

Розеткова та дендритна морфологія первинної фази при литті алюмінієвого сплаву в металевий кокіль

А. Г. Борисов, кандидат фізико-математичних наук

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Проведено дослідження структури виливків сплаву АК7ч, отриманих в широкому інтервалі температурних умов заливки. Встановлено, що дендритна та недендритна морфології структури формуються при однакових значеннях макроскопічної швидкості охолодження. Залежність розеткового параметра від цієї швидкості подібна до залежності дендритного параметра.

Останнім часом в ливарному виробництві алюмінієвих сплавів відбувається поступовий перехід від заливання ливарних форм перегрітим алюмінієвим розплавом до лиття сплаву в рідко-твердому стані [1 – 2]. Головною ідеєю технологій лиття частково закристалізованих сплавів є транспортування у порожнину форми разом з розплавом певної кількості твердої фази, морфологія якої значним чином впливає як на процеси заповнення форми, так і подальшого твердіння. При цьому відзначається, що найбільш перспективним в практичному плані є використання рідко-твердої суміші, де кристалічна фаза має недендритну, розеткову та/або глобулярну морфологію [1], яка формується за певних умов.

Переважаюча більшість методів отримання недендритної морфології, які розвиваються протягом вже 30 років, базується на перемішуванні розплаву в частково закристалізованому стані [3], що вимагає спеціального обладнання як для перемішування, так і температурної стабілізації. Однак останнім часом з'явилися публікації, в яких повідомляється про можливість отримання такої морфології без перемішування шляхом безпосередньої заливки розплаву до металевих кокілів [4]. Зрозуміло, що принципово такий підхід є найбільш вигідним з економічної точки зору. Проте систематичного дослідження таких процесів не було проведено, таким чином однією з цілей даної роботи було проведення досліджень в широкому інтервалі зміни ливарних параметрів для встановлення області їх значень, в якій формується недендритна структура.

Стосовно широкого практичного використання такого методу було б бажаним замість "області значень" кількох технологічних параметрів отримати один "універсальний" критерій формування недендритної структури. Наприклад, виходячи з того, що швидкість охолодження суттєво впливає на литу структуру сплавів, зокрема на розмір зерна та величину дендритного параметра [5], доцільно припустити, що і для реалізації розеткової або глобулярної структури вона може бути визначальним фактором. Таким чином другою метою роботи було вивчення зв'язку особливостей морфології структури, що формується, зі швидкістю охолодження сплаву при кристалізації.

З огляду на широке промислове використання (диски коліс, блоки автодвигунів, тощо) в якості об'єкту дослідження використано сплав АК7ч складу: Al – основа,

Плавлення і кристалізація

7,5 % Si, 0,29 % Mg, 0,12 % Fe, 0,028 % Mn, 0,005 % Cu, 0,0015 % Ti (аналог за світовою класифікацією – сплав A356), який контролювався спектральним аналізом. Температура ліквідус для кожної серії експериментів визначалась незалежно за методом термічного аналізу [6] і для усіх експериментів складала 616 ± 1 °C.

Сплав плавили в печі САТ-05 в графіто-шамотному тиглі. Температуру розплаву контролювали вимірювачем-регулятором температури з точністю ± 3 °C. Паралельно у муфельній печі із заданою температурою (точність підтримування ± 5 °C) розміщували сталевий кокіль. Після досягнення температури заливки розплав витримували 20 хвилин, після цього кокіль виймали з печі та здійснювали його заливку. Криві охолодження фіксували за методикою, описаною в [6].

Структуру виливків досліджували на шліфах, зроблених на повздовжніх розрізах зразків. Шліфи були протравлені реактивом Келлера (0,5 мл HF, 2,5 мл HNO₃, 1,5 мл HCl, 100 мл H₂O).

При аналізі мікроструктур визначали відстань між боковими гілками дендритів та відстань між "пелюстками" розеток α -твердого розчину алюмінію, при цьому здійснювали усереднення по всій площі шліфа, а потім – по всім зразкам з даними умовами заливки (не менше двох зразків).

