

## Вплив зміни умов охолодження в інтервалі кристалізації на структуру сплаву АК7ч

В. М. Дука

А. Г. Борисов, кандидат фізико-математичних наук

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*Досліджено вплив режимів охолодження сплаву АК7ч на литу структуру. Встановлено, що процеси, відповідальні за утворення недендритних структур, відбуваються у вузькому інтервалі часу та температур, а швидкість зміни температури за його межами суттєво не впливає на морфологію первинної фази.*

Процесам недендритної кристалізації ливарних сплавів останнім часом приділяється значна увага [1 – 3], що викликано широким використанням технологій формування виливків з частково закристилізованих сплавів. Це пов'язано з можливостями підвищення ресурсу роботи ливарного обладнання та забезпечення високої якості готової продукції. В основі таких технологій лежить використання ефекту тиксотропності підготовленої металевої суспензії з заданою недендритною морфологією твердої фази [3, 4]. В літературі [5] відзначається, що основою процесів недендритного росту кристалів є множинне зародкоутворення або точніше підвищена кількість зародків кристалізації на початку процесу тверднення.

Авторами робіт [6 – 8] висувається гіпотеза, що найкращими умовами для формування недендритної (глобулярної) морфології первинної фази є двостадійність процесу охолодження, тобто швидке охолодження на першому етапі, яке повинно забезпечити масове зародкоутворення, та повільне охолодження ( $0,2 - 1,0$  °C/с [6]) на етапі росту кристалів, що повинно забезпечити досить низьку швидкість їх росту. Автори [7, 8] називають такий режим псевдоізотермічним.

З метою перевірки цієї гіпотези, а саме двостадійного охолодження при недендритній кристалізації, в даній роботі штучно створювались умови, що забезпечували різні швидкості охолодження в рідкому стані та при фазовому перетворенні. Також був проаналізований зв'язок між особливостями температурних кривих та характером мікроструктури.

Дослідження проведені на сплаві АК7ч (7,5 % Si, 0,29 % Mg, 0,12 % Fe, 0,028 % Mn, 0,005 % Cu, 0,0015 % Ti), який розплавляли в графіто-шамотному тиглі з перегрівом до температури  $710 \pm 5$  °C. Ліквідус сплаву ( $T_L$ ) дорівнював  $616 \pm 1$  °C.

Методика експериментів по дослідженню умов охолодження на структуру зразків зі сплаву АК7ч полягала у відборі проб металу масою  $30 \pm 4$  г в циліндричну графітну пробницю [9] з термопарою в тепловому центрі та наступного регламентованого охолодження. Охолодження перегрітого розплаву до температури  $T_L$  здійснювали за двома швидкостями:  $4,2 \pm 0,1$  °C/с (на повітрі) та  $32 \pm 2$  °C/с (у воді). Регулювання швидкості охолодження сплаву в інтервалі кристалізації здійснювали шляхом переміщення пробниці з металом (з води або повітря) в спеціальну підставку, форму або воду для здійснення охолодження зі швидкістю  $0,6 - 12,6$  °C/с.

## Плавлення і кристалізація

Для більшості експериментів від температури  $570 \pm 2$  °С проводили гартування сплаву у воді для кращої ідентифікації морфології первинних зерен  $\alpha$ -твердого розчину алюмінію на фоні високодиференційованих алюміній-кремнієвих евтектичних колоній, отриманих внаслідок прискороного охолодження ( $9 - 17$  °С/с). Швидкості охолодження розраховували на основі отриманих кривих охолодження проб металу.

Структуру зразків сплаву досліджували на шліфах, зроблених поперечних та поздовжніх розрізів. Застосовували травлення реактивом Келлера (0,5 мл HF, 2,5 мл HNO<sub>3</sub>, 1,5 мл HCl, 100 мл H<sub>2</sub>O). Тривалість травлення складала 5 – 10 с. Для виявлення макроструктури застосовували травлення реактивом Пултона (2 мл HF, 20 мл HNO<sub>3</sub>, 3 мл HCl, 175 мл H<sub>2</sub>O) шляхом занурення в підігрітій (~ 60 °С) розчин на 0,5 – 1,0 хв.

В результаті експериментів були отримані як дендритні, так і недендритні структури. Для якісного порівняльного аналізу типові термограми експериментів, в ході яких були отримані різні типи структури, наведені на рис. 1. Мікроструктури зразків наведені на рис. 2.

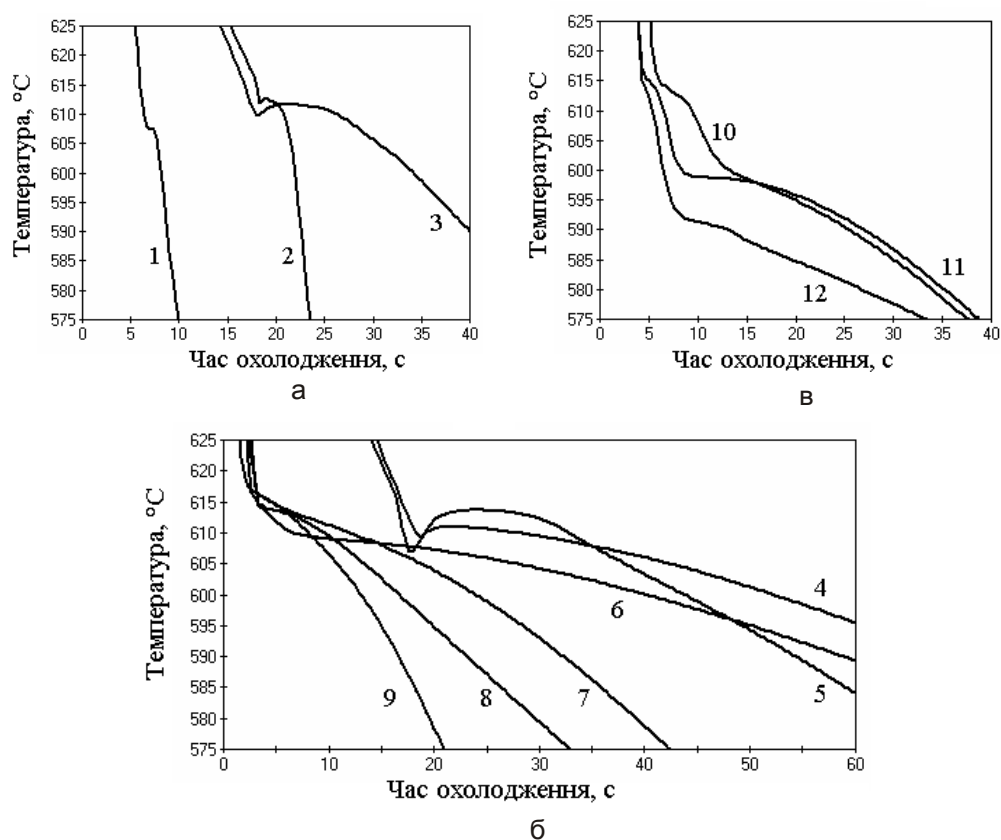


Рис. 1. Експериментальні криві охолодження сплаву АК7ч.

Дендритній морфології первинних кристалів  $\alpha$ -твердого розчину алюмінію відповідають два типи кривих охолодження. Перший тип кривих характерний для швидкісного охолодження проби розплаву у воді від температури 680 °С до початку та кінця кристалізації сплаву (крива 1, рис. 1 а). При такому охолодженні на кривій фіксується лише невелике уповільнення зниження температури на початку тверднення при температурах 606 – 609 °С (нижче  $T_L$  на 7 – 10 °С), що триває 1 – 2 с. Такі умови

