

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

ПАРЕНЮК ОЛЕКСАНДР АНАТОЛІЙОВИЧ 

УДК 621.745:669.35:532.695.2:537.811

**ОДЕРЖАННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ МІДНИХ СПЛАВІВ, ЗМІЦНЕНИХ
УЛЬТРАДИСПЕРСНИМИ ВКРАПЛЕННЯМИ НА ОСНОВІ FeCrC,
СФОРМОВАНИМИ В РОЗПЛАВІ ПІД ДІЄЮ ЗМІННОГО
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ**

Спеціальність 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних
сплавів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України, м.Київ

Науковий керівник – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник
Середенко Володимир Олексійович
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник
Біктагіров Фаріт Камілович
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ;

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри
Петрищев Артем Станіславович
Національний університет «Запорізька політехніка» МОН України, м. Запоріжжя.

Захист відбудеться «13» грудня 2019 року об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.232.01 при Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України за адресою: 03142, м. Київ-142, бул. Академіка Вернадського 34/1.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України за адресою: м. Київ, бул. Академіка Вернадського 34/1.

Автореферат розісланий « 7 » листопада 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.232.01,
доктор технічних наук, старший науковий співробітник



М. І. Тарасевич

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток техніки потребує покращення функціональних матеріалів. Зокрема, спеціальні мідні сплави, що покликані забезпечити одночасно високі тепло- і електропровідність, міцність, твердість та зносостійкість, не відповідають сучасним вимогам, особливо в умовах роботи при підвищених температурах. Тому проблема поліпшення і збалансування комплексу властивостей таких матеріалів є актуальною. Традиційні методи зміцнення мідних сплавів (наприклад, за допомогою деформації, розпаду твердого розчину, дисперсійного тверднення) не забезпечують необхідного рівня властивостей. Більш ефективним напрямом покращення їхніх властивостей є зміцнення ультрадисперсними тугоплавкими вкрапленнями мідної матриці, при забезпеченні високих показників її тепло- і електропровідності. У сплавах монотектичної системи є можливість формування мікроемульсованого стану, завдяки існуванню області мікророзшарування над зоною макророзшарування рідких фаз. Перспективними є дисперснозміцнені мідні сплави монотектичної системи, наприклад, Cu-FeCrC. Визначення оптимальних складів та розвиток технології одержання таких сплавів представлено у роботах Кірієвського Б. А., Христенка В. В., Руденка М. А. та Середенко О. В. Але завдання формування та рівномірного розподілу ультрадисперсних включень в матриці потребують подальшого вирішення. Найбільш ефективно необхідну однорідність мікроемульсійного стану розплаву у всьому його об'ємі можливо досягти використовуючи вплив змінного електромагнітного поля (ЕМП), яке має виконувати функції регульованого нагріву та гомогенізації сплаву по температурі і концентрації. Наведеним вимогам відповідає процес одержання сплаву в індукційних тигельних печах (ІТП). Однак, необхідним є визначення і забезпечення режимів впливу ЕМП від сплавлення початкових компонентів металошихти до формування однорідного стану в усіх мікрооб'ємах розплаву.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є узагальненням науково-практичних результатів, отриманих автором в період з 2013 по 2015 р. під час виконання науково-дослідних робіт у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України (ФТІМС НАНУ), згідно з цільовою комплексною програмою наукових досліджень НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс») (постанова Президії НАН України №247 від 12.12.2012 р.) в рамках теми П-02.13.640 «Розробка МГД-технології одержання дисперснозміцнених матеріалів на основі міді для струмомоз'ємних деталей залізничного транспорту» (виконувалась згідно державного контракту №Р7.6-2013 «Ресурс», № ДР 0113U002628 (розпорядження Президії НАН України №168 від 14.03.2013 р.)), в якій здобувач брав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розвиток теорії і технології одержання мідних сплавів з покращеними експлуатаційними властивостями при підвищених температурах, зміцнених ультрадисперсними вкрапленнями на основі FeCrC, що формуються в процесі плавки із застосуванням електромагнітного впливу.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені та вирішені такі завдання:

– розробити методики дослідження процесів формування мікроемульсованого стану у розплаві з областю незмішування металевих фаз на основі застосування аналітичного методу, фізичного моделювання та натурального експерименту;

– проаналізувати вплив електромагнітних властивостей компонентів сплаву Cu-FeCrC залежно від температури, просторового розподілу електроструму та електромагнітної сили в ІТП на процес розчинення лігатури;

– дослідити вплив електромагнітних і гідродинамічних факторів на процес розчинення добавки при виплавці мідного сплаву в ІТП;

– встановити раціональний режим проведення процесу сплавлення компонентів сплаву Cu-FeCrC;

– визначити умови формування мікроемульсованого стану розплаву і вплив електромагнітного поля на його стабілізацію;

– дослідити вплив на параметри структури монотектичного сплаву концентрації зміцнюючого компонента в зоні незмішування рідких фаз та швидкості охолодження мікроемульсії;

– встановити технологічні параметри забезпечення ультрадисперсних розмірів вкраплень при охолодженні та твердненні спеціального мідного сплаву;

– розробити технологічний процес на основі дії змінного ЕМП при виплавці мідних сплавів зміцнених ультрадисперсними вкрапленнями на основі FeCrC в ІТП.

Об'єкт дослідження. Процес формування ультрадисперсних вкраплень на основі FeCrC у мідному сплаві при його виплавці під дією змінного ЕМП.

Предмет дослідження. Сплави на основі міді зі структурою замороженої мікроемульсії, сформованою в розплаві під електромагнітним впливом.

Методи дослідження. У роботі використані теоретичні та експериментальні методи досліджень, що базуються на фундаментальних положеннях теорії тепло- і масообмінних процесів у металевих розплавах та магнітної гідродинаміки (МГД). Для оцінки процесу взаємодії рідких фаз монотектичних сплавів при дії змінного ЕМП – метод теоретичного аналізу; метод фізичного моделювання на сплаві Bi-Zn – для вивчення взаємодії об'єму добавки і основи сплаву на початковому етапі їх сплавлення при різній інтенсивності перемішування та впливу умов охолодження мікроемульсованого розплаву на параметри литої структури; для фіксації отриманого стану сплаву використано структурно-гартівний метод; методи оптичної мікроскопії та металографічного аналізу – для вивчення литої структури зразків; електроопір одержаних сплавів вимірювали на універсальному приладі Р4833 ГОСТ 7165-89 по мостовій схемі; визначення твердості проводили по методу Брінелля на твердомірі ТШ-2 згідно ГОСТ 23677-79.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Отримали подальший розвиток уявлення про процес сплавлення компонентів монотектичного сплаву у випадку коли добавка тугоплавка, має інтервал кристалізації, а у її складі присутня евтектична фаза, що має значно вищу в'язкість ніж основа сплаву. Встановлено, що при взаємодії твердої лігатури FeCrC з рідкою міддю у температурному інтервалі між ліквідусом і солідусом добавки, забезпечується перехід у рідкий стан легкоплавкої високов'язкої складової та її розосередження на початковому етапі сплавлення, при цьому тугоплавка та легкоплавка фази лігатури диспергуються.

2. Розвинуто уявлення про вплив змінного електромагнітного поля на процес диспергування добавки на основі заліза у рідкій міді з температурою що входить в

інтервал кристалізації добавки та інтенсифікації його за рахунок виникнення МГД мікротечій. Встановлено, що пришвидшення масообміну у розплаві відбувається при досягненні значення об'ємних електромагнітних сил більше $1 \cdot 10^5$ Н/м³.

3. Вперше визначено, що формування однорідного мікроемульсованого сплаву монотектичної системи Cu з 4% мас. FeCrC у процесі його виплавки можливо за рахунок МГД впливу шляхом варіювання дії змінного електромагнітного поля на відповідних етапах плавки. А саме, руйнування добавки до дисперсних розмірів за рахунок розплавлення її легкоплавкої складової при питомій потужності поля 0,40-0,45 кВт/кг, переведення розплаву в мікроемульсований стан при питомій потужності 0,8-1,0 кВт/кг. Встановлено, що при охолодженні розплаву від температур зони мікроемульсійного стану до температури монотектики за рахунок зниження рівня теплосилового впливу ЕМП (0,15-0,20 кВт/кг) з подальшою розливкою ламінарним потоком та охолодженні зі швидкістю ~ 1000 К/с фіксується структура з розміром включень зміцнюючої фази ≤ 1 мкм та щільністю їх розподілу $1 \cdot 10^5$ мм⁻².

4. Вперше встановлено, що за рахунок застосування розроблених режимів електромагнітного впливу при виплавці монотектичного сплаву Cu-FeCrC і зменшення вмісту FeCrC до 1% мас., при швидкості охолодження ~ 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).