Експерименти, проведені при заливці сплаву в циліндричні сталеві кокілі з товщиною стінки 2, 4, 6 та 10 мм. Температури заливки для кожного з кокілів становили 620, 630, 660, 750, 850 та 950 °C, а температури кокілів 20, 220, 400, та 580 °C. Загалом проведено 96 експериментів.

Отримані мікроструктури були класифіковані як дендритні та недендритні. Побудовано загальну таблицю умов заливки та структур, що їм відповідали. Встановлено, що існують три області умов, яким відповідають "чисто недендритна" морфологія структури, "чисто дендритна" та змішана. В наведеній у статті таблиці показано лише частину загальної таблиці, що охоплює область умов, при яких відбувається "перехід" від недендритної до дендритної структури, які позначені відповідно "н" та "Д".

Морфологія структури виливків в залежності від умов заливки

Температура заливки, °C	Температура кокілю, °C	Товщина стінки кокілю, мм			
		2	4	6	10
620	20	н	н	н	н
620	220	н	н	н	н
620	400	н	н	Д	Д
620	580	н	Д	н	н
630	20	н	н	н	н
630	220	н	н	н	н
630	400	н	н	н	Д
630	580	н	Д	Д	Д
660	20	н	Д	Д	Д
660	220	Д	Д	Д	Д
660	400	н	Д	Д	Д
660	580	Д	Д	Д	Д
750	20	Д	Д	Д	Д
.....
950	580	Д	Д	Д	Д

Примітка: Д - дендритна структура, н - недендритна структура.

Умовні температури «переходу» (від дендритної до недендритної морфології) в залежності від температури кокілю для різної товщини його стінок показані на рис. 1. Значення цих температур визначені як середнє значення інтервалу «переходу». Так, наприклад, якщо розглянути точку, позначену стрілкою (\leftarrow), для товщини кокілю 2 мм та температури кокілю 400 °С при заливці від 750 °С (верхня межа інтервалу «переходу») реалізувалася дендритна структура, а при заливці від 660 °С (нижня межа інтервалу «переходу») – недендритна структура.

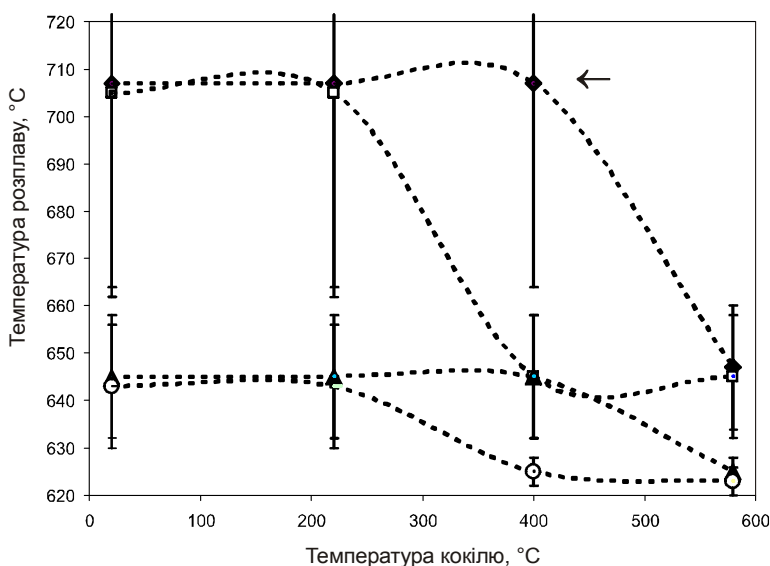


Рис. 1. Перехід від дендритної до недендритної структури сплаву залежно від температурних умов кристалізації. Товщина стінок кокілю (мм): \blacklozenge – 2, \square – 4, \blacktriangle – 6, \circ – 10.

Згідно отриманим нами даним «перехід» від дендритної до недендритної морфології здійснюється не стрибком, а через певне «виродження» дендритів, тому принципово не можливо вказати якусь точну температуру «переходу», але для наочності середнє арифметичне інтервалу «переходу» умовно позначено точкою, і ці точки для однієї товщини стінок кокілю з'єднані пунктиром. Як видно з малюнку, «температура переходу» при інших незмінних параметрах збільшується зі зменшення товщини стінок кокілю.

Як свідчать дані таблиці та рис. 1, найбільш сприятливими умовами для формування недендритної структури були мінімальна температура заливки, мінімальна температура та товщина стінки кокілю.

Макроскопічну швидкість охолодження визначали традиційно як $V = (T_L - T_E) / (t_L - t_E)$, де T_L та T_E відповідно температури ліквідусу та евтектики, а t_L та t_E – моменти часу досягнення цих температур.

Відзначимо, що дендритні та недендритні структури спостерігалися практично в одному інтервалі швидкостей охолодження – 0,5 – 18 °С/с та 1,5 – 21 °С/с відповідно (рис. 2). Виходячи з цього, можливо зробити висновок, що швидкість охолодження не є критичним параметром, що визначає, який саме характер буде мати кінцева структура – дендритний чи недендритний, а отже існують інші визначальні фактори.

Як видно з рис. 2, збільшення швидкості охолодження призводить до загальновідомого зменшення дендритного параметра. Традиційно залежність дендритного параметра d від швидкості охолодження описується відомими емпіричними залежностями [5] типу:

