

Вплив постійного магнітного поля на дендритну структуру сплавів системи Al – Cu при охолодженні розплавів

В.І. Дубодєлов, член-кореспондент НАН України

В.О. Середенко, доктор технічних наук

С.С. Затуловський, доктор технічних наук

А.В. Косинська, кандидат технічних наук

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Встановлено зміни структури доєвтектичних сплавів Al-Cu при варіюванні вмісту міді в умовах повільного охолодження ($1,3^{\circ}\text{C}/\text{c}$) розплавів та відсутності примусової конвекції і визначено вплив постійного магнітного поля з індукцією до $1,0\text{ Тл}$ на формування дендритної структури.

Дія постійного магнітного поля на рідкі і тверднучі сплави, зокрема на їх структуру, складна та недостатньо вивчена [1 – 6]. Трансформацію литої структури сплавів під впливом постійного магнітного поля пов'язують зі зміною відносного внеску дифузійних і конвективних процесів в розплаві біля фронту кристалізації [7]. Такий підхід якісно узгоджується з експериментальними даними, отриманими в умовах мікрогравітації, за яких зростання кристалів відбувається у дифузійному режимі внаслідок відсутності теплової конвекції і при малій швидкості охолодження сплавів ($\sim 1^{\circ}\text{C}/\text{c}$) [8].

За звичайних умов швидкість зростання розміру дендритів (V) при кристалізації має складну залежність від величини переохолодження. Навіть при $V = 2\text{ м}/\text{с}$ ще не відбувається перехід до механізму безперервного зростання [9, 10]. Для уточнення дії постійного магнітного поля залежно від величини його індукції з урахуванням суперечливих результатів ряду експериментів [1, 2, 4, 11] досліджено зміни в дендритній структурі бінарних доєвтектичних сплавів системи Al – Cu, які широко використовуються у промисловості і активно досліджуються, зокрема, при накладанні магнітних полів [1, 4, 7, 11]. З метою обмеження кількості факторів, що впливають на процеси структуроутворення, експерименти проводили за умов повільного ($1,3^{\circ}\text{C}/\text{c}$) охолодження розплавів. Вивчали сплави з 2, 4, 8 та 16 % Cu (% мас. частка, тут і далі). Використовували алюміній технічної чистоти (А6) та електротехнічну мідь, яка містила домішки 0,95 % Fe та 0,07 % Si.

Постійні магнітні поля починають впливати на структуру сплавів вже при малих індукціях [2, 4]. Тому дослідження були проведені в діапазоні 0 – 1,0 Тл. Зразки масою 5 г в алундових тиглях після розплавлення і перегріву до 800°C у печі електроопору переміщували до міжполюсного простору електромагніта, де вони охолоджувались і тверднули. Для контрольних зразків магнітне поле не створювали. Температурний режим у всіх експериментах підтримували однаковим. Структуру сплавів вивчали у площинах розрізів, паралельних вертикальній вісі зливків.*

*В роботі брали участь Хаустов К.С., Давиденко В.В., Богатирьова Ж.Д., Набока О.А.

Структура і фізико-механічні властивості

Металографічно встановлено, що в зразках ($H = 0$) при вмісті міді 2 % лита структура сплаву складається з дендритів α -твердого розчину міді в алюмінії. Присутні включення Θ фази ($CuAl_2$) в невеликій кількості у вигляді тонких смужок по границях дендритів. При зростанні добавки міді, незважаючи на те, що дані сплави знаходяться в однофазній області, в їх структурі з'являється евтектика, яка утворюється внаслідок нерівноважної кристалізації [12]. Евтектична складова ($\alpha + CuAl_2$) з'являється вже при введенні 4 % міді (рис. 1 а). Підвищення кількості міді призводить до збільшення евтектичної складової в сплавах (рис. 1 б, в). Вона розташовується в міжосьових проміжках дендритів (рис. 2) і за даними мікрорентгеноспектрального аналізу містить (% ат.): Al – 65, 294, Cu – 34,706. В структурі присутні також включення фази $CuAl_2$.

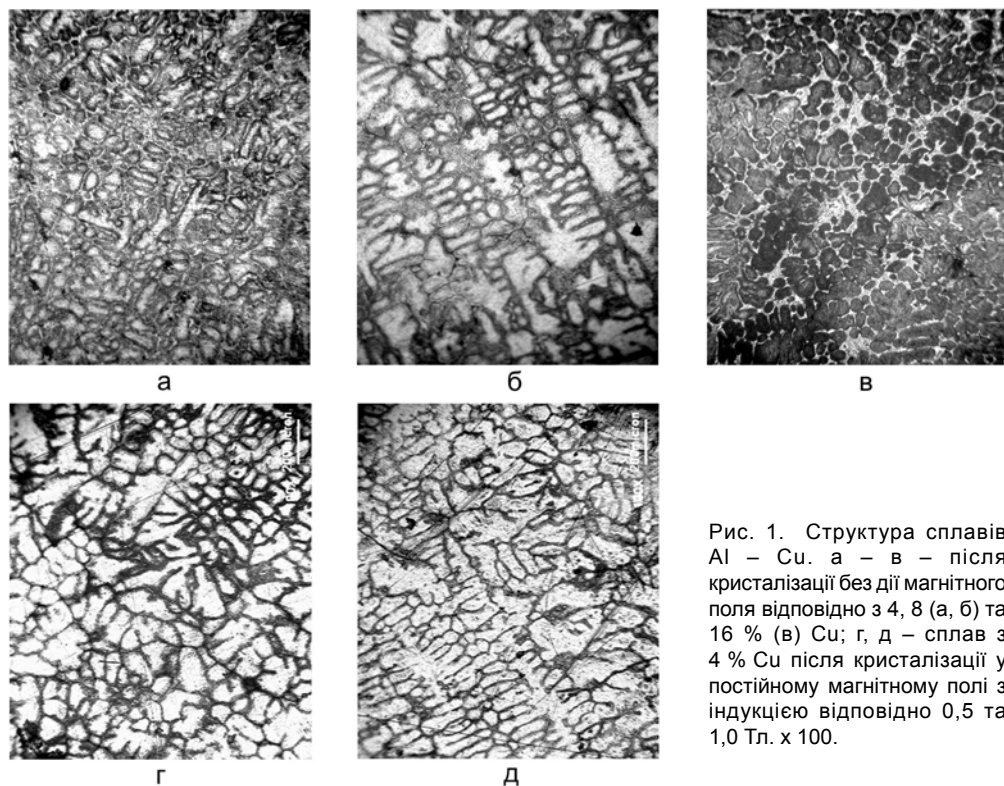


Рис. 1. Структура сплавів Al – Cu. а – в – після кристалізації без дії магнітного поля відповідно з 4, 8 (а, б) та 16 % (в) Cu; г, д – сплав з 4 % Cu після кристалізації у постійному магнітному полі з індукцією відповідно 0,5 та 1,0 Тл. $\times 100$.

Починаючи з 4 % вмісту міді уздовж меж дендритів з'являються чорні включення. Кількість їх зростає з підвищенням мідної складової в сплавах. Вони ущільнюються і утворюють облямівку темного забарвлення. В порівнянні з центральною частиною дендритів кількість міді тут на 2 – 5 % більша. Це може бути віднесене за рахунок внутрішньокристалічної ліквідації міді [12]. При вмісті 16 % Cu в сплаві чорні точкові включення покривають більшу частину поверхні дендритів α -фази (рис. 1 в). При зростанні кількості міді від 2 до 16 % в 2, 4 рази підвищується мікротвердість твердого розчину алюмінію і збільшується середній розмір дендритів (таблиця).

Постійне магнітне поле не змінює фазового складу дослідних сплавів, але впливає на їх структуру. При вмісті 2 та 4 % Cu і підвищенні індукції магнітного поля (H) від 0 до 1,0 Тл середній розмір дендритів збільшується у 1,2 – 1,8 рази (при 2 % Cu) і у 3 – 4 рази (при 4 %) (рис. 1 а, г, д). Здатність до збільшення розміру дендритів при 8 % добавки міді і зміні індукції магнітного поля знижується (таблиця).

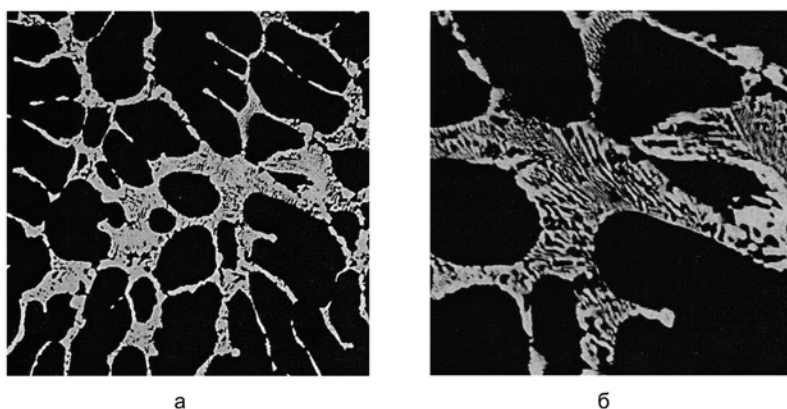


Рис. 2. Колонії подвійної евтектики $\alpha + \text{CuAl}_2$ в сплавах системи Al – Cu. Зображення в режимі відбитих електронів. Чорне – дендрити α -твердого розчину. а – $\times 500$, б – $\times 1200$.

В присутності 16 % Cu магнітне поле не призводить до зміни розміру дендритів. При цьому відмічено підвищення їх мікротвердості. Максимальне зростання мікротвердості α -фази у всіх сплавах виявлено при дії постійного магнітного поля з індукцією 0,5 Тл. Подальше збільшення значень індукції В до 1,0 Тл призводить до її зниження (таблиця). Це може бути пов'язано з впливом магнітного поля на розчинність міді в α -твердому розчині алюмінію.

Встановлено, що евтектика, яка утворюється при кристалізації розплавів, має високу мікротвердість: $H_u = 74 - 102 \text{ кг/мм}^2$, що у 1,8 – 2,2 рази перевищує показники α -фази для зразків з 8 % Cu і у 3,4 – 3,6 рази з 16 % Cu. Магнітне поле впливає на її утворення при вмісті міді в сплавах більше 4 %. Найбільш відчутним цей вплив є при наявності 16 % Cu. При дії магнітного поля з індукцією 0,5 – 1,0 Тл кількісний вміст евтектики і її рівномірний розподіл за всім об'ємом створює гетерогенну структуру

Розмір дендритів α -твердого розчину міді в алюмінії сплавів системи Al – Cu та їх мікротвердість в залежності від концентрації міді та індукції постійного магнітного поля

Вміст міді в сплавах, % (мас. частка)	Індукція постійного магнітного поля, Тл	Середній розмір дендритів α -твердого розчину, мкм	Мікротвердість α -твердого розчину, кг/мм^2
2	0	750	17,3
	0,5	900	17,8
	1,0	1400	13,0
4	0	750	29,0
	0,5	2500	29,4
	1,0	3000	26,2
8	0	900	25,7
	0,5	1200	28,0
	1,0	1200	21,3
16	0	900	42,0
	0,5	900	45,0
	1,0	900	41,0

типу композиційного матеріалу, який складається з алюмінієвого твердого розчину і розподіленими в ньому включеннями евтектики $\alpha + \text{CuAl}_2$.

Таким чином, можна констатувати, що постійне магнітне поле з індукцією 0,1 – 1,0 Тл не змінює фазовий склад сплавів системи Al – Cu з вмістом міді від 2 до 16 % при їх повільному охолодженні та твердненні, але по-різному впливає на дисперсність дендритної структури. При збільшенні величини індукції і вмісті міді 8 – 16 %, застосування постійного магнітного поля при кристалізації розплавів сприяє зростанню кількості і рівномірності розподілу евтектики в структурі сплавів, що призводить до утворення матеріалу типу композиту.

Література

1. Ren Z.M., Li X., Ren W.L. // *Proced. 5th ERM'06, Sendai, Japan.* – 2006. – P. 369 – 374.
2. Моро Р., Ласкар О., Танака М. // *Магнитная гидродинамика.* – 1996. – № 2. – С.192 – 197.
3. Абрицка М.Ю., Витола В.Х., Каркльинь Я.Х. // *Магнитная гидродинамика.* – 1976. – № 3. – С. 119 –124.
4. Ambardaz K., Shirma D.R. // *Trans. Indian Inst. Met.* – 1987. – № 1. – P.22 – 26.
5. Utech U.P., Flemings M.C. // *Journal Applied Physics.* – 1966. – 5. – P. 2021 – 2024.
6. Vives C., Perry C. // *Int. Journal Heat and Mass Transfer.* – 1987. – 30. – P. 479 – 496.
7. Панкин Г.Н., Пономарев В.В., Есин В.О. // *Тез. докл. 12 совещ. по МГД.* –Рига, Саласпилс. – 1987. – 2. – С. 107 – 110.
8. Cahoon J.R., Chaturvedi M.C., Tandon K.N. // *Met. and Mater. Trans. A.* – 1998. – 29, За. – P.1101 – 1111.
9. Есин В.О., Панкин Г.Н., Тарабаев Л.П. // *Доклады АН СССР.* – 1972. – 205, 1. – С. 74 – 77.
10. Костылева Л.В., Габельченко Н.И., Ильинский В.А. // *Изв. вузов. Черн. металлургия.* – 2007. – 11. – С. 46 – 49.
11. Шатон Л.В., Терехов В.К., Панкович В.Н. // *Черметинформация, 1987.* – Деп. № 3918-4М87. – 5 с.
12. Мальцев М.В. *Металлография промышленных цветных металлов и сплавов.* – М.: Металлургия, 1970. – 364 с.
13. Гельфгат Ю.М., Лиелаусис О.А., Щербинин Э.В. *Жидкий металл под действием электромагнитных сил.* – Рига: Зинатне, 1975. – 248 с.

Одержано 03.03.09

В.И. Дубоделов, В.А. Середенко, С.С. Затуловский, А.В. Косинская Влияние постоянного магнитного поля на дендритную структуру сплавов системы Al-Cu при охлаждении расплава

Резюме

Установлены изменения дендритной структуры доэвтектических сплавов Al-Cu при варьировании содержания меди в условиях медленного охлаждения (1,3 °C/s) расплавов и отсутствия принудительной конвекции и определено влияние постоянного магнитного поля с индукцией до 1,0 Тл на формирование дендритной структуры.

V.I. Dubodelov, V.O. Seredenko, S.S. Zatulovskyy, A.V. Kosynska Influence of constant magnetic field on the dendritic structure of molten Al – Cu alloys at cooling

Summary

The changes of dendritic structure of hypoeutectic Al – Cu alloys are determined at varying copper content at slow cooling (1.3 °C/s) without forced convection, and influence of constant magnetic field with induction up to 1.0 Tl on dendritic structure formation is established.