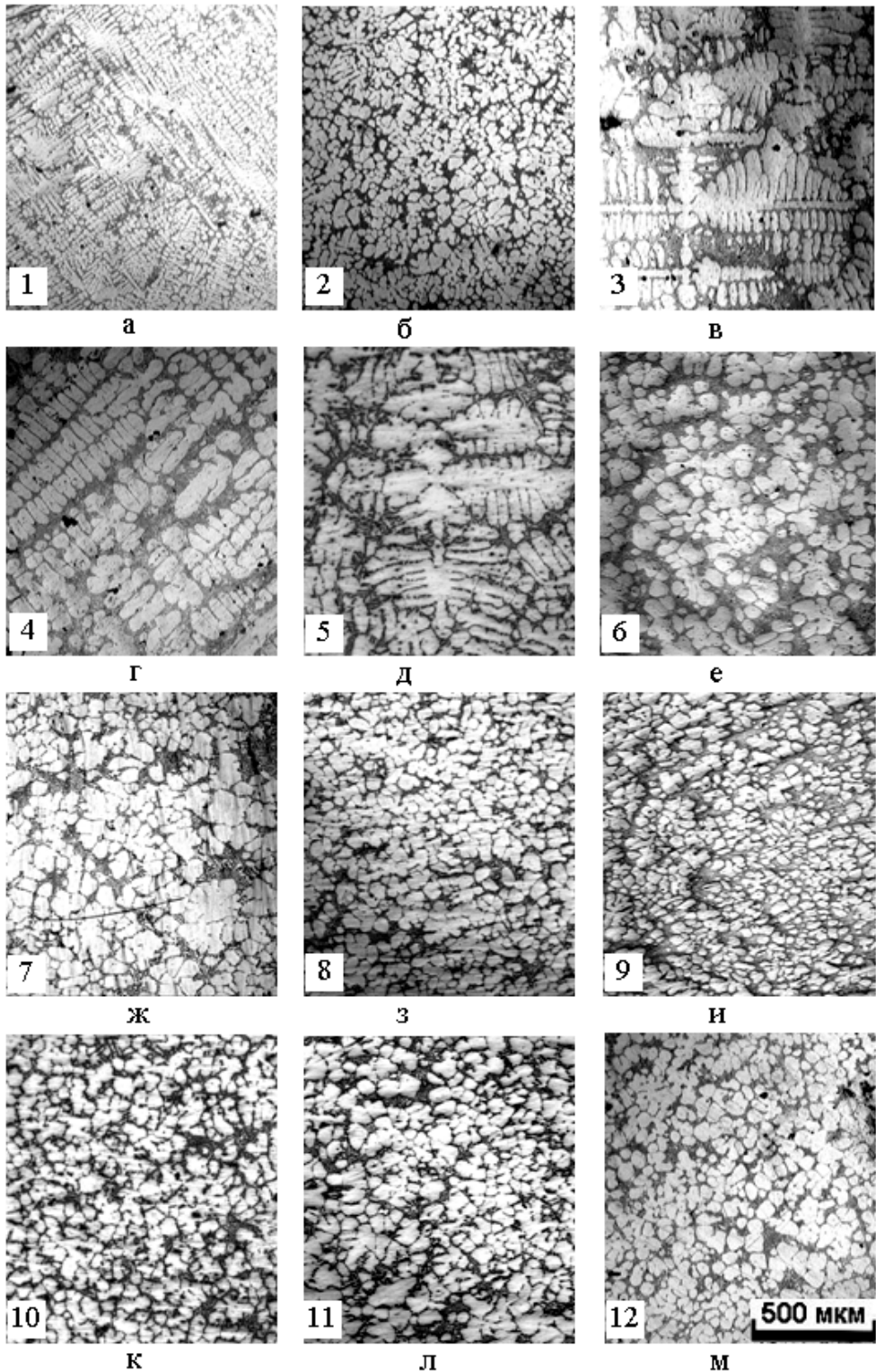


Рис 2. Мікроструктура зразків сплаву АК7ч (номер на зображенні структури відповідає наведеним на рис. 1 кривим охолодження).

оохолодження металу забезпечують утворення дендритних зерен  $\alpha$ -твердого розчину алюмінію розміром 3 – 4 мкм та дендритною коміркою 15 – 20 мкм (рис. 2 а).

Інший тип кривих характерний для оохолодження зі швидкістю 4,2 °С/с до початку твердіння та 0,7 – 1,7 °С/с в інтервалі кристалізації первинних кристалів  $\alpha$ -твердого розчину алюмінію. За таких умов оохолодження при температурах утворення первинних кристалів на кривій фіксується характерний мінімум при рекалесценсії на початку кристалізації (криві 3 – 5, рис. 1). При цьому суттєва зміна в зниженні температури розпочинається при 607 – 609 °С (нижче  $T_L$  на 7 – 9 °С) разом з рекалесценсією, яка триває 3 – 6 с і збільшує температуру на 2 – 4 °С, з наступним плавним зменшенням температури. Такі умови оохолодження забезпечують кристалізацію сплаву з типовою дендритною структурою з розмірами зерен 5 – 7 мкм та дендритною коміркою від 28 до 46 мкм (рис. 2 в – д).

Аналіз зразків з недендритною структурою та відповідних кривих оохолодження дозволяє виділити три типи кривих, що відповідають такій морфології структури.

Перший тип кривих реалізується за умов оохолодження проби з металом у воді від температури  $T_L$  до кінця кристалізації сплаву. За таких умов оохолодження на кривій також фіксується мінімум при рекалесценсії на початку кристалізації (крива 2, рис. 1 а). Однак рекалесценсія розпочинається при дещо вищій температурі, ~ 612 °С ( $T_L - 4$  °С), триває ~ 1 с і збільшує температуру тільки на 0,8 – 1,1 °С. За таких умов кристалізації формується дисперсна рівносна структура з морфологією вироджених дендритів чи розеткоподібних кристалів з розміром зерен 100 – 180 мкм та коміркою 18 – 25 мкм (рис. 2 б).

Другий тип кривих оохолодження, що характеризують отримані зразки з недендритною структурою, представлений кривими 6 – 9 на рис. 1 б. Для цих кривих характерним є відсутність рекалесценсії та суттєве уповільнення зниження температури на початку кристалізації сплаву в інтервалі температур 0 – 2 °С нижче  $T_L$ . Метал зразків, що оохолоджували таким чином, має дрібнодисперсну структуру різної морфології: 1 – вироджені дендрити та розетки (рис. 2 е, ж) з розміром зерен 310 – 420 мкм та дендритною коміркою 42 – 55 мкм; 2 – дрібні розетки та глобулярні кристали (рис. 2 з, и) з розміром зерен 90 – 150 мкм та дендритною коміркою 28 – 41 мкм. Також потрібно відзначити підвищену пористість зразків цієї серії, що спостерігається візуально після виявлення макроструктури.

Третій тип кривих оохолодження, що характеризують отримані зразки з недендритною структурою, представлений кривими 10 – 12 на рис. 1 в. Для цих кривих також є характерним відсутність рекалесценсії та суттєве уповільнення зниження температури на початку кристалізації сплаву в інтервалі температур 0 – 2 °С нижче  $T_L$ . Проте на відміну від другої групи вони мають інтервал прискореного оохолодження до температур на 15 – 20 °С нижче  $T_L$  з наступним уповільненням оохолодження. Метал зразків, що оохолоджували таким чином, має дрібнодисперсну структуру з морфологією дрібних розеток та глобулів з розміром зерен 80 – 140 мкм та коміркою 30 – 49 мкм (рис. 2 к – м). Аналогічно до попередньої групи в зразках також спостерігається підвищена пористість.

Слід підкреслити, що на рис. 2 можна побачити достатньо цікавий результат – практично однаковій глобулярній (рис. 2 з, л, м) та розетковій (рис. 2 б, и) структурі відповідають різні температурні криві. В той же час існує певна подібність всіх кривих оохолодження, що характеризують зразки з недендритною структурою, а саме суттєве уповільнення зниження температури на початку кристалізації сплаву в інтервалі температур 0 – 4 °С нижче  $T_L$  на відміну від кривих, що характеризують зразки з дендритною структурою, де суттєве уповільнення розпочинається в інтервалі температур 7 – 10 °С нижче  $T_L$ . Тобто ефект тепловиділення від зростаючих кристалів при

недендритній кристалізації відбувається на  $3 - 7$  °С раніше, що може свідчити саме про множинне зародкоутворення та зростання великої кількості первинних кристалів  $\alpha$ -твердого розчину алюмінію.

Узагальнюючи отримані експериментальні результати можемо зробити наступні висновки:

Стадія швидкого охолодження на початку фазового перетворення (зародження кристалів) є необхідною, але недостатньою умовою для формування недендритної структури.

Швидкість охолодження на стадії росту кристалів не є критичним параметром, що визначає тип результуючої структури.

Процеси, відповідальні за реалізацію недендритної структури, відбуваються у вузькому температурному (до  $4$  °С нижче  $T_L$ ) та часовому (до  $6$  с) інтервалі.

