

*Школяренко В.П., Середенко О.В.**(ФТІМС НАН України, Київ)***СТРУКТУРИ СПЛАВУ «МІДЬ-ЗАЛІЗО», РОЗЛИТОГО З МЕХАНІЧНИМ ПЕРЕМІШУВАННЯМ РОЗПЛАВУ У ТИГЛІ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЕЧІ**

АНОТАЦІЯ. Робота присвячена дослідженню мікронеоднорідностей у сплаві Cu-Fe, отриманих шляхом механічного перемішування в умовах індукційного плавлення.

Розглянуто вплив перегрівання над лінією ліквідус на структуру сплавів із добавками заліза (армко-залізо, карбонільне залізо) та вуглецю. Встановлено, що низьке перегрівання (120 K) та збільшення вмісту вуглецю сприяють формуванню мікросуспензії (3–6 мкм), знижуючи кількість дендритів. Виявлено ключові параметри температурного режиму та складу для оптимізації структури сплавів, що забезпечують кращі фізико-механічні властивості.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Cu-Fe, індукційне плавлення, мікросуспензія, дендрити, мікронеоднорідності.

Робота присвячена дослідженню проблеми механічного перемішування сплаву «мідь-залізо» та аналізу однорідності структури сплаву, отриманого при механічному перемішуванні розплаву в тиглі індукційної печі перед розливанням та різкою кристалізацією.

Розвиток техніки потребує покращення властивостей функціональних матеріалів. Сплави системи Cu-Fe активно досліджуються в розвинених країнах з використанням нових технологічних підходів і найсучаснішого обладнання. Система Cu-Fe, згідно даних комп'ютерного моделювання і теоретичного аналізу, проведеного групою дослідників з Мічиганського університету, є вельми перспективною. 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.

У якості матеріалу використано Cu високої чистоти (99,99 %) і армко

залізо. Методи дослідження включали: оптичну мікроскопію та аналіз отриманих результатів.

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що в умовах виплавки в індукційній тигельній печі бінарного сплаву на основі Cu з добавкою 1 % мас. Fe при ламінарному режимі течії розплаву в ньому (період до 30 с після введення в рідку мідь з температурою 1448 К добавки Fe циліндричної форми з температурою 293 К) виникали декілька рідких фаз, які мали чіткі міжфазні границі.

Визначено, що процес розчинення Fe відбувався у змішаному режимі, причому кінетичне і дифузійне розчинення відбувались паралельно. Одразу на початку взаємодії Fe з Cu починалось руйнування пограничного шару добавки, вірогідно, за рахунок інтенсивного перегрівання тонкого зовнішнього шару феромагнітного тіла добавки індукованими в ній електрострумами високої частоти як прояв поверхневого ефекту (скін-ефекту). Цей процес після переходу добавки у парамагнітний стан після нагрівання вище точки Кюрі тривав, але з меншою інтенсивністю через збільшення глибини проникнення електромагнітного поля у поверхневий шар добавки, що призвело до зменшення величини виділеної питомої потужності електромагнітного поля в металі. Встановлено, що всі зафіксовані в пробах по ходу плавки фази, що утворились у процесі взаємодії Cu з Fe, збереглись у зливку, отриманому після заливання всієї маси плавки (0,8 кг) у ливарну форму через 30 хв після введення Fe.

Виявлено, що підняття температури розплаву до 1643 К інтенсифікувало розчинення відокремлених рідких об'ємів в основі сплаву і насичення розплаву киснем. Тому для створення умов формування мікроемульсії, запобігання насичення основи сплаву атомами добавки і киснем найбільш сприятливим діапазоном температур ведення плавки є температури 1523...1623 К при визначенні оптимального рівня інтенсивності перемішування розплаву.

На основі отриманих даних було проведено 2 серії експериментів зі сплавом міді з підвищеним вмістом заліза – 4,8 % при застосуванні перегрівання над лінією ліквідус 280 К (1 серія) і 120 К (2 серія). Перше перегрівання на 280 К здійснювалось до температури, близької до температури плавлення заліза на

сплаві з додаванням армко-заліза. Друге перегрівання – на 120 К вище температури ліквідус сплаву з додавання карбонільного заліза, було близьким до температури пласкої ділянки S-подібного ліквідусу системи мідь – залізо. Таким чином, розплав перебував у двох різноманітних мікронеоднорідних станах.

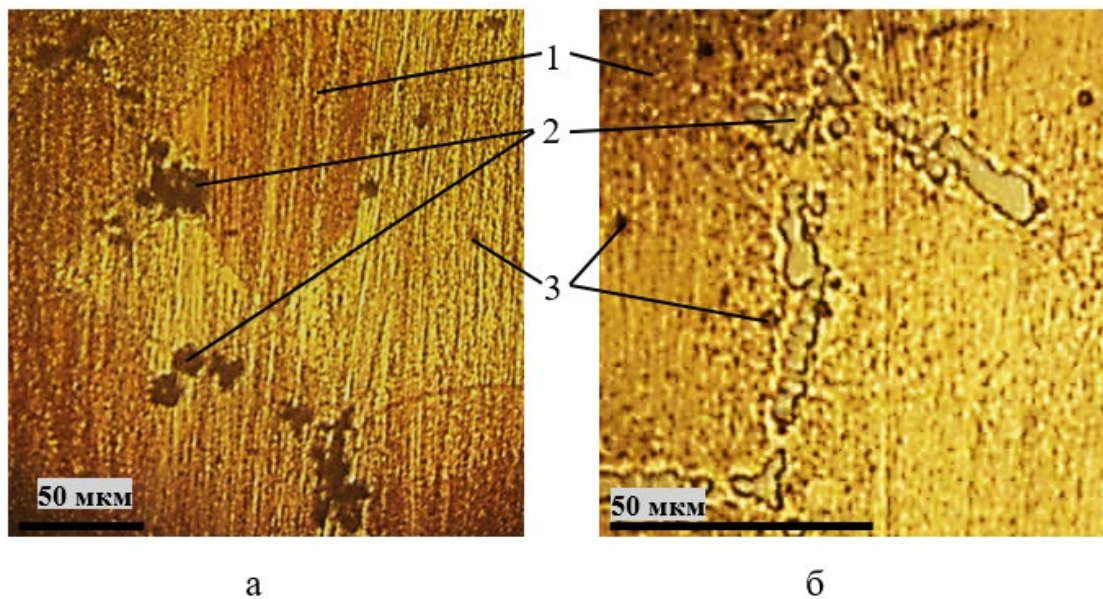
Згідно розрахунку, швидкість охолодження сплаву була у випадку першого перегрівання 1,1 К/с, другого – 3,3 К/с. У структурі металу, який пройшов витримку при перегріванні 280 К, спостерігались подовжені зерна з середнім розміром 150 мкм, виявлення яких потребувало посиленого травлення, а також 2 типи вкраплень (рис. 1). Вкраплення 1 типу були розгалуженими дендритами, цілісними та фрагментованими.

Також були присутні дрібніші вкраплення розміром 3...6 мкм округлої форми, що утворювали у сплаві мікросуспензію (рис. 1). Дендритні вкраплення всіх типів форм розташовувались переважно по границям зерен сплаву. Суспензійні вкраплення – як в об'ємі, так і по границях зерен. Ці вкраплення відрізнялись між собою не тільки за розміром, формою і розташуванням по відношенню до зерен сплаву, а й кольором при травленні. Суспензійні вкраплення набували темнішого забарвлення, ніж дендрити, при застосуванні певного реактиву, що могло бути пов'язано з більшим вмістом у них міді (рис. 1, б). Посиленням травлення у зернах сплаву було виявлено локалізовані навколо дендритів неоднорідності, які відрізнялись розміром і забарвленням, а навколо суспензійних вкраплень основа сплаву виглядала однорідною (рис. 1, а).

Зниження перегрівання розплаву призвело до зменшення розмірів дендритів і суспензійних вкраплень, збільшення кількості вкраплень мікросуспензії при відповідному зменшенні кількості дендритів (~ в 2 рази) – рис. 2. Дендрити стали переважно компактними на відміну тих, що сформувались при більшому перегріванні.

Вірогідно, зменшення розміру дендритів і вкраплень суспензії відбулось через зростання швидкості охолодження при заливанні розплаву з меншою температурою, а також згідно даним [1] зниження часу перебування розплаву в рідкому стані при охолодженні зменшує час, за який вкраплення має змогу зростати. Збільшення кількості вкраплень, вірогідно, обумовлено посиленням

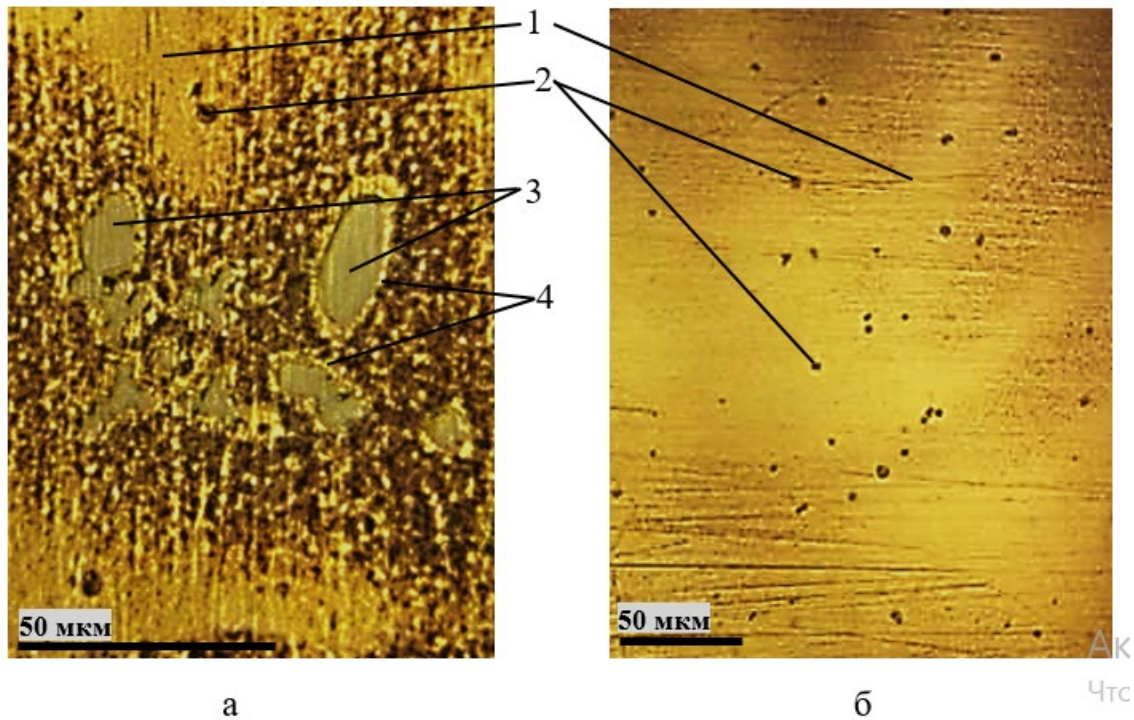
мікронеоднорідності розплаву і збереженням такого стану у твердому металі, як було вказано авторами [2].



1 – зерна основи сплаву, 2 – дендритні вкраплення, 3 – вкраплення мікросуспензії

Рис. 1. Зерна і вкраплення в структурі сплаву $\text{Cu-4,8 \% Fe}$, перегрітого на 280 K над лінією ліквідус: а – зерна і характерне розташування вкраплень у структурі сплаву (травлено реактивом № 1); б – різне забарвлення дендритних і суспензійних вкраплень (травлено)

Таким чином, для отримання більшої кількості суспензійних вкраплень у сплаві міді з 4,8 % армко-заліза, необхідно проводити обробку розплаву при невисокому перегріванні над температурою ліквідус. З урахуванням отриманого результату, дослідження впливу добавки вуглецю на формування структури з дисперсними вкрапленнями, проводилось на сплаві міді з додаванням карбонільного заліза при перегріванні розплаву на 120 K над лінією ліквідус. Збільшення кількості вуглецю у добавці карбонільного заліза (з 0,02 до 1,20 %) в комплексі з невисоким перегріванням розплаву дало змогу підвищити у сплаві кількість суспензійних вкраплень (до 2,5 разів більше, ніж у сплаві з армко-залізом при застосуванні аналогічного перегрівання) – рис. 4.



1 – основа сплаву, 2 – вкраплення мікросуспензії, 3 – дендрити, 4 – концентраційні неоднорідності в основі сплаву навколо дендритів

Рис. 2. Особливості неоднорідностей сплаву міді з армко-залізом, перегрітого на 280 К над лінією ліквідус поблизу вкраплень (посилене травлення): а – неоднорідності навколо дендритних вкраплень; б – суспензійні вкраплення в однорідній основі сплаву

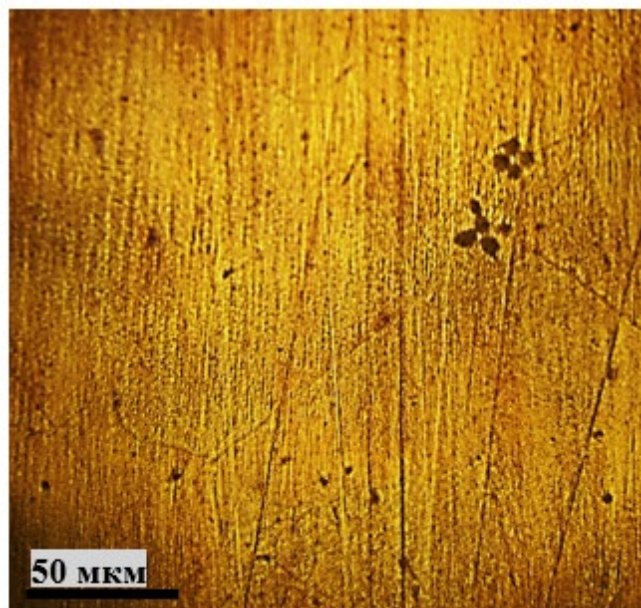


Рис. 3. Вкраплення у сплаві міді з армко-залізом, перегрітому на 120 К над лінією ліквідус (травлено)

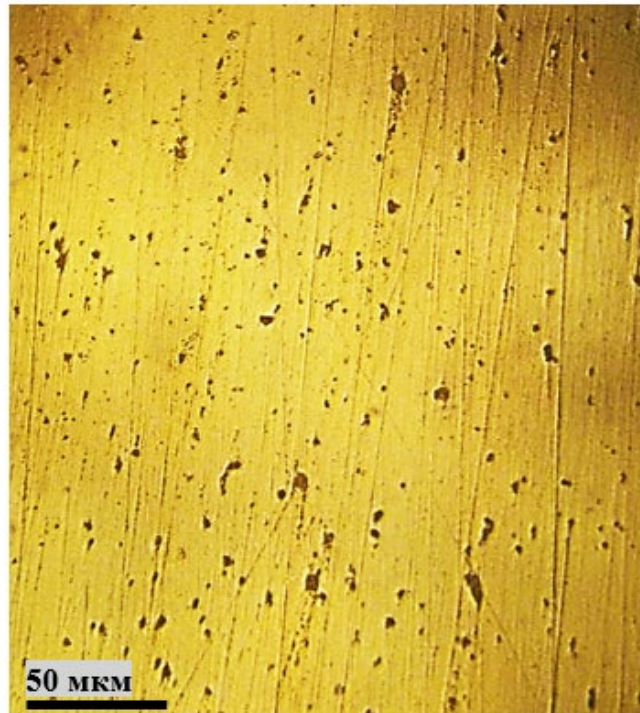


Рис. 4. Вкраплення мікросуспензії у сплаві міді з 4,8 % карбонільного заліза, перегрітому на 120 К над лінією ліквідус (травлено)

Наявність за вкрапленнями слідів, що утворились на базі карбонільного заліза у вигляді «хвостів», які не спостерігались у випадку застосування армко-заліза може бути пов'язано з більшою твердістю вкраплень.

Висновки:

– дія височастотного електромагнітного поля індуктора на розплав при введенні в нього добавки при плавленні в ІТП дає змогу впливати на мікронеоднорідний стан металу, що відображалось на підвищенні кількості фрагментованих дендритів, їх подрібненні та збільшенні числа вкраплень суспензії;

– перегрівання розплаву з вмістом добавки заліза 4,8 % на 280 та 120 К над температурою ліквідус забезпечує мікронеоднорідний стан розплаву, що дає змогу отримати в структурі литого металу вкраплення дендритної форми та мікросуспензію (3 – 6 мкм) при повільному охолодженні розплаву зі швидкістю

порядку $1 \cdot 10^{-1}$ K/c;

– низьке перегрівання розплаву над температурою ліквідус (120 K) в комплексі зі збільшеним вмістом вуглецю в сплаві (1,2 %) та повільним охолодженням призводить до збільшення кількості вкраплень суспензії і відповідному зменшенню вкраплень небажаної морфології – дендритів (з розмірами > 10 мкм);

– зростання вмісту вуглецю у складі добавки з 0,02 до 1,2 % призводить до збільшення кількості вкраплень мікросуспензії в 4 рази.

Література:

1. J. Zhang, X. Cui, Y. Wang. Liquid phase separation in immiscible Cu-Fe alloys // International Journal of Cast Metals Research. – Vol. 31, Issue 2. – 2018. – P. 87-92.

2. Е.А. Марковский, Е.В. Міхнян, Ю.Г. Квасницька, В.М. Симановский, Г.Ф. Мельница. Дослідження впливу температурно-часової обробки жароміцного сплаву ЧС70 з його властивості // Процеси лиття. – 2011. – №1. – С. 51 – 55.



ABSTRACT. The study investigates the microheterogeneities in Cu-Fe alloys produced through mechanical stirring during induction melting. The impact of overheating above the liquidus line on the structure of alloys with iron (Armco iron, carbonyl iron) and carbon additives was examined. It was determined that low overheating (120 K) and increased carbon content promote micro-suspension formation (3–6 μm) while reducing dendrite formation. Key temperature regime and composition parameters for optimizing alloy structures were identified, ensuring improved physical and mechanical properties.

KEYWORDS: Cu-Fe, induction melting, micro-suspension, dendrites, microheterogeneities.