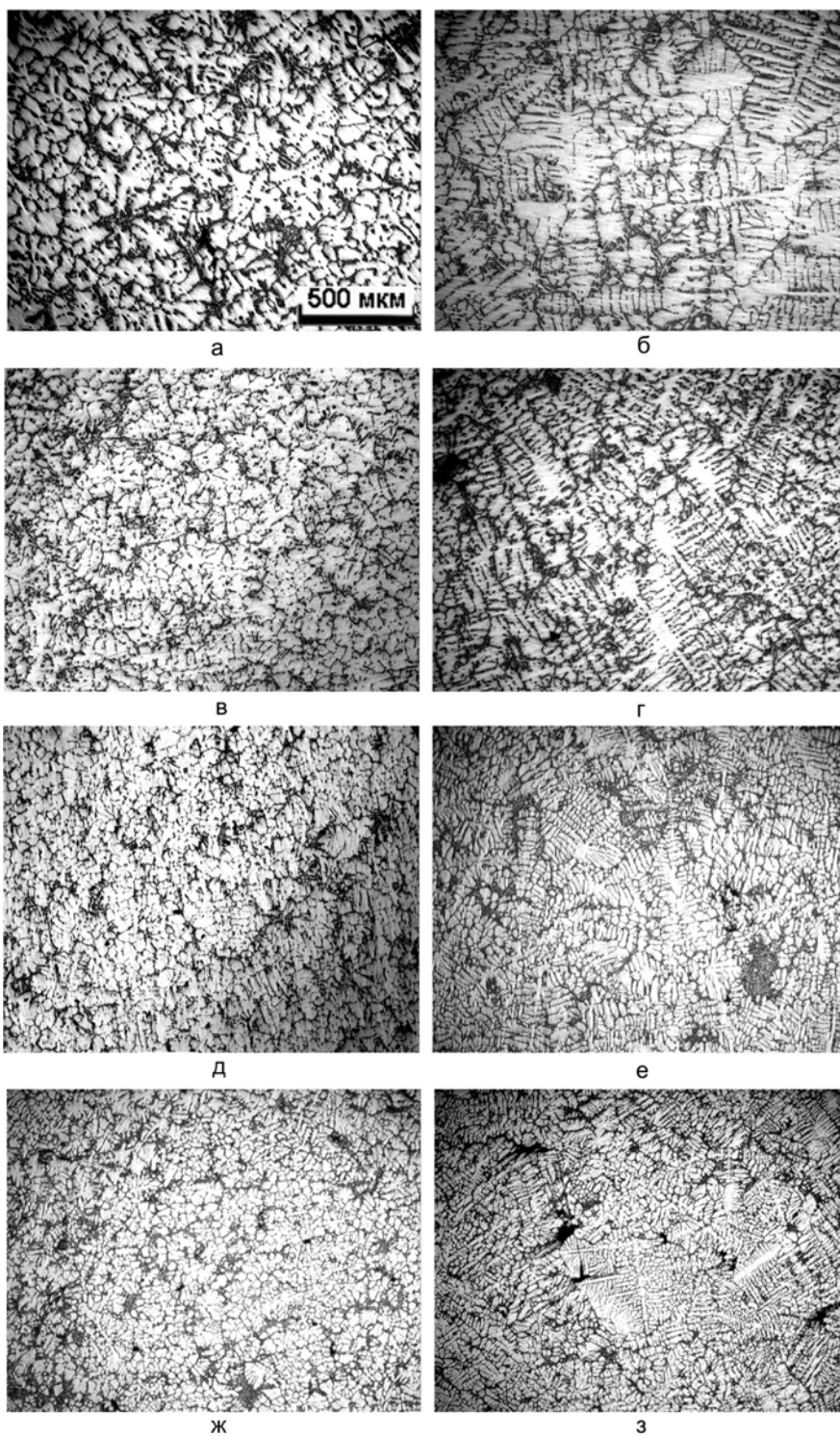


Рис. 2. Недендритні (а, в, д, ж) та дендритні (б, г, е, з) структури, що утворюються при різних швидкостях охолодження розплаву. а – $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, б – $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, в – $2,8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, г – $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, д – $10,1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, е – $11,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, ж – $18,2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, з – $17,8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

$$d = AV^{-n} \quad \text{або} \quad \lg d = \lg A + n \lg V, \quad (1)$$

де A – коефіцієнт, що визначається за експериментальними даними.

Отримані нами дендритні структури у вказаному вище форматі описуються залежністю:

$$d = 36V^{-0,3} \quad \text{або} \quad \lg d = 1,5 - 0,3 \lg V. \quad (2)$$

Що стосується розеткових структур, то для того, щоб їх охарактеризувати було введено «розетковий параметр» d^* (рис. 3), який являє собою відстань між суміжними «пелюстками» в розетці. З формальної точки зору, якщо розрізати контур розетки (рис. 3 а) та розвести його кінці (рис. 3 б), ми отримаємо картину, схожу з боковими гілками дендриту (рис. 3 в), які також є певними збуреннями на поверхні кристалу, що росте. Аналогічно дендритному параметру, залежність розеткового параметра від швидкості охолодження проаналізована у форматі рівнянь (1). Встановлено, що експериментальні дані для розеток можливо описати в цьому форматі і отримати наступні залежності:

$$d^* = 48V^{-0,26} \quad \text{або} \quad \lg d^* = 1,67 - 0,26 \lg V. \quad (3)$$

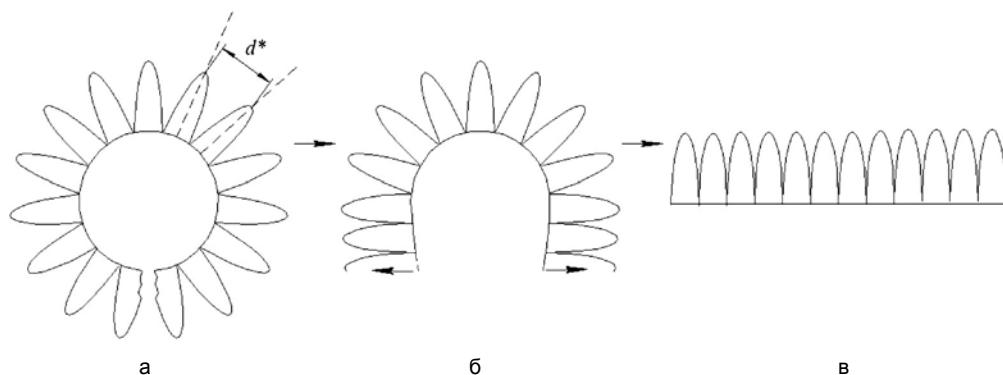


Рис. 3. Схема, що ілюструє сутність розеткового параметра.

На рис. 4 наведені дані по дендритним (рис. 4 а) та розетковим (рис. 4 б) структурам у логарифмічних координатах. Як видно з рис. 4 в, відповідні криві майже співпадають. Така схожа поведінка може бути свідченням того, що дендритні та розеткові структури мають схожу (але до кінця незрозумілу) природу походження.

Висновки Найбільш сприятливими умовами для формування структури недендритної морфології в наших експериментальних умовах були мінімальна температура заливки, мінімальна температура та товщина стінки кокілю. Швидкість охолодження не є критичним параметром, що визначає, який саме характер буде мати кінцева лита структура – дендритний чи недендритний, а отже існують інші визначальні фактори. Залежність розеткового параметра від швидкості охолодження має схожу поведінку як і для дендритного параметра, при цьому відповідні криві майже співпадають. Це можна трактувати як свідчення того, що формування дендритних і недендритних структур має схожу природу.

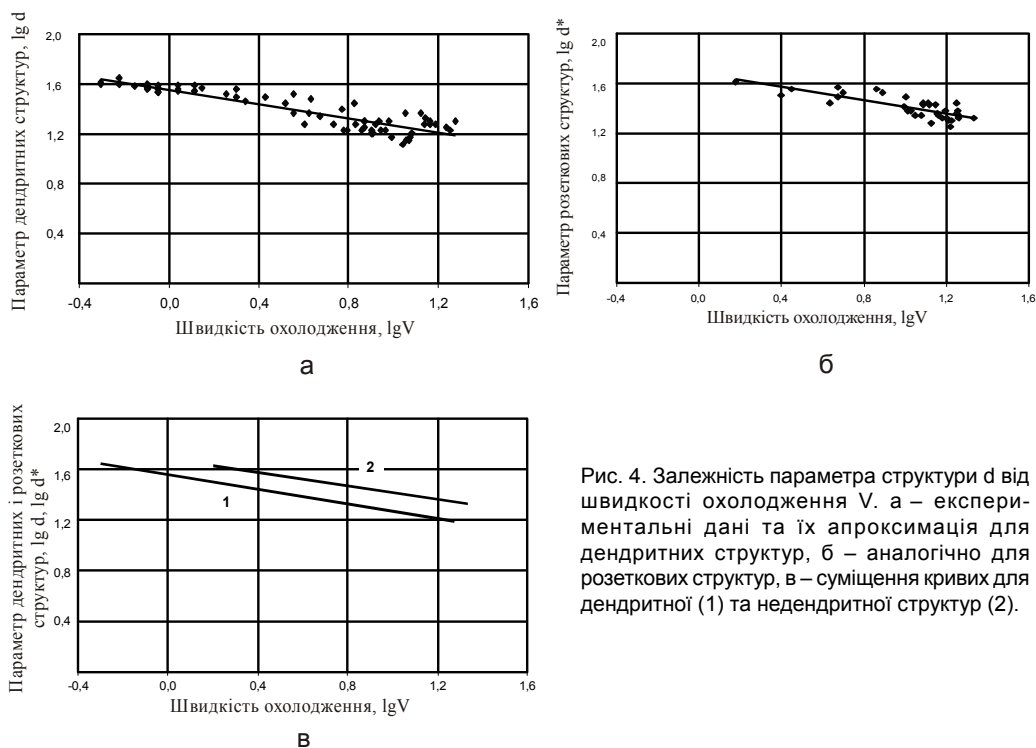


Рис. 4. Залежність параметра структури d від швидкості охолодження V . а – експериментальні дані та їх апроксимація для дендритних структур, б – аналогічно для розеткових структур, в – суміщення кривих для дендритної (1) та недендритної структур (2).

Література

1. Flemings M.C. Semisolid forming – the process and the path forward // Metallurgical Science and Technology. – 2000. – 18, No 2. – P. 3 – 4.
2. Kirkwood D.H. Semisolid metal processing // International Materials Reviews. – 1994. – 39, No 5. – P. 173 – 189.
3. Fan Z. Semisolid metal processing // International Materials Reviews. – 2002. – 47, No 2. – P. 49 – 85.
4. 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.
5. Золотаревский В.С. Структура и прочность литых алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1981. – С. 192.
6. Смутьский А.А., Семенченко А.И., Елов С.М. Термический анализ алюминиевых сплавов // Процессы литья. – 2002. – № 1. – С. 10 – 16.

Одержано 22.10.10

А. Г. Борисов

Розеточная и дендритная морфология первичной фазы при литье алюминиевого сплава в металлический кокиль

Резюме

Проведено исследование структуры отливок сплава АК7ч, полученных в широком интервале температурных условий заливки. Установлено, что дендритная и недендритная структуры формируются при одинаковых значениях макроскопической скорости охлаждения. Зависимость розеточного параметра от этой скорости подобна зависимости дендритного параметра.

Rosette-like and dendrite morphology of primary phase at casting aluminium based alloy in metal mould

Summary

Structure of the AK7ch alloy castings, formed under various conditions of casting was studied. It was found that dendrite and non-dendrite morphology was observed for similar rates of cooling. Dependence of rosette parameter on cooling rate is similar to it for dendrite parameter.

УДК 621.745.435:62-932.2

Оцінка розмірів тугоплавких часток, що вводяться у розплав, здатних ставати центрами кристалізації

А. І. Троцан, доктор технічних наук, професор
В. В. Каверинський, І. Л. Бродецький

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

Запропонована методика, що дозволяє розрахувати початкову оптимальну величину дисперсних часток, їх масу і температуру введення, необхідні для їх розчинення до розмірів центрів кристалізації на момент її початку в умовах безперервного охолодження розплаву з урахуванням зміни концентрації речовини, яка розчиняється.

Дисперсні частки, що вводяться в розплав перед початком кристалізації, дозволяють покращувати структуру литого металу [1]. Найбільш ефективними підкладками є при цьому нанопорошки тугоплавких важкорозчинних сполук, частки яких мають розмір десятки нанометрів [2]. Проте нанорозмірні ультрадисперсні порошки (УДП) коштують дорого, технологія їх зберігання і введення в розплав складна, що перешкоджає їх широкому використанню. Технологічність та ефективність модифікування розплаву інокуляторами можна підвищити, вводячи відносно великі частки, які, розчиняючись до нанорозмірів (розмірів центрів кристалізації) до моменту початку твердіння, стали б додатковими зародками кристалітів, що утворюються. Метод визначення оптимальних параметрів введення подібних УДП розглянуто в даній роботі.

У роботі [3] наводиться модель, що дозволяє визначити час повного розчинення в сталі карбиду кремнію в ізотермічних умовах. Дана модель може бути узагальнена і перетворена для випадку неповного розчинення шляхом зміни меж інтегрування (від r_0 до r_k замість від r_0 до 0). В цьому випадку вона набуде вигляду:

$$\tau = \frac{A \cdot \rho \cdot (r_0^2 - r_k^2)}{2 \cdot M \cdot D \cdot (C_{max} - C_0)}, \quad (1)$$

де τ – час розчинення частинки від розміру r_0 до r_k , с, A – атомна маса одного з компонентів сполуки (для розрахунків беремо елемент з великим атомним радіусом),