Практичне значення отриманих результатів. Розроблену за одержаними науковими та практичними результатами технологію виплавки сплавів міді з ультрадисперсними вкрапленнями на основі FeCrC, які формуються ендогенно із використанням електромагнітного впливу в умовах плавки в ІТП, впроваджено у виробництво ТОВ «Інтер-Контакт-Пріор» (м. Київ). З використанням промислової ІТП типу ICT 0,16 одержано мідний сплав з вкрапленнями розміром ≤ 1 мкм, при щільності їх рівномірного розподілу $> 1 \cdot 10^5$ мм⁻², з якого було виготовлено струмомоз'ємні вставки для залізничного електротранспорту постійного струму. У порівнянні з характеристиками контактного дроту (КД) дослідні вставки, мають більш ефективно збалансований комплекс властивостей (відношення питомих електропровідностей вставки і контактного дроту рівне 0,9 та співвідношення твердості робочого шару вставки і контактного дроту 0,8) серед матеріалів інших виробників, що використовує акціонерне товариство «Українська залізниця». Це дозволяє прогнозувати зниження зносу КД, зменшення кількості випадків перегріву та його руйнування, завдяки поліпшенню умов сухого тертя, економію електроенергії за рахунок зниження питомого електроопору струмомоз'ємних вставок, та в підсумку збільшення ресурсу пробігу дослідних вставок пантографів на електровозах постійного струму порівняно з серійними вставками: типу ПКД на 25%, з пантографної міді ≥ 5 разів, імпортованих МГ-487 у 2,5 рази. Також розроблена технологія має перспективи використання для виготовлення струмопровідних контактних дротів, що підтверджується зацікавленістю закордонних партнерів (D.MAG New Material Technology Ltd. (Kunshan, PRC)) та підписанням рамкової угоди про співробітництво з НАНУ ФТІМС.

Особистий вклад здобувача. Основні експериментальні дані та наукові положення дисертаційної роботи одержані і сформульовані здобувачем особисто. В робо-

тах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить участь у: розробці методики дослідження монотектичних сплавів [1, 3-11, 13, 14, 16]; встановленні впливу властивостей компонентів та умов одержання на процес формування і стабілізації мікроемульсованого стану сплаву [1, 3, 5-8, 12, 15, 16, 18-20]; організації, плануванні і проведенні експериментів [1, 3-11, 13, 14, 16, 17, 21]; узагальненні результатів експериментів [6, 7, 14, 17]; рекомендацій щодо основних параметрів нової технології одержання спеціальних мідних сплавів з ультрадисперсними вкрапленнями на основі FeCrC [7, 14, 21]; робота [2] написана здобувачем самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення і прикладні результати дисертаційної роботи доповідались на: X, XI, XII, XIII, XIV і XV Міжнародних науково-практичних конференціях «Лиття. Металургія. 2014-2019» (Україна, Запоріжжя, 27-29 травня 2014 р., 26-28 травня 2015 р., 24-26 травня 2016 р., 23-25 травня 2017 р., 22-24 травня 2018 р. та 21-23 травня 2019 р.); VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2016» (Україна, Київ, 30-31 травня 2016 р.); XIV Всеукраїнській науково-практичній конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра» (Україна, Київ, 19 квітня 2016 р.); VI Науково-практичній конференції молодих вчених України «Нові ливарні технології і матеріали у машинобудуванні», (Україна, Київ, 01-02 червня 2016 р.).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані у 21 роботі в т. ч. у 5-ти статтях в наукових фахових виданнях, одна стаття у журналі, що входить до наукометричної бази даних «Scopus», 1 стаття у збірнику наукових праць, 13-ти тезах доповідей конференцій і 1 патенті України на корисну модель.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5-ти розділів, висновків, переліку використаних літературних 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. Загальний обсяг дисертаційної роботи 162 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, показано зв'язок обраного напрямку досліджень з науковими темами та цільовою комплексною програмою наукових досліджень НАН України, сформульовано мету і задачі досліджень, представлено наукову новизну отриманих результатів і їх практичну цінність, а також дані про апробацію результатів дисертації та публікації за темою дисертаційної роботи, визначено особистий внесок здобувача.

У першому розділі «Аналіз сучасних наукових і технологічних розробок одержання спеціальних дисперснозміцнених мідних сплавів» на підставі розгляду вимог до характеристик дисперснозміцнених матеріалів, які використовуються на сучасному електрообладнанні постійного струму, зокрема для відповідальних струмомоз'ємних деталей, представлена провідна позиція спеціальних мідних сплавів серед матеріалів з високими показниками тепло- і електропровідності, зносо- і електроерозійності в умовах експлуатації при підвищених температурах. Показано, що покращення властивостей таких матеріалів можливо досягти за раху-

нок використання сплавів монотектичної системи, зокрема, Cu-FeCrC, при умові забезпечення рівномірного розподілу та дисперсності зміцнюючої фази ≤ 1 мкм. Визначено, що перспективним способом одержання розплавів в стані мікроемульсії є входження в мікрогетерогенну зону над бінодаллю діаграми стану сплавів монотектичної системи, існування якої встановлено багатьма сучасними дослідженнями. На основі аналізу електромагнітних властивостей основи сплаву та добавки лігатури показано перспективність застосування електромагнітних впливів та розглянуті особливості дії змінного ЕМП на процес формування мікроемульсованого стану розплаву в умовах плавки у ІТП. Відзначено необхідність встановлення раціональної схеми проведення виплавки і способу одержання твердого сплаву зі структурою замороженої мікроемульсії з високою щільністю рівномірного розподілу. З'ясовано необхідність локальної концентрації впливу ЕМП в зоні розчинення добавки лігатури. На підставі зроблених у розділі висновків визначено ціль та основні задачі досліджень.

У другому розділі *«Основні методики та методи досліджень»* дана характеристика методикам, обладнанню та матеріалам, що використані при дослідженні тепломасообміну компонентів сплаву Cu-FeCrC, гідродинамічних та магнітогідродинамічних (МГД) процесів, при отриманні мікроемульсованого розплаву під впливом змінного ЕМП. Структура загальної методичної будови досліджень включала методики теоретичних досліджень, фізичного моделювання та експериментального вивчення процесів виплавки сплавів в ІТП. Дослідження впливу концентрації зміцнюючого компоненту і швидкості охолодження на дисперсність і характер розподілу крапель у матричному металі проведено на низькотемпературному сплаві Vi-Zn. Для фіксації будови металевих емульсій застосовано структурно-гартівний метод із використанням підкладок з графіту та сталі. Дослідження процесу сплавлення компонентів високотемпературного сплаву Cu-FeCrC виконували на високочастотній лабораторній і промисловій ІТП. Оцінку ефективності процесів виплавки сплавів у мікроемульсованому стані проводили на підставі порівняння енергетичних, температурних, часових параметрів та концентраційних показників з отриманими мікроструктурами макро- і мікроскопічних зразків сплавів.

У третьому розділі *«Аналіз особливостей дії змінного ЕМП в ІТП при одержанні розплаву легovanого мідного сплаву в мікроемульсованому стані»* проведено теоретичне дослідження основних факторів впливу ЕМП на процес формування розплаву монотектичного сплаву з ультрадисперсними краплями. Комплекс FeCrC суттєво відрізняється від міді за показниками електроопору та магнітних сприйнятливості і проникності, як у твердому, так і рідкому станах. Після розплавлення шихти співвідношення компонентів сплаву по питомому електроопору і магнітній сприйнятливості знижується з 8,8 (у твердому стані) до 6 раз.

З урахуванням просторово неоднорідного розподілу щільності електричного струму та електромагнітних сил у рідкій міді при отриманні емульсованого розплаву в ІТП визначено, що суттєва дія наведеного струму та електромагнітної сили розповсюджується на значно більшу глибину у розплав ніж товщина (Δ) умовного «активного» шару, прилеглого до бокової поверхні садки. Вплив ЕМП навіть на рівні 1%

від максимального значення може мати важливе значення при невеликих розмірах добавки.

Для досягнення рівноважного стану у розплаві важливе значення мають дифузійні процеси. На основі формули Стокса-Ейнштейна, проаналізовано співвідношення K_D коефіцієнтів взаємної молекулярної дифузії D компонентів A і B (A – дисперсійне середовище, B – дисперсна фаза) мідних сплавів монотектичної системи:

$$K_D = D_{A-B} / D_{B-A} = (\rho_A \cdot \nu_A \cdot r_B) / (\rho_B \cdot \nu_B \cdot r_A) = K_\rho \cdot K_\nu \cdot K_r^{-1},$$

де D_{A-B} , D_{B-A} – коефіцієнти молекулярної дифузії відповідно компонента A у B та B у A , $\text{м}^2/\text{с}$; ρ – щільність A і B , $\text{кг}/\text{м}^3$; ν – кінематична в'язкість A і B , $\text{м}^2/\text{с}$; r – атомні радіуси A і B , м ; K_ρ , K_ν , K_r – симплекси відповідно щільностей, в'язкостей, атомних радіусів компонентів A і B .

З урахуванням того, що в багатьох сплавах на мідній основі із зоною незмішування рідких фаз $K_r \approx 1$, а K_ρ відрізняється від 1 максимум на 40%, визначено, що вплив K_ν на K_D значно більше (до декількох раз).

Змінне ЕМП у ІТП прямо не діє на D , але суттєво впливає на ефективний коефіцієнт дифузії через турбулізацію розплаву та створення мікроциркуляційних течій біля неоднорідностей електроопору і магнітної проникності в мідному розплаві з добавками. З метою встановлення закономірності впливу ЕМП в умовах плавки в ІТП на розчинення добавки FeCrC у рідкій міді було використано запропонований Г. М. Орепером вираз для визначення масообмінного числа Нуссельта (Nu), що враховує виникнення навколо добавки МГД течій. При цьому коефіцієнт масопереносу β ($\text{м}/\text{с}$) визначено як:

$$\beta = \frac{NuD}{2a} = 0,412 \cdot \sqrt[3]{Pr_d \frac{\sigma - \sigma_1}{\sigma + \sigma_1} \cdot \frac{F_e}{\eta \nu}} \cdot D$$

де a – радіус добавки, м ; $Pr_d = \nu / D$ – дифузійний критерій Прандтля; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідкої міді, $\text{м}^2/\text{с}$; D – коефіцієнт дифузії Fe (як основного компонента FeCrC) у рідку мідь, $\text{м}^2/\text{с}$; σ – електропровідність рідкої міді, Ом^{-1} ; σ_1 – електропровідність твердої добавки, Ом^{-1} ; η – коефіцієнт динамічної в'язкості рідкої міді, $\text{кг}/\text{м}\cdot\text{с}$; F_e – об'ємна електромагнітна сила, $\text{Н}/\text{м}^3$.