## Література

1. Fan Z. Semisolid Metal processing // International Materials Reviews. – 2002. – 47, No. 2. – P. 1 – 37.
2. Hallstedt B., Balitchev E., Shimahara H. Semi-solid processing of alloys: principles, thermodynamic selection criteria, applicability // ISIJ International. – 2006. – 46, No. 12. – P.1852 – 1857.
3. Олейник Л. Обзор методов производства тиксотропных материалов // Технология легких сплавов. – 2001. – № 3. – С. 22 – 29.
4. Капранос П. Тиксоформинг: от автомобилестроения к авиастроению // Литейн. пр-во. – 2007. – № 4. – С. 27 – 32.
5. Эскин Г.И. Ультразвуковые методы формирования предельно измельченной недендритной структуры в слитках и отливках из алюминиевых сплавов (доклад) // 1-я Международная конференция и выставка «Литье алюминия». – Москва, 27 – 29 марта 2007 г.
6. Kaufmann H., Fragner W., Uggowitzer P. Influence of variations in alloy composition on castability and process stability. Part 2: Semi-solid casting processes // International Journal of Cast Metals Research. – 2005. – 18, No. 5. – P. 279 – 285.
7. Browne D.J., Hussey M.J., Carr A.J. Direct thermal method: new process for development of globular alloy microstructure // International Journal of Cast Metals Research. – 2003. – 16, No. 4. – P. 418 – 426.
8. Carr A. J., Browne D. J., Hussey M. J. Modelling and experimental development of the direct thermal method of rheocasting // International Journal of Cast Metals Research. – 2007. – 20, No. 6. – P. 325 – 332.
9. Смутьский А.А. Определение свойств и управление качеством литейных алюминиево-кремниевых сплавов. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук / КПИ. – Киев, 1982. – 17 с.

Одержано 12.11.10

**В. М. Дука, А. Г. Борисов**

### **Влияние смены условий охлаждения в интервале кристаллизации на структуру сплава АК7ч**

#### **Резюме**

Исследовано влияние режимов охлаждения сплава АК7ч на литую структуру. Установлено, что процессы, которые отвечают за образование недендритных структур, происходят в узком интервале времени и температуры, а скорость изменения температуры за его границами существенно не влияет на морфологию первичной фазы.

V. M. Duka, A. G. Borisov

**Influence of changing conditions of cooling in crystallization range  
on the structure of AK7ч alloy**

**Summary**

Influence of cooling regimes of AK7ч alloy samples on cast structure was investigated. It was found that processes regulating formation of not-dendritic structures occur in narrow interval of time and temperature and cooling rate out of this interval have no substantial influence on the morphology of primary phase.

УДК 621.74: 669.714

*Вплив титану на схильність до утворення  
гарячих тріщин та структуру сплавів Al-Cu5*

В. П. Гаврилук, член-кореспондент НАН України

В. В. Ласковець

К. Ю. Гзовський, кандидат технічних наук

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*За допомогою зіркоподібної форми для визначення схильності сплавів до утворення гарячих тріщин та мікроскопічного аналізу досліджено вплив титану на схильність до утворення гарячих тріщин та формування структури сплаву Al – Cu5. На основі кластерної теорії розглянуто механізм впливу хімічного складу на процеси структуроутворення.*

Високоміцні алюмінієві сплави є одним із найбільш перспективних видів матеріалів для авіакосмічної техніки, машинобудування та медицини. Це пов'язано, насамперед, з їх високою питомою міцністю, яка перевищує питому міцність сталей. Однак, разом із перевагами, існуючі алюмінієві сплави мають й недоліки. Так силуміни, маючи високі технологічні властивості, не відзначаються високим рівнем міцності. Високоміцні сплави, навпаки, при високому рівні міцності мають низькі ливарні властивості. Отже, підвищення рівня технологічних властивостей алюмінієвих сплавів та встановлення механізму їх структуроутворення є актуальною науковою проблемою.

Однією з найбільш перспективних груп високоміцних ливарних алюмінієвих сплавів є сплави на основі системи Al – Cu – Ti, вони відрізняються високою міцністю в поєднанні з пластичністю та теплостійкістю.

В [1] було встановлено, що застосування лігатури AlTi5B1 та титану для подрібнення зерна в сплаві AlCu4Ti не призводить до зниження кількості гарячих тріщин при литті в металеві форми. Підвищення вмісту титану від 0,01 до 0,18 % (тут і далі мас. частка) призводить до збільшення розмірів зерна від 93 мкм до 158 мкм. Однак, при литті сплаву в форми з піщано-глинистих сумішей збільшення вмісту