технічних наук,  
доцент, доцент кафедри  
Національного університету  
«Запорізька політехніка»  
МОН України



А. С. Петрищев

Підпис Петрищева А. С. засвідчую:  
Вчений секретар Національного  
університету «Запорізька політехніка»,  
кандидат соціологічних наук, доцент




В. В. Кузьмін