Отримана залежність β від F_e для діапазону її значень, характерних для плавки мідних сплавів в ІТП, наведена на рис. 1 у напівлогарифмічних координатах. Встановлено, що суттєве прискорення масообміну під дією електромагнітної сили в активній зоні ІТП не залежить від розміру добавки і відбувається при значеннях $F_e > 1 \cdot 10^5 \text{ Н}/\text{м}^3$.

При розгляді умов розчинення добавки у мідному розплаві поза зоною безпосередньої дії ЕМП з використанням відомого виразу $Nu = 0,8 \cdot \sqrt[3]{Sc} \cdot \sqrt{Re}$ встановлено залежність β від числа Re і

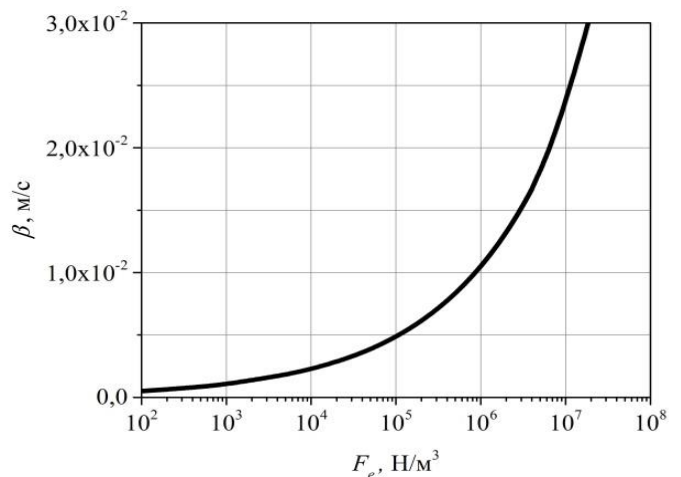


Рис. 1. Залежність β від F_e при виплавці сплаву Cu-FeCrC

розміру легуючої добавки – рис. 2.

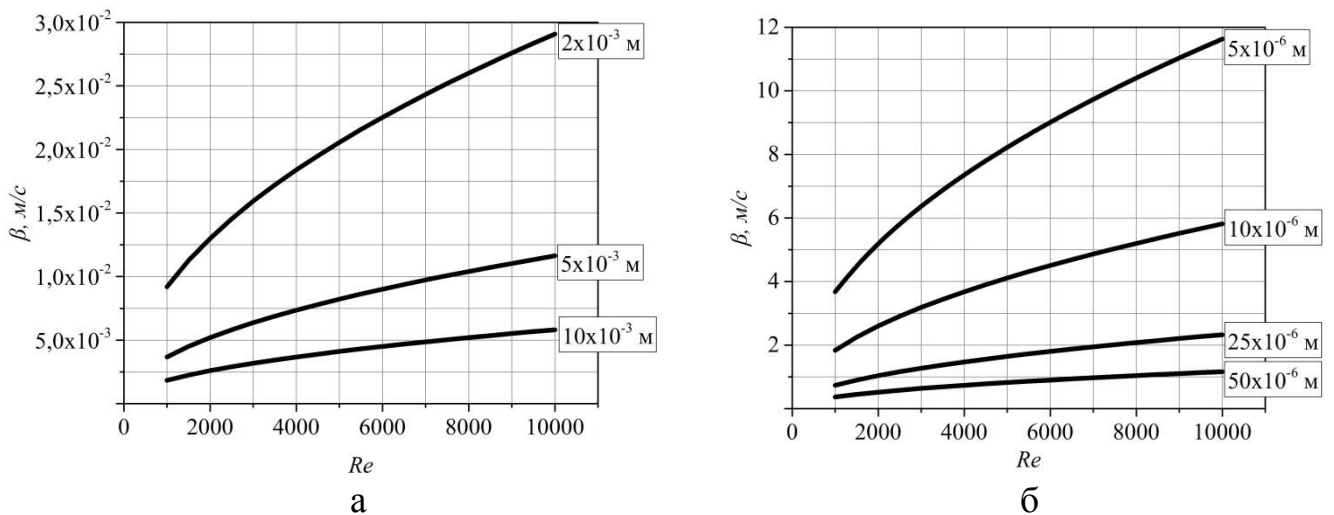


Рис. 2. Залежність коефіцієнта масопереносу від значення числа Re :

а – розміри добавки у міліметровому діапазоні; б – при мікронних розмірах добавки

Визначено, що в об'ємі розплаву поза «активною» зоною дії ЕМП раціонально проводити процес розчинення у рідкій міді добавки FeCrC при найменших її розмірах в турбулентному режимі при максимально досяжних значеннях числа Re .

Встановлено провідні фактори, що підвищують стабільність мікроемульсованого або мікро-супензійного станів рідких металевих сплавів за допомогою змінного ЕМП індукторів (соленоїдів) у циліндричних ємностях, при локалізації електромагнітних об'ємних сил завдяки скін-ефекту у поверхневому шарі. Проведено аналіз відомих безрозмірних параметрів, що впливають на видалення дисперсної фази з розплаву $\tau \cdot d^2 \cdot B^2 / (\nu \cdot \mu \cdot R^2)$ та R/Δ (де τ – час дії поля, с; d – діаметр включень дисперсної фази, м; B – індукція магнітного поля, Тл; μ – магнітна проникність, Гн/м; R – радіус ємності, м; Δ – глибина проникнення ЕМП в розплав, м). Враховуючи, що активне видалення дисперсної фази з розплаву відбувається при максимально великих значеннях першого параметру, а другого при значенні рівному 2, отримано об'єднаний вираз $(\tau \cdot d^2 \cdot B^2 \cdot f) / (1006 \cdot \nu \cdot \rho_e)$, мінімізація значення якого сприяє стабілізації стану мікроемульсії при дії ЕМП. Цей вираз для розплаву на мідній основі приймає вигляд $4,3 \cdot 10^{15} \cdot \tau \cdot f \cdot (d \cdot B)^2$. Визначено, що стабільності мікроемульсії найбільше сприяє складова виразу $(d \cdot B)^2$, оскільки величини d і B значно менше 1, а квадрат їх добутку становить дуже мале значення. Величини τ і f , навпаки, мають дуже великі значення. Тому, чим дисперсніша емульсія і менше градієнт ЕМП, тим стабільніше мікроемульсійний стан розплаву. Проаналізовано вплив режиму руху дрібнодисперсних емульсій в рамках локально-ізотропної турбулентності на їх коалесценцію. Кардинальним рішенням питання стабілізації мікроемульсії є переведення руху розплаву після досягнення цього стану у ламінарний режим і подальше охолодження сплаву до мікросупензійного стану за рахунок зниження рівня теплосилової дії ЕМП, а згодом розливка ламінарним потоком або в умовах швидкісного охолодження сплаву.

У четвертому розділі «Фізичне моделювання процесів взаємодії рідких компонентів і формування тонкої емульсованої структури на сплаві монотектичної системи $BiZn$ та подрібнення об'ємів розплаву» наведено результати експерименталь-

них досліджень на низькотемпературному сплаві монотектичної системи Bi-Zn, компоненти якого суттєво відрізняються температурами плавлення і в'язкостями, зокрема визначено вплив руху розплаву на диспергування добавки Zn в об'ємі Bi на початковому етапі їх сплавлення, при різній інтенсивності перемішування ($Re \sim 1-1000$). Аналіз проб сплаву показав, що в умовах незначного руху розплаву ($Re \sim 1$) виникла невелика кількість дисперсних крапель діаметром ~ 5 мкм.

При збільшенні інтенсивності перемішування ($Re=10$) на міжфазній поверхні виникали збурення, верхівки яких змивались потоком розплаву і розосереджувались у його об'ємі. Підсилення інтенсивності перемішування ($Re \sim 100$) призводило до зростання кількості диспергованих об'ємів Zn у Bi. Одночасно інтенсифікувався процес проникнення крапель вісмуту у цинк, диспергування фази Bi в об'ємі Zn та дифузії Zn у Bi. Подальше підвищення інтенсивності перемішування ($Re \sim 500$) призвело до підвищення числа диспергованих об'ємів і зменшення їх розмірів. Аналіз одержаних результатів щодо диспергування об'єму добавки на початковому етапі одержання розплаву монотектичної системи Bi-Zn показав, що при ламінарному режимі руху, що характеризується значенням $Re \sim 1000$ забезпечується стабільність розмірів зміцнюючої фази. Залежність характерного розміру l_c диспергованих рідких фаз від значення числа Re на початковому етапі сплавлення компонентів сплаву монотектичної системи Bi-Zn наведена на рис. 3 та визначена виразом $l_c = 173,8 / [1 + (Re/34,9)^{1,1}]$, коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,999$.

При вивченні характеру впливу концентрації зміцнюючої фази на розмір і рівномірність розподілу крапель мікроемульсії в об'ємі матриці були досліджені два сплави Bi-Zn з різним вмістом тугоплавкого компоненту (Zn) 30% та 25% мас. відповідно (14% та 9% мас. у зоні незмішування). В умовах експерименту на сталевій підкладці при швидкості охолодження $V_0 = 3,56 \cdot 10^5$ К/с і концентрації 14% мас. у зоні незмішування рідких фаз досягнута дисперсність вкраплень $b_{cp} = 1,40 \pm 0,13$ мкм. При зменшенні у 1,6 рази (на 5% мас., до 9% мас. у зоні незмішування) концентрації другого компоненту (Zn) сплаву дисперсність вкраплень зросла у 1,9 рази. В результаті досліджень отриманих тонких зразків із розплаву Bi з 25% Zn визначено, що залежність швидкості охолодження таких частинок на сталевій підкладці від їх товщини b_q суттєво нелінійна і описується виразом $V_0 = 4,4 \cdot 10^7 \cdot b_q^{-1}$ ($R^2 = 1$). Встановлено що темп зростання кількості ультрадисперсних вкраплень різко знижується при досягненні швидкості охолодження $> 1 \cdot 10^6$ К/с та їх вмісті 90% від загального числа вкраплень. Згідно з отриманою прогнозою залежністю 100% ультрадисперсних вкраплень можливо досягнути при $V_0 \sim 3 \cdot 10^6$ К/с.

З метою узагальнення одержаних результатів середні розміри вкраплень b_{cp} в зразках представлені у безрозмірному вигляді, для чого їх значення віднесені до числової характеристики верхньої межі діапазону ультрадисперсності (0,5 мкм) –

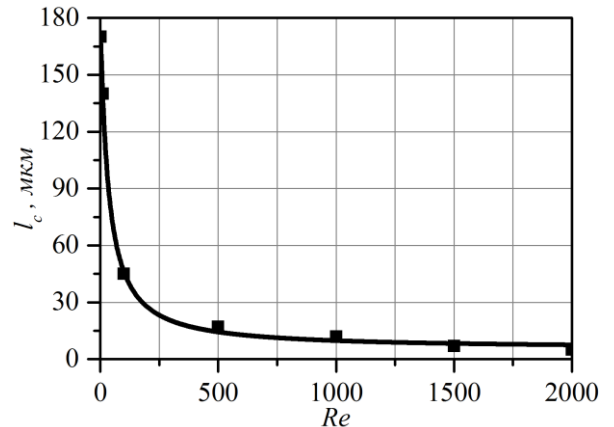


Рис. 3. Зв'язок характерного розміру l_c з критерієм Re

$k_b = b_{cp}/0,5$. Залежність k_b від числа Fo – критерія теплової гомохронності представлена на рис. 4. В умовах проведених досліджень значення b_{cp} досягли ультрадисперсності при виконанні умови $Fo > 1$. Взаємозв'язок величини k_b із значенням числа Bi наведений на рис. 5 показав, що розміри вкраплень у зразках досягали ультрадисперсного діапазону при $Bi < 0,7$.

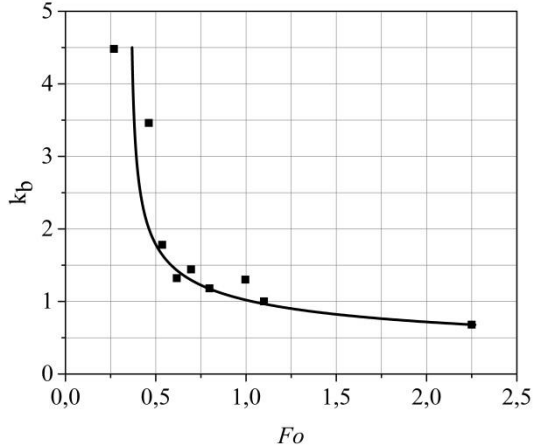


Рис. 4. Залежність відношення k_b від значення критерію Фур'є

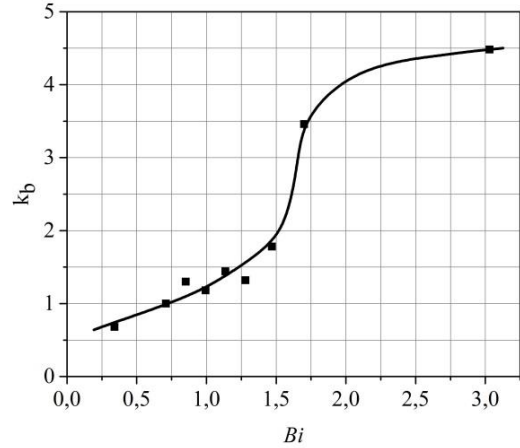


Рис. 5. Залежність k_b від відносної інтенсивності теплообміну в зразках (числа Bi)

Вивчення залежності щільності розподілу вкраплень q у зразках від числа Fo показало, що при зростанні Fo від 0,3 до 1,0 значення q підвищилось у 4 рази. Подальше збільшення Fo характеризувалось різким сповільненням темпу приросту q .

Встановлена залежність щільності розподілу вкраплень в зразках від числа Bi показала, що зниження величини числа Bi від 3,0 до 2,0 майже не впливає на q . Подальше зменшення Bi різко змінює характер залежності і призводить до суттєвого зростання q . Однак при $Bi < 1,3$ темп зростання щільності розподілу вкраплень зміцнюючої фази уповільнюється. Узагальнення отриманих результатів показало, що середні значення розмірів вкраплень у зразках досягали діапазону ультрадисперсності при виконанні умов $Fo > 1$ $Bi < 0,7$, а різке зростання q відбувається при збільшенні Fo від 0,3 до 1,0 і зменшенні Bi від 2,0 до 1,3.

У п'ятому розділі «Розробка технології одержання спеціальних мідних сплавів зміцнених ультрадисперсними вкрапленнями на основі FeCrC сформованими в розплаві із застосуванням електромагнітного впливу в умовах плавки в індукційній тигельній печі» наведені результати експериментальних плавок на сплавах Cu-FeCrC у лабораторній ІТП високої частоти (42 кГц), на базі яких були створені засади енергоефективних технологічних процесів одержання спеціальних дисперснозміцнених мідних сплавів. Дослідження виконували при варіюванні вмісту лігатури у сплавах від 0,7 до 4,0 % мас. у температурному діапазоні одержання розплавів 1533-1753 К (1260-1480 °С) та при зміні питомої потужності ЕМП від 150 до 1000 Вт/кг, для встановлення найбільш ефективного режиму ведення процесу плавки та впливу ЕМП на сплавлення лігатури FeCrC з міддю та формування мікроемульсованого стану розплаву.

Проведено порівняння двох режимів сплавлення основи сплаву з лігатурою, при рідкому і рідко-твердому стані добавки з урахуванням особливостей її структури

у твердому стані, яка була представлена зернами перліту розміром ~ 40 мкм, охопленими карбідною евтектикою – рис. 6.

Перший спосіб передбачав сплавлення добавки лігатури з міддю при температурі вищій за температуру солідус добавки. Встановлено, що при сплавленні у такому режимі, нагрів добавки відбувався за рахунок її взаємодії з рідкою міддю, при цьому спочатку розплавлялась евтектична фаза і трансформувалась із розосередженого стану міжзеренної сітки у компактний об'єм, який мав чітку поверхню розділу з іншими фазами розплаву. Паралельно йшов процес розчинення і розплавлення зерен перліту в рідкій міді. Евтектична фаза зберігалась у сплаві в компактному вигляді навіть після повного розчинення в міді перлітної складової лігатури – рис. 7.

У подальшому рідкі об'єми лігатури (на основі евтектики або перліту) диспергувались і формували емульсію з краплями різного складу і розмірів (від 10 до 100 мкм). Насичення цих крапель міддю з розчиненням у ній Fe і Cr під електромагнітним впливом призводило до входження розплаву у температурно-концентраційну зону незмішування діаграми рівноважного стану. При цьому виникало прискорення взаємної дифузії за рахунок ефекту несталості міжфазної поверхні (ефекту Марангоні), диспергування фаз і формування крапель діаметром ~ 1 мкм (рис. 8).

В результаті встановлено, що при розплавленні у середовищі рідкої міді лігатури FeCrC її менш тугоплавка фаза (карбідна евтектика) зливалась у відособлені, відносно крупні (~ 1 мм) об'єми. Їх в'язкість більш ніж утричі ($K_v=3,2$) перевищувала в'язкість розплавленої міді, що потребувало додаткового часу і енергії для руйнування цих об'ємів.

Дослідження особливостей другого режиму сплавлення, при температурі рідкої міді вище за температуру плавлення евтектичної складової лігатури ~ 1563 К (1290 °С), але нижче температури плавлення перліту ~ 1623 К (1350 °С), показало, що виникнення термонапруженості, завдяки термоудару від потоку тепла від мідного розплаву, а також індукованих в поверхневому шарі добавки електрострумів сприяло розвитку мікротріщин у вказаному шарі лігатури. Цей процес підсилювався за рахунок структурної і хімічної неоднорідності добавки. Розігрів електрострумом локальних ділянок біля мікро-

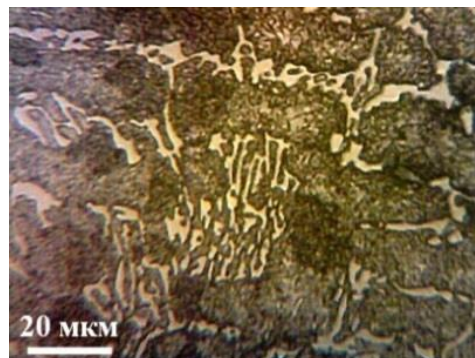


Рис. 6. Структура лігатури FeCrC



Рис. 7. – Розчинення в міді лігатури і залишок об'єму її евтектичної складової

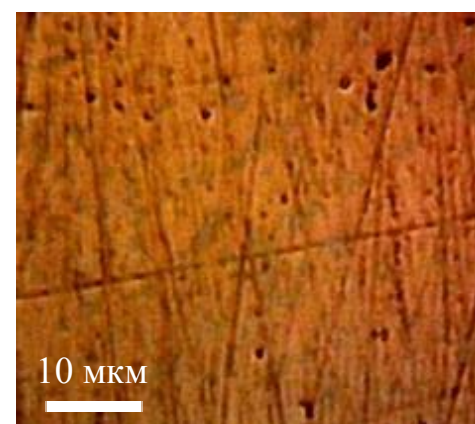


Рис. 8. – Емульсовані включення різного складу в мідній матриці

тріщин сприяв виникненню каналів, по яким просочувався розплав міді та розклинював тверду добавку. Це викликало відокремлення дисперсних часток розміром $\sim 40\text{-}50$ мкм від добавки і перенесення їх в об'єм рідкої міді – рис. 9 а. Початок розчинення менш тугоплавкої фази у міді суттєво інтенсифікував процес диспергування поверхневого шару лігатури, чому сприяла ерозійна дія електромагнітних сил – рис. 9 б. МГД течії, що діяли в зоні руйнування цього шару відносили дисперговані об'єми (розмірами від 1 до 20 мкм) в розплав від більш крупних часток лігатурного сплаву – рис 9 в. Після цього відбулося розмивання мікрооб'ємів лігатури (рис 9 г), а потім розплав перейшов мікро-суспензійно-емульсійний стан (рис 9 г).

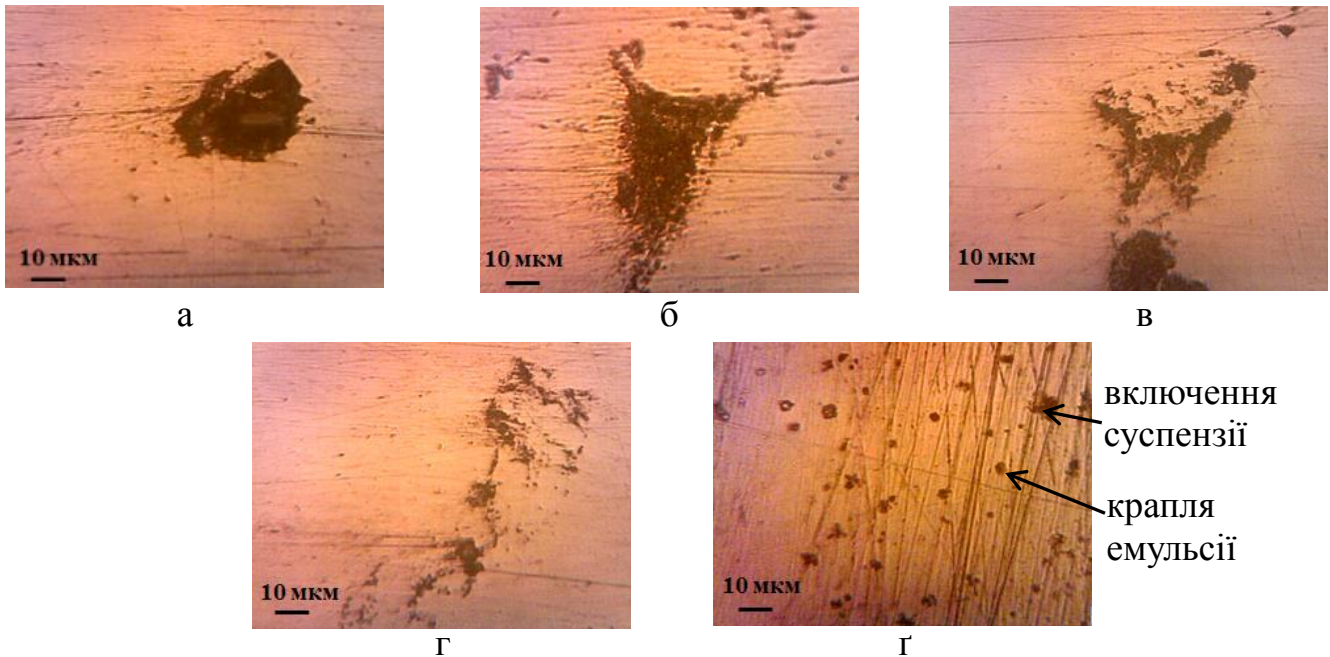


Рис. 9. – Етапи взаємодії твердої добавки FeCrC з розплавом міді:

а – відокремлення дисперсних об'ємів від лігатури і перенесення їх у розплав;
 б – віднесення дисперсних частин від об'єму лігатури в розплав міді; в – перехід у рідкий стан всієї карбідної евтектики і формування дисперсних мікрооб'ємів лігатури;
 г – диспергування і розосередження прогрітих мікрооб'ємів лігатури; г – мікро-суспензійно-емульсійний стан розплаву

Під дією електромагнітних сил, які перемішували розплав в усьому об'ємі тиглю і його мікрооб'ємах та зростання температури за рахунок підвищення питомої потужності ЕМП, усі вкраплення лігатури були насичені міддю. В результаті увесь розплав перейшов у мікроемульсований стан з розмірами вкраплень ~ 1 мкм при їх рівномірному розподілі рис. 10.

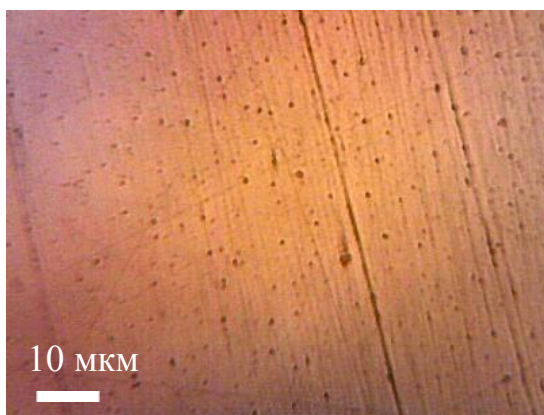


Рис. 10. – Структура замороженої мікроемульсії сплаву Cu-FeCrC (введення твердої лігатури в рідку мідь)

Залежність розміру вкраплень і щільності їх розподілу у макрозразку ($d = 6$ мм) з мідного сплаву від вмісту лігатури FeCrC представлені в таблиці. Середній розмір зерна в виливках становив $20,52 \pm 3,25$ мкм.

Таблиця
Параметри включень в структурі сплаву при різній кількості добавки

Параметри	Кількість добавки, % мас.	
	0,7	1,0
Середній розмір включень, мкм	$0,52 \pm 0,04$	$0,94 \pm 0,08$
Діапазон розмірів включень, мкм	0,30 – 1,80	0,30 – 2,40
Відстань між включеннями, мкм	$4,90 \pm 0,66$	$6,22 \pm 1,29$
Кількість включень, мм^{-2}	$3,13 \cdot 10^4$	$1,14 \cdot 10^4$
Відсоток коалесцюваних включень, %	3,7	11,8

З даних таблиці видно, що спеціально організовані електромагнітні впливи, при зниженні кількості добавки менше 1%, забезпечили більшу ступінь її розосередження в об'ємі розплаву емульсованих включень, зменшення кількості коалесцюваних крапель та їх розміру і за рахунок цього істотне підвищення кількості ультрадисперсних вкраплень.

На основі проведеного аналізу, фізичного моделювання, встановлених закономірностей і експериментальних плавок в ІТП розроблена нова МГД-технологія одержання спеціальних мідних сплавів, зміцнених ультрадисперсними (≤ 1 мкм) і рівномірно розподіленими вкрапленнями на основі FeCrC. Вона складається з наступних основних стадій: завантаження в тигель ІТП мідної шихти, її плавлення і перегрів до температури 1533-1563 К (1260-1290 °С) (зона між температурами ліквідус і солідус лігатури) при питомій потужності 0,30-0,35 кВт/кг; додавання 1-4% мас. твердої подрібненої (до 3 мм) лігатури FeCrC в рідку мідь при питомій потужності на рівні 0,40-0,45 кВт/кг, що забезпечує турбулентний стан розплаву; руйнування добавки за рахунок розплавлення її легкоплавкої складової; переведення розплаву з суспензійного-емульсійного стану в однорідну мікроемульсію при перегріванні до 1653-1673 К (1380-1400 °С) (1% FeCrC) і 1723-1743 К (1450-1470 °С) (4% FeCrC) (питома потужність 0,8-1,0 кВт/кг, що забезпечує інтенсивний нагрів і режим розвиненої турбулентності руху рідкого металу); зниження питомої потужності до 0,15-0,20 кВт/кг для забезпечення ламінарного руху в процесі охолодження розплаву при його переводі із зони мікро- в зону макророзшарування і температури 1633 К (1360 °С) з подальшою розливкою. Основні технологічні режими даної технології були використані при отриманні дисперснозміцненого матеріалу на основі міді з підвищеними експлуатаційними характеристиками для струмоз'ємних композиційних деталей залізничного транспорту в ході виконання проекту № Р7.6 цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс»). Визначено, що структура шару дослідної вставки, який ковзає по контактному дроту мала середній розмір зерна $b_3 = 28$ мкм з дисперсними вкрапленнями розміром в 1 мкм розосередженими, в основному, всередині зерен – рис. 11. Відповідний шар серійної

вставки типу ПКД мав більш грубу зеренну структуру ($b_3=40$ мкм, дисперсна фаза з $b=5$ мкм з зонами скупчення і окремими крупними до $b=85$ мкм вкрапленнями на основі евтектики лігатури – рис. 12 (де 1 – пора; 2 – включення фази на основі FeCrC на початку їх насичення міддю; 3 – емульсовані включення фази на основі FeCrC насичені міддю).

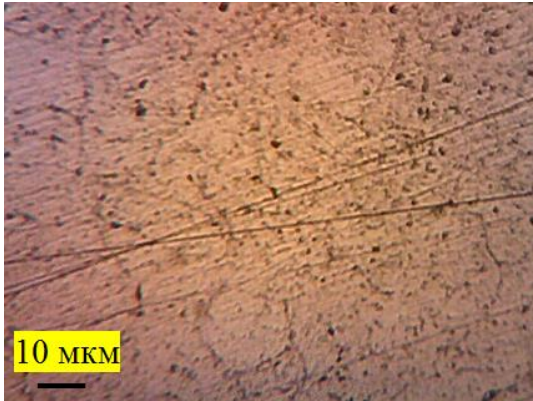


Рис. 11. – Структура контакт-ного шару дослідної вставки

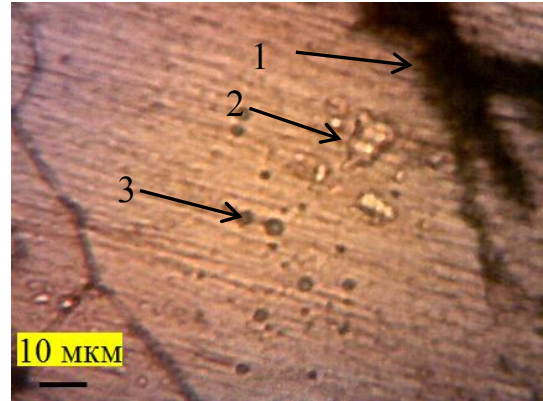


Рис. 12. – Структура контакт-ного шару серійної вставки типу ПКД

Проведені порівняльні випробування дослідних вставок та тих, які експлуатуються «Українською залізницею» на електротягах постійного струму показали (рис. 13), що дослідні вставки мають найбільш збалансовані з показниками властивостей КД характеристики.

Це дозволяє прогнозувати збільшення ресурсу пробігу дослідних вставок пантографів у вантажному та пасажирському русі порівняно з серійними вставками: типу ПКД на 25%; з пантографної міді не менш ніж в 5 разів; імпортованих МГ-487 у 2,5 рази.

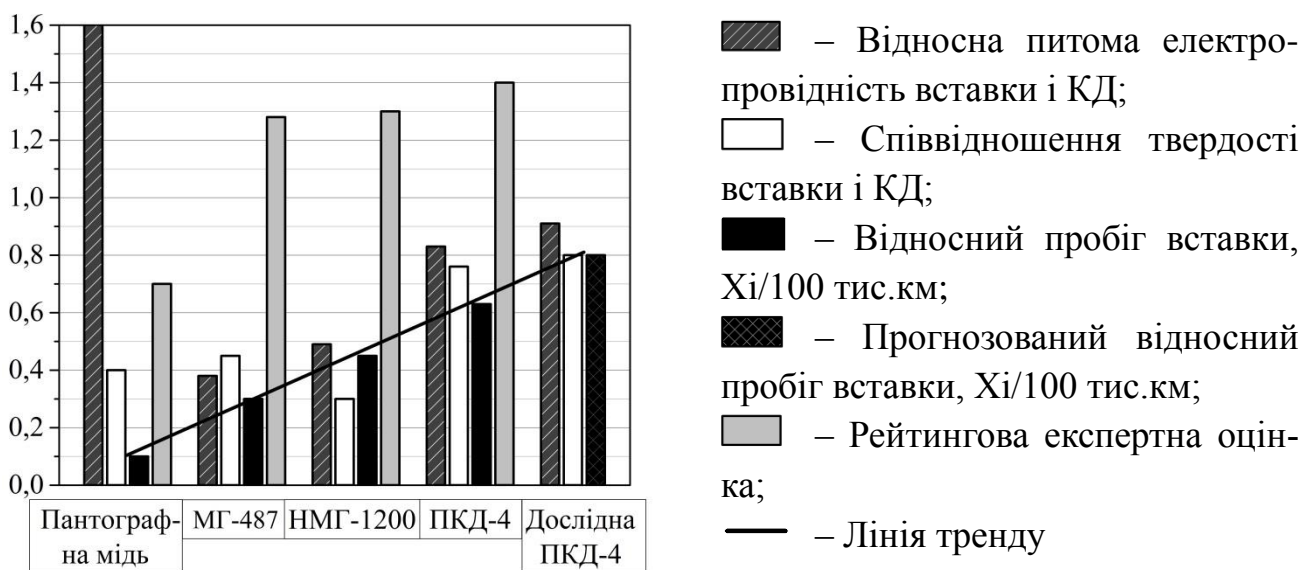


Рис. 13. – Співставлення відносних показників якості пари тертя «КД – струмоз'ємна вставка»

Крім того, прогнозується пониження зносу КД, скорочення кількості випадків його руйнування, завдяки поліпшенню умов сухого тертя і зниженню перегріву дроту та економія електроенергії за рахунок зменшення питомого електроопору контактних вставок. З урахуванням сучасного економічного стану країни використання матеріалу вітчизняного виробництва для виготовлення струмоз'ємних вставок дає змогу значно скоротити витрати та замінити імпортні деталі, вартість яких зараз значно вище ціни вставок українського виробництва типу ПКД.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання з розробки технології одержання спеціальних мідних сплавів, зміцнених ультрадисперсними вкрапленнями на основі FeCrC, сформованими в розплаві із застосуванням впливу змінного електромагнітного поля, для виготовлення дисперснозміцненого мідного матеріалу зі структурою замороженої мікроемульсії з вкрапленнями ≤ 1 мкм, використання якого підвищує ресурс і надійність транспортних струмоз'ємних конструкцій та дротів контактної мережі. Робота виконана на основі розвитку теоретичних уявлень і отриманих експериментальних даних про вплив режимів руху розплаву на сплавлення компонентів сплавів монотектичної системи, які суттєво відрізняються в'язкістю, визначення впливу температурних, концентраційних, часових, гідродинамічних і електромагнітних параметрів на процес формування однорідної структури з дрібно- або ультрадисперсними вкрапленнями.

Основні наукові і теоретичні результати роботи:

1. На базі аналізу літературно-патентних джерел визначена актуальність розробки металургічних технологічних процесів отримання вискоефективних матеріалів для потреб, зокрема, сучасного залізничного електротранспорту України. Відзначена перспективність мідних сплавів монотектичної системи, в якості матеріалу для виготовлення струмоз'ємних деталей електротранспорту, при умові забезпечення рівномірного розподілення ультрадисперсних тугоплавких вкраплень у високо електропровідній основі сплаву. При чому такі деталі повинні працювати у дуже складних умовах експлуатації, забезпечуючи мінімальний знос КД, надійний струмоз'єм та максимально можливий міжремонтний пробіг. Визначено, що наявність у сплавах монотектичної системи над областю макророзшарування рідких фаз зони «мікроемульсії» дає можливість отримання, при охолодженні розплаву і твердненні, зміцнюючих вкраплень з розмірами ~ 1 мкм, але при дуже високих швидкостях охолодження та без забезпечення однорідності розподілу вкраплень.

2. Аналіз співвідношення коефіцієнтів взаємної молекулярної дифузії компонентів мідних сплавів монотектичних систем K_D дозволив встановити визначний вплив співвідношення кінематичних в'язкостей розплавлених компонентів на величину K_D . Досліджено закономірності впливу змінного ЕМП в умовах плавки в ІТП на розчинення твердої добавки FeCrC у рідкій міді. Встановлено, що завдяки виникненню навколо добавки МГД течій в активній зоні дії ЕМП суттєве прискорення масообміну відбувається при забезпеченні в зоні розплаву прилеглий до FeCrC, значення питомої електромагнітної сили $F_e > 1 \cdot 10^5$ Н/м³. Визначено, що в розплаві міді поза зоною дії ЕМП розчинення добавки FeCrC найбільш ефективно при найменших її

розмірах ($\leq 5 \cdot 10^{-5}$ м) в турбулентному режимі руху розплаву ($Re \sim 1 \cdot 10^4$).

3. Визначено умови стабільності мікроемульсованого стану розплавів металевих сплавів, на які діє змінне ЕМП індуктора, у циліндричній ємності, які характеризуються для розплавів на мідній основі виразом $4,3 \cdot 10^{15} \cdot \tau \cdot f \cdot (d \cdot B)^2$. Мінімізація його величини сприяє стабільності мікроемульсійного і мікросуспензійного стану розплаву, особливо складова $(d \cdot B)^2$ оскільки значення діаметра (d) вкраплень і індукції ЕМП $B \ll 1$, а квадрат їх добутку становить дуже малу величину. Час обробки τ розплаву полем і його частота f навпаки $\gg 1$. Визначено, що стабільність мікроемульсованого стану розплаву підвищується, при зменшенні, як розміру крапель, так і величини градієнта розподілу електромагнітних сил. Для об'єму розплаву поза дією ЕМП стабільність мікроемульсії забезпечується рухом рідкого сплаву у ламінарному режимі і подальшого охолодження до мікросуспензійного стану з наступною розливкою ламінарним потоком або в умовах швидкісного охолодження рідкого сплаву.

4. Методом фізичного моделювання процесів взаємодії рідких компонентів і формування емульсованої структури на низькотемпературному сплаві монотектичної системи BiZn, в якому компоненти втричі відрізняються за показниками кінематичної в'язкості, встановлено, що залежність характерного розміру l_c диспергованих рідких фаз від значення числа Re на початковому етапі сплавлення компонентів сплаву визначається виразом $l_c = 173,8 / [1 + (Re/34,9)^{1,1}]$, ($R^2 = 0,999$), а швидкий перехід розплаву в емульгований стан відбувається при $Re \geq 1 \cdot 10^3$. Встановлена залежність кількості ультрадисперсних ($\leq 0,5$ мкм) вкраплень у твердому сплаві від швидкості охолодження V_0 . Згідно отриманої залежності 100% ультрадисперсних вкраплень досягаються у структурі сплаву при $V_0 = 3 \cdot 10^6$ К/с. Визначено, що середні значення розмірів вкраплень у дослідному сплаві досягали діапазону ультрадисперсності при умові $Fo > 1$, $Bi < 0,7$. Встановлено, що при зниженні концентрації зміцнюючої фази у зоні незмішування в 1,6 рази (з 14% до 9% мас.), при швидкості охолодження мікроемульсії $V_0 = 3,56 \cdot 10^5$ К/с, розмір вкраплень зменшився у 1,9 рази (до 0,74 мкм).

5. Встановлено, що при одержанні сплаву в ІТП і розплавленні у рідкій міді лігатури FeCrC її тугоплавка фаза диспергувалась, а менш тугоплавка (карбідна евтектика) на противагу зливалась у відособлені, значно крупніші об'єми (~ 1 мм). В'язкість евтектики більш ніж утричі ($K_v = 3,2$) перевищувала в'язкість розплавленої міді, що потребувало додаткового часу і енергії для руйнування цих об'ємів.

6. Встановлено, що процес сплавлення компонентів монотектичного сплаву Cu-FeCrC доцільно проводити при взаємодії твердої лігатури з рідкою міддю у температурному інтервалі між зоною ліквідус і солідус добавки, та локальній концентрації впливу ЕМП в зоні присутності добавки, що забезпечує перехід у рідкий стан легкоплавкої високов'язкої складової та її розосередження на початковому етапі сплавлення. При цьому більш тугоплавка фаза лігатури диспергується до розмірів $\sim 40-50$ мкм, що значно прискорює масообмін у розплаві.

7. З'ясовано, що інтенсивність розігріву добавки на початковому етапі суттєво підвищується, як за рахунок термоудару від потоку тепла від мідного розплаву, так і через втрати на перемагнічування (до точки Кюрі) внаслідок її перебування в зоні концентрованого впливу ЕМП.

8. Визначено, що отримання однорідної структури з дрібнодисперсними вкрапленнями в сплаві Bi-Zn без накладання додаткових зовнішніх впливів можливо за рахунок швидкого охолодження ($V_0 > 1 \cdot 10^5$ K/c) від температури бінодалі. Встановлено, що 100% ультрадисперсних включень ($\leq 0,5$ мкм) можливо досягнути у сплаві з 9% мас. фази, що диспергується у зоні незмішування при швидкості охолодження $\sim 3 \cdot 10^6$ K/c і при значеннях чисел $Fo > 1$ та $Bi < 0,7$.

9. Визначено, що формування однорідного мікроемульсованого стану сплаву монотектичної системи Cu з 4% мас. FeCrC можливо за рахунок комплексного МГД впливу ЕМП у процесі його виплавки, а при охолодженні розплаву від температур зони мікроемульсійного стану до температури монотектики за рахунок зниження рівня теплосилового впливу ЕМП і подальшому розливанні ламінарним потоком та охолодженні без дії ЕМП зі швидкістю ~ 1000 K/c фіксується структура з розміром включень зміцнюючої фази ≤ 1 мкм та щільністю їх розподілу $1 \cdot 10^5$ мм⁻².

10. Встановлено, що за рахунок застосування розробленого комплексу електромагнітного впливу при виплавці монотектичного сплаву Cu-FeCrC та зменшення вмісту добавки до 1% мас. при швидкості охолодження ~ 100 K/c 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).

11. На основі проведеного аналізу, фізичного моделювання та встановлених закономірностей і експериментальних плавок в ІТП розроблена нова МГД-технологія отримання спеціальних мідних сплавів, зміцнених ультрадисперсними (< 1 мкм) і рівномірно розподіленими вкрапленнями на основі FeCrC. Вона складається з наступних стадій: завантаження мідної шихти в тигель, її плавлення і перегрів до температури 1533-1563 K (1260-1290 °C) (зона між температурами ліквідус і солідус лігатури) при питомій потужності 0,30-0,35 кВт/кг; додавання 1-4% мас. твердої подрібненої (до 3 мм) лігатури FeCrC в рідку мідь при питомій потужності на рівні 0,40-0,45 кВт/кг, що забезпечує турбулентний стан розплаву; руйнування добавки за рахунок розплавлення її легкоплавкої складової; переведення розплаву з суспензійно-емульсійного стану в однорідну мікроемульсію при перегріві до 1653-1673 K (1380-1400 °C) (1% лігатури) і 1723-1743 K (1450-1470 °C) (4%) (питома потужність 0,8-1,0 кВт/кг, що забезпечує інтенсивний нагрів і режим розвиненої турбулентності руху рідкого металу); зниження питомої потужності до 0,15-0,20 кВт/кг для забезпечення ламінарного руху в процесі охолодження розплаву при його переведенні із зони мікро- в зону макророзшарування і температури 1633 K (1360 °C) з подальшою розливкою.

12. Визначено, що використання розробленої технології дозволяє знизити витрати електроенергії при виплавці дисперснозміцненого сплаву Cu-FeCrC на 3 кВт·год/кг. Виготовлені, з цього сплаву, контактні вставки пантографів електровозів мають ефективно збалансовані показники властивостей (відносна питома електропровідність вставки і КД 0,9 та співвідношення твердості робочого шару вставки і КД 0,8), що забезпечує збільшення ресурсу пробігу дослідних вставок пантографів у вагонтяжному та пасажирському русі порівняно з серійними вставками типу ПКД на 25%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Середенко В. О. Мікрвокращлення в структурі сплавів з областю незмішування рідких фаз в різних умовах охолодження / В. О. Середенко, О. В. Середенко, О. А. Паренюк // *Металознавство та обробка металів*. – 2014. – №3. – С. 39-43.
2. Паренюк А. А. Перспективы применения медных сплавов монотектических систем как материала для токосъемных вставок на электротранспорте / А. А. Паренюк // *Процессы литья*. – 2015. – №3. – С. 62-65.
3. Дубоделов В. И. Влияние движения расплава на диспергирование добавки в объеме металла на начальном этапе сплавления компонентов монотектической системы / В. И. Дубоделов, В. А. Середенко, Е. В. Середенко, А. А. Паренюк // *Процессы литья*. – 2015. – №4. – С. 47-55.
4. Дубоделов В. И. Сплавление меди с легирующим комплексом FeCrC и формирование эмульгированного расплава с помощью электромагнитного воздействия / В. И. Дубоделов, В. А. Середенко, Б. А. Кириевский, В. В. Христенко, Е. В. Середенко, А. А. Паренюк // *Процессы литья*. – 2015. – №5. – С. 36-42.
5. Дубоделов В. І. Розробка МГД-технологій одержання дисперсно-зміцнених матеріалів на основі міді для струмоз'ємних деталей залізничного транспорту / В. І. Дубоделов, В. О. Середенко, Б. А. Кірієвський, Ю. В. Моїсеєв, О. В. Середенко, О. А. Паренюк // *Збірник наукових статей: Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України – Київ*, – 2015. – С. 599-607.
6. Середенко В. А. Влияние концентрации тугоплавкого компонента в зоне не смешиваемости фаз в жидком состоянии сплава BiZn и скорости охлаждения микроэмульсии при затвердевании на количество ультрадисперсных включений / Середенко В. А., Середенко Е. В., Паренюк А. А. // *Металлофизика и новейшие технологии*, – 2017. – №9 (39). – С. 1253-1265. DOI: 10.15407/mfint.39.09.1253.
7. Дубоделов В. И. Условия получения сплавов со структурой замороженной микроэмульсии и МГД-технология выплавки расплава меди с ультрадисперсными каплями на основе FeCrC / В. И. Дубоделов, В. А. Середенко, Б. А. Кириевский, Е. В. Середенко, А. А. Паренюк // *Процессы литья*. – 2018. – №1. – С. 3-14.
8. Середенко В. А. Влияние условий охлаждения на параметры литой структуры микроэмульгированного сплава Bi-Zn / В. А. Середенко, Е. В. Середенко, А. А. Паренюк // *Матер. Юбилейной X Международной научно-практической конференции «ЛИТЬЕ. Металлургия. 2014»*. – Запорожье, 2014. – С. 216-218.
9. Дубоделов В. И. Особенности взаимодействия компонентов сплавов монотектической системы в начале их сплавления / В. И. Дубоделов, В. А. Середенко, Е. В. Середенко, А. А. Паренюк // *Матер. XI Международной научно-практической конференции «ЛИТЬЕ. Металлургия. 2015»*. – Запорожье, 2015. – С. 69-71.
10. Дубоделов В. И. Технология получения микроэмульгированного расплава меди с комплексом FeCrC при электромагнитном воздействии для изготовления заготовок из упрочненного материала / В. И. Дубоделов, В. А. Середенко, Б. А. Кириевский, Е. В. Середенко, В. В. Христенко, А. А. Паренюк // *Матер. XI Международной научно-практической конференции «ЛИТЬЕ. Металлургия. 2015»*. – Запорожье, 2015. – С. 74-76.

11. Дубоделов В. И. Получение медного расплава с микроэмульгированными включениями FeCrC в электромагнитном поле / В. И. Дубоделов, В. А. Середенко, Б. А. Кириевский, Е. В. Середенко, А. А. Паренюк // Матер. XI Международной научно-практической конференции «ЛИТЬЕ. Metallургия. 2015». – Запорожье, 2015. – С. 76-78.

12. Дубоделов В. И. Мгд-технология получения новых электропроводных износостойких материалов для токосъёмных элементов электротранспорта / В. И. Дубоделов, Б. А. Кириевский, В. А. Середенко, Е. В. Середенко, А. А. Паренюк // Матер. XII Международной научно-практической конференции «ЛИТЬЕ. Metallургия. 2016». – Запорожье, 2016. – С. 82-84.

13. Середенко В. А. Структура «замороженной микроэмульсии» медного сплава с малым содержанием FeCrC, выплавленного в индукционной тигельной печи / В. А. Середенко, Е. В. Середенко, А. А. Паренюк // Матер. XII Международной научно-практической конференции «ЛИТЬЕ. Metallургия. 2016». – Запорожье, 2016. – С. 203-204.

14. Середенко В. А. Особенности взаимодействия лигатуры FeCrC с медным расплавом при действии переменного электромагнитного поля / В. А. Середенко, Е. В. Середенко, А. А. Паренюк // Матер. XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра». – К: НТУУ «КПІ», 2016. – С. 878-887.

15. Середенко В. А. Перспективы получения под электромагнитным воздействием литых медных сплавов монотектической системы, упрочненных ультрадисперсными включениями, выделившихся в расплаве / В. А. Середенко, Е. В. Середенко, А. А. Паренюк // Матер. VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні». – К: НТУУ «КПІ» ІФФ, 2016. – С. 133-134.

16. Середенко В. А. Зависимость литой структуры типа “замороженной микроэмульсии” тонких образцов сплава замонотектического состава от скорости охлаждения / В. А. Середенко, Е. В. Середенко, А. А. Паренюк // Матер. XIII Международной научно-практической конференции «ЛИТЬЕ. Metallургия. 2017». – Запорожье, 2017. – С. 213-215.

17. Патент на корисну модель № 123885 Україна, МПК C21C 5/52, F27B 14/10. Спосіб виплавки металів та сплавів з високою електропровідністю в індукційних тигельних печах з додатковим нагрівачем / Середенко В. О., Паренюк О. А., Середенко О. В. (ФТІМС НАН України (UA)). – Заявка № u201709824 від 10.10.2017 р. – Опубл. 12.03.2018 р., Бюл. №5.

18. Паренюк А. А. Стабилизация эмульгированного состояния сплава на основе меди с зоной несмешивания жидких фаз при плавке в индукционной тигельной печи / А. А. Паренюк, В. А. Середенко // Матер. XIV Международной научно-практической конференции «ЛИТЬЕ. Metallургия. 2018». – Запорожье, 2018. – С. 154-155.

19. Паренюк А. А. Повышение эффективности растворения лигатуры FeCrC в медном расплаве в индукционной тигельной печи / А. А. Паренюк, В. А. Середенко // Матер. XIV Международной научно-практической конференции «ЛИТЬЕ. Metallургия. 2018». – Запорожье, 2018. – С. 156-157.

20. Паренюк А. А. Взаимная диффузия компонентов при сплавлении меди с лигатурой FeCrC / А. А. Паренюк, В. А. Середенко // Матер. XIV Международной научно-практической конференции «ЛИТЬЕ. Metallургия. 2018». – Запорожье, 2018. – С. 158-159.

21. Середенко В. О. Виплавка металів та сплавів з високою електропровідністю в індукційних тигельних печах / В. О. Середенко, Е. В. Середенко, О. А. Паренюк // Матер. XV Международной научно-практической конференции «ЛИТЬЕ. Metallургия. 2019». – Запорожье, 2019. – С. 180-182.

АНОТАЦІЯ

Паренюк О. А. Одержання спеціальних мідних сплавів, зміцнених ультрадисперсними вкрапленнями на основі FeCrC, сформованими в розплаві під дією змінного електромагнітного поля. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Metallургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів». Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-технічного завдання з розробки технології виплавки спеціального мідного сплаву з добавкою FeCrC у мікроемульсованому стані на базі розвитку теорії, зокрема, встановлення особливостей дії змінного електромагнітного поля на розплав із врахуванням уявлень про виникнення МГД-течій навколо добавки, внаслідок відмінностей електромагнітних властивостей лігатури та основи сплаву в індукційній тигельній печі. Експериментально підтверджено, що за рахунок структурної неоднорідності добавки відбувається перерозподіл електричного струму, який генерується в розплаві змінним електромагнітним полем, що викликає локальну концентрацію щільності електроструму у більш електропровідній фазі лігатури, підвищення тепловиділення у ній, та сприяє виникненню каналів по яким проникає матричний розплав та розклинає добавку, внаслідок чого прискорюється її диспергування. Встановлено, умови диспергування добавки до мікронних розмірів, на початковому етапі її сплавлення з мідною основою, що включають формування в тиглі індукційної печі локальної зони високої щільності електроструму і утримання легуючої добавки в цій зоні, що суттєво інтенсифікує процес її розчинення. Визначено вплив концентрації добавки на розмір включень та встановлені раціональні режими формування в литій структурі замороженої мікроемульсії при охолодженні і твердненні сплаву. На основі встановлених залежностей створено нову МГД технологію, що дозволяє зафіксувати у твердому стані включення ультрадисперсних розмірів (≤ 1 мкм) при високій щільності їх однорідного розподілу та знизити витрати електроенергії на 3 кВт·год/кг при виплавці дисперснозміцненого мідного сплаву. Виготовлені, з такого матеріалу, струмоз'ємні контактні вставки пантографів електровозів постійного струму мають ефективно збалансовані показники властивостей (відносна питома електропровідність вставки і контактного дроту 0,9 та співвідношення твердості робочого шару вставки і контактного дроту 0,8), що забезпечує збільшення ресурсу пробігу дослідних вставок пантографів у вантажному та пасажирському русі порівняно з серійни-

ми вставками типу ПКД на 25%.

Ключові слова: спеціальні мідні сплави, зона незмішування, мікроемульсований розплав, електромагнітний вплив, ультрадисперсні включення, струмоз'ємні вставки, підвищення ресурсу.

ABSTRACT

Pareniuk O. A. **Obtaining special copper alloys, strengthened by ultra-disperse FeCrC based inclusions, formed in the melt under the action of an alternating electromagnetic field.** – On the rights of the manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in specialty 05.16.02 – "Metallurgy of ferrous and non-ferrous metals and special alloys". The Physico-technological institute of metals and alloys, NAS of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation work is devoted to the solution of the actual scientific and technical task: development of the melting technology in the micro-emulsion state special copper alloy with FeCrC addition on the theoretical basis, particularly, determination of the peculiarities of the effect of variable electromagnetic field on the melt, taking into account the ideas about the appearance of magnetohydrodynamic micro-currents around the additive, due to different electromagnetic properties of the ligature and the basis of the alloy in an induction crucible furnace. It is experimentally confirmed that due to the structural heterogeneity of the additive, the electric current generated in the melt by an alternating electromagnetic field is redistributed, which causes a local concentration of the electric current density in the more electrically conductive phase of the additive, increases the heat emission in it, and contributes to the appearance of channels through which the matrix melt penetrates and wedges the additive, thus accelerating its dispersion.

The conditions of dispersion of the additive to micron sizes at the initial stage of its smelting with the copper base, including the formation of an induction furnace in the crucible of a local area of high electrical current density and the retention of an alloying additive in this area, which significantly intensifies the process of its dissolution, are determined. The influence of the additive concentration on the size of inclusions is determined and rational modes of formation of frozen microemulsion in the cast structure of the alloy cooling and hardening are established. On the basis of the established dependencies, a new MGD technology was created, which allows to fix in a solid-state the inclusion of ultra-disperse dimensions (≤ 1 micron) at a high density of their homogeneous distribution and to reduce electricity consumption by 3 kW·h/kg during the melting of the dispersion hardened copper alloy.

The current collector pantograph inserts of DC electric locomotives are made of such a material have effectively balanced properties (relative specific electrical conductivity of the insert and the contact wire is 0,9 and the ratio of the hardness of the working layer of the insert and the contact wire is 0,8), which provides an increase in the mileage of research pantograph inserts in freight and passenger traffic as compared to the serial inserts of the PCD type by 25%.

Keywords: special copper alloys, non-mixing zone, micro-emulsified melt, electromagnetic influence, ultra-disperse inclusions, current collector inserts, an increase of service life.