

Література:

1. S. Kumar, D. Kumar, I. Singh and D. Rath. An insight into ultrasonic vibration assisted conventional manufacturing processes: A comprehensive review // *Advances in Mechanical Engineering*. – Vol. 14, Issue 6. – 2022.
<https://doi.org/10.1177/16878132221107812>.
2. Оптимізація технологічних процесів лиття безшовних труб у кокіль гравітаційним методом / Школяренко В.П., Нурадинов А.С., Сіренко К.А. // Всеукраїнська науково-технічна конференція // *Наука і Металургія*. – Дніпро: ІЧМ НАН України, 2022. – С. 31-32.
http://isi.gov.ua/wp-content/uploads/2022/11/%D0%9D%D0%9C_2022.pdf
3. А.С. Нурадинов, А.Г. Пригунова, В.Ю. Шейгам, А.Г. Вернидуб, И.А. Нурадинов. Фізичні методи керування формуванням структури металів // *Метал та лиття України*, 2020. №2. – С. 41-48.
4. Інноваційні шляхи керування процесом формування кристалічної будови металевих сплавів / А.С. Нурадінов, О.В. Ноговіцин, І.А. Нурадінов, Н.Ф. Зубеніна, К.А. Сіренко // *Наука та інновації*. 2020. Т. 16, № 4. – С. 71-77.
<http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/184863/10-Nuradinov.pdf?>
5. Нурадинов А.С. Подрібнення структури сплаву, що затвердіває, в умовах низькочастотної вібрації // *Процеси лиття*, 2008, №4. – С.49-55.

Школяренко В.П., Середенко О.В.

(ФТІМС НАН України, Київ)

СТРУКТУРИ СПЛАВУ «МІДЬ-ЗАЛІЗО», РОЗЛИТОГО З МЕХАНІЧНИМ ПЕРЕМІШУВАННЯМ РОЗПЛАВУ У ТИГЛІ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЕЧІ

E-mail: hvp@ukr.net

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 K добавки Fe циліндричної форми з температурою 293 K) 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.

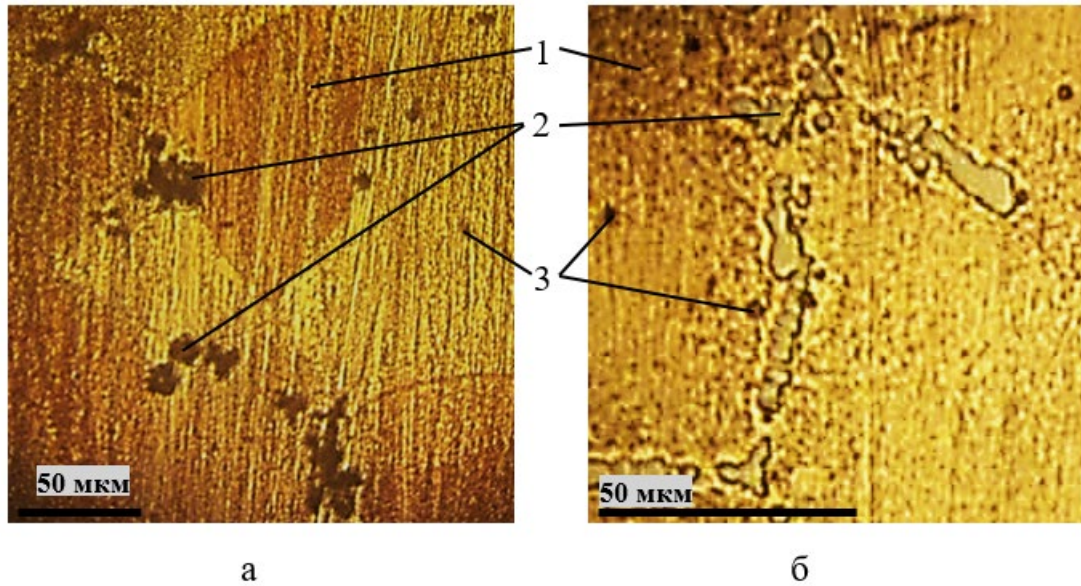
Виявлено, що підняття температури розплаву до 1643 К інтенсифікувало розчинення відокремлених рідких об'ємів в основі сплаву і насичення розплаву киснем. Тому для створення умов формування мікроемульсії, запобігання насичення основи сплаву атомами добавки і киснем найбільш сприятливим діапазоном температур 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).

Посиленим травленням 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).



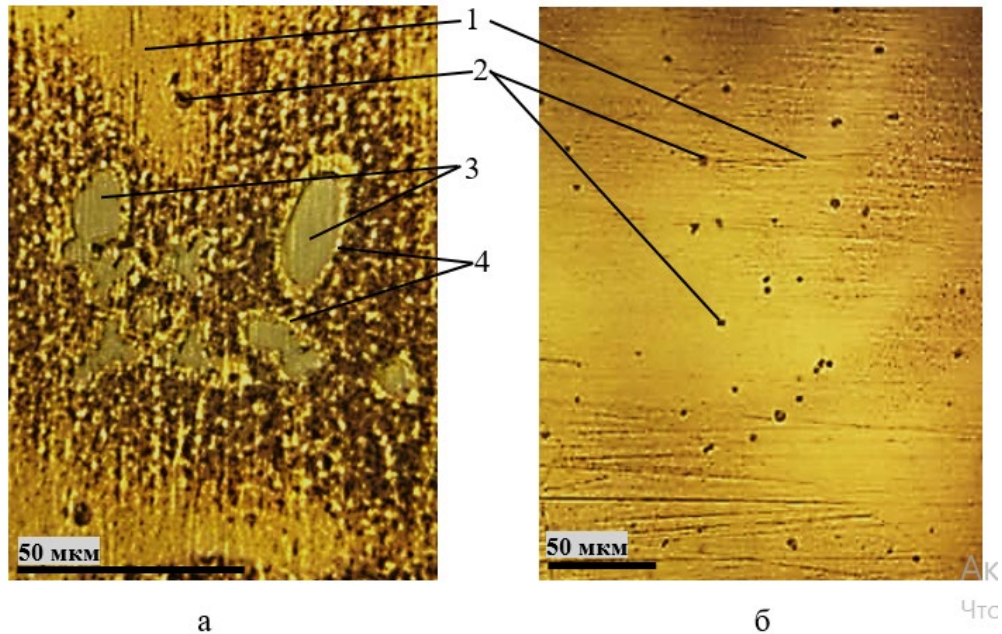
1 – зерна основи сплаву, 2 – дендритні вкраплення, 3 – вкраплення мікросуспензії

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

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 – 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

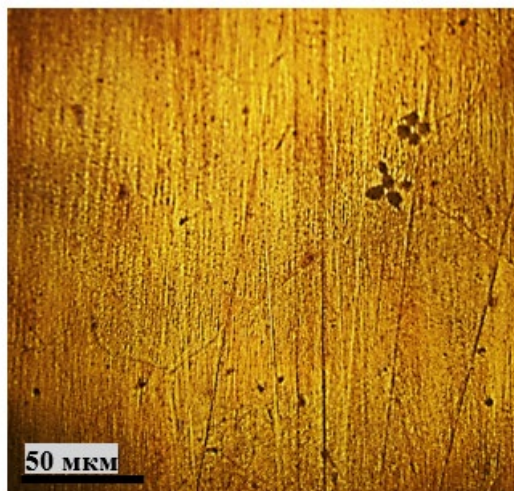


Рис. 3. Вкраплення у сплаві міді з армко-залізом, перегрітому на 120 К над лінією ліквідус (травлено)

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 К 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.



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 високочастотного 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 $1 \cdot 10^{-1}$ К/с;

– низьке перегрівання розплаву над температурою ліквідус (120 К) 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. Симановський, Г.Ф. Мельница. Дослідження впливу температурно-часової обробки жароміцного сплаву ЧС70 з його властивості // Процеси лиття. – 2011. – №1. – С. 51 – 55.