

Формування евтектики в системі $Al - Mg - Si$

О. І. Трудоношин

Національний технічний університет України «КПІ», Київ

Встановлено, що евтектика $Al - Mg_2Si$ в доевтектичних $Al - Mg - Si$ сплавах зароджується на первинних кристалах та має спіральну морфологію. Обґрунтовано можливість епітаксіального росту спіральної евтектики на первинних кристалах та представлено об'ємну модель її утворення.

Причиною широкого використання евтектичних сплавів є поєднання хороших ливарних властивостей, відносно низької температури плавлення, і високих механічних властивостей, пов'язаних з композиційною структурою.

Евтектики в сплавах бувають двох типів.

Евтектика «метал-метал» («неогранована-неогранована»). Загалом, сплави цього типу мають регулярну евтектику. Фази, що утворюють евтектику, є неперервними в межах одного евтектичного зерна. Класичним прикладом є пластинчаста евтектика в $Al - Cu$ сплавах.

Евтектика «метал-неметал» («неогранована-огранована»). У неметалів внаслідок більш високої ентропії плавлення, швидкість росту кристалів при однаковому переохолодженні значно нижча, ніж у металів. Це призводить до утворення в цих системах нерегулярної евтектики. Фази нерегулярної евтектики ростуть окремо (одна фаза росте окремими частинками в матриці) і безперервність не спостерігається в жодному напрямку. Класичним прикладом є евтектика системи $Al - Si$ (рис. 1 а).

Евтектичні кристали – окремий випадок евтектики типу «метал-неметал» можуть мати регулярну та нерегулярну «спіральну морфологію».

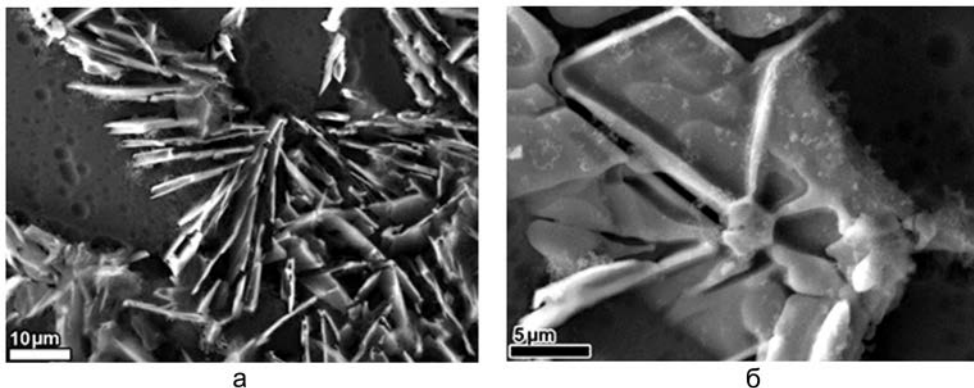


Рис. 1. Мікроструктура сплаву АК7.

Фазові перетворення

Згідно існуючих літературних даних евтектику спіральної морфології можуть мати сплави систем Al – ThAl₃ [1], Zn – Zn₂Mg [2], Al – Mg₂Si [3] та ін. [4].

Для дослідження особливостей формування евтектики вибрані ливарні доевтектичні сплави систем Al – Si та Al – Mg – Si (таблиця).

Номінальний склад сплавів

Сплав	Хімічний елемент, % по масі (алюміній – залишок)			
	Mg	Si	Mn	Fe
G (AMг6K3)	6,0	3,0	0,01	0,3
AK7	0,3	7,0	0,02	0,2

Сплави виплавляли в печі опору в графітовому тиглі (маса плавки 0,25 кг). В якості вихідних матеріалів використовували алюміній високої чистоти (99,997), лігатури AlSi25, AlMg50. Перед розливанням метал продували аргоном протягом 10 хв. Після продувки з поверхні розплаву видаляли шлак і рідкий метал заливали в кокіль.

Дослідження структури проводили на литих зразках. Глибоке травлення проводили з використанням стандартної методики в 15 % водному розчині NaOH.

На рис. 2 представлено переважну морфологію евтектики в доевтектичних сплавах Al – Mg – Si. Видно, що зародження евтектичних

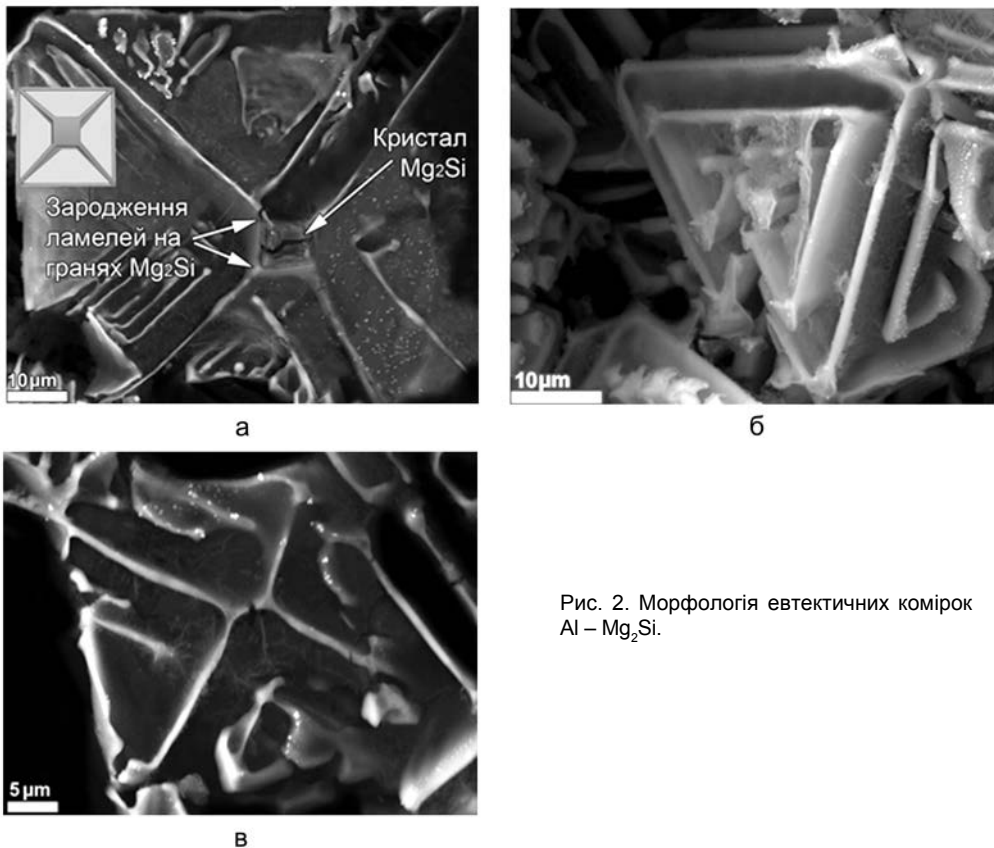


Рис. 2. Морфологія евтектичних комірок Al – Mg₂Si.

ламелей відбувається на ребрах первинних кристалів, а подальший ріст можна охарактеризувати як утворення «евтектичного кристалу».

В даній роботі пропонується «евтектичними кристалами» називати такі евтектичні комірки, структурні елементи (ламелі) яких мають кристалографічне орієнтування, подібне до «скелетних кристалів». Згідно з результатами досліджень, ці структурні елементи найчастіше утворюють спіральну морфологію. Однак, вони можуть орієнтуватись в різних напрямках або зростатись, в результаті чого на шліфах вони будуть мати нерегулярну морфологію типу «китайських ієрогліфів».

Мінкоф [3] вперше помітив утворення «спіральної евтектики» в системі Al – Mg – Si, але в заевтектичних сплавах (рис. 3 а, б). Ним було припущено, що ріст евтектичних спіралей аналогічний механізму росту «скелетних» кристалів, описаного Амелінксом [5]. В свою чергу, ріст «скелетних» кристалів пов'язаний з рухом гвинтової дислокації по периферії кристала. За цією моделлю при стабільності граней кристала, що зростає, та нестабільності ребер, кристалу буде притаманний «евтектичний» ріст фази, та утворення спіральної морфології. Однак уявлення Мінкофа, щодо росту спіралей, були неповними – не було враховано зародження лемелей саме на первинних кристалах, а отже і епітаксіальний характер росту евтектики.

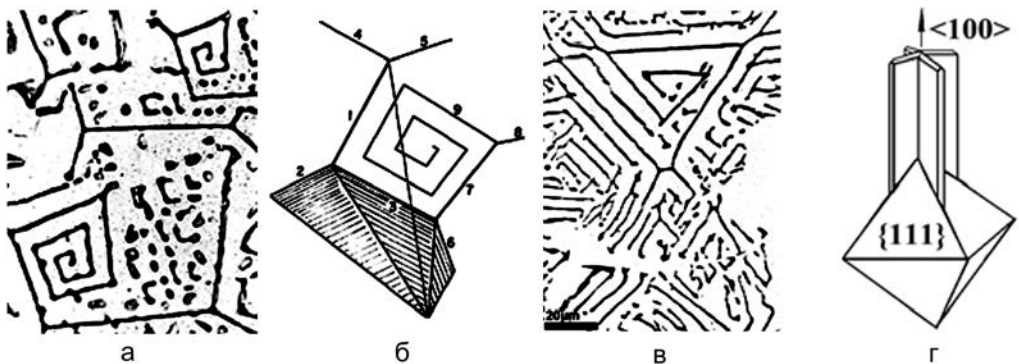


Рис. 3. Ріст евтектики спіральної морфології в сплавах системи Al – Mg – Si. а – структура заевтектичного сплаву Al – 10Mg – 10Si [3], б – схема росту чотирикутної спіральної евтектики [3], в – структура доевтектичного сплаву Al – 6Mg – 3Si, г – схема зародження трикутної евтектики на октаедричному кристалі.

Первинні кристали Mg_2Si в системі Al – Mg – Si [6, 7] утворюються кубічної, октаедричної форми та форми їх проміжних ланок, в залежності від кількості фази Mg_2Si в сплаві.

Як повідомлялось в роботі [7] в доевтектичних Al – Mg – Si сплавах рівноважними є первинні кристали-октаедри. Однак при підвищенні кількості Mg_2Si в об'ємі рівноважна морфологія кристалів змінюється. Це стає причиною формування в системі спіралей різної форми (рис. 3).

Вершини і ребра первинного кристала є зонами прискореного тепловиділення, що і створює сприятливі умови для генерування на них

евтектичних ламелей Mg_2Si (рис. 2, рис. 4). Як видно з рис. 3 г в дослідних сплавах спіралі мають трикутну форму та повторюють морфологію октаедра, що відповідає епітаксіальному росту.

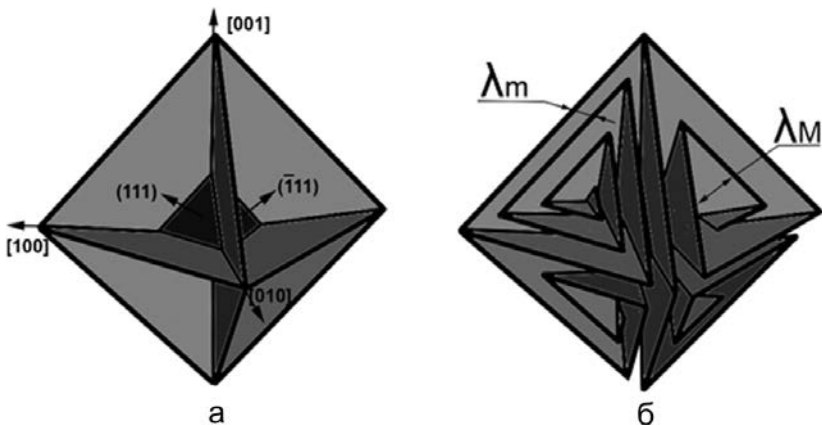


Рис. 4. Візуалізація процесу зародження евтектики Al – Mg_2Si на первинному кристалі-октаедрі.

У випадку заевтектичних сплавів [3] спіралі мають чотирикутну форму, що також відповідає епітаксіальному росту, але на первинних кристалах кубічної форми (які переважають в заевтектичних сплавах).

Можливість епітаксіального росту евтектики на первинному кристалі було також підтверджено нами на системі Al – Si.

Виходячи з того, що евтектичні фази в сплавах системи Al – Si ростуть незалежно одна від одної (гранований кремній росте в негранованій матриці алюмінію), то при стандартних умовах охолодження (лиття в піщану форму або кокіль) сплави мають нерегулярну евтектику (рис. 1 а). З рис. 1 а видно, що евтектичні пластини кремнію можуть розгалужуватись або зростатись.

Однак, при застосуванні низьких швидкостей охолодження кремній отримує додатковий час для формування первинних кристалів [8] та утворення евтектики з регулярною морфологією. На рис. 1 б видно, що характер росту евтектичних ламелей кремнію, які зароджуються на первинних кристалах, має також епітаксіальний характер.

Таким чином встановлено, що в сплавах системи Al – Mg – Si евтектика Al – Mg_2Si належить до спірального типу. Форма спіралей в евтектиці Al – Mg_2Si залежить від первинних кристалів Mg_2Si , на яких вона зароджується, а отже від кількості фази Mg_2Si в сплаві.

Глибоке травління сплаву показало формування евтектики у вигляді «евтектичного кристала» октаедричної форми. Це підтверджує модель епітаксіального росту евтектики на первинних кристалах.

Можливість епітаксіального росту евтектики на первинних кристалах підтверджено результатами досліджень структури сплаву АК7 при застосуванні повільного охолодження сплаву.

Література

1. Chadwick G. A., Eutectic Alloy Solidification. – Pergamon Press, 1963. – 86 p.
2. Fullman R. L., Wood D. L. Origin of spiral eutectic structures // *Acta Metallurgica*. – 1954. – 2. – P. 188 – 193.
3. Minkoff I., Lux B. Instability criteria for growth of a hopper crystal related to spiral eutectic morphology // *Journal of Crystal Growth*. – 1974. – 22. – P. 163 – 165.
4. Croker M. N., Fidler R. S., Smith R. W. The Characterization of Eutectic Structures // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. – 1973. – 335. – P. 15 – 37.
5. Amelinckx S. A dislocation mechanism for the growth of hopper crystal faces and the growth of salol crystals from solution and from the melt // *Philosophical Magazine and Journal of Science* – 1953. – 44(350). – P. 337 – 339.
6. Li S.-P., Zhao S.-X., Pany M.-X. Eutectic reaction and microstructural characteristics of Al (Li) – Mg₂Si alloys // *Journal of Materials Science*. – 2001. – 36. – P. 1569 – 1575.
7. Трудоношин А.И., Михаленков К.В. Морфология и свойства первичных кристаллов Mg₂Si в сплавах системы Al – Mg – Si // *Процессы литья*. – 2014. – № 5 (107). – С. 38 – 47.
8. Gunduz M., Kaya H., Cadirli E. Interflake spacings and undercoolings in Al – Si irregular eutectic alloy // *Materials Science and Engineering*. – 2004. – A369. – P. 15 – 29.

Одержано 14.05.15

А. И. Трудоношин

Формирование эвтектики в системе Al – Mg – Si

Резюме

Установлено, что эвтектика Al – Mg₂Si в доэвтектических Al – Mg – Si сплавах зарождается на первичных кристаллах и имеет спиральную морфологию. Обоснована возможность эпитаксиального роста спиральной эвтектики на первичных кристаллах и представлена объемная модель ее образования.

O. I. Trudonoshyn

Eutectic formation in the Al – Mg – Si system

Summary

Belonging of spiral eutectic to the irregular type and epitaxial growth of spiral eutectic on the primary crystals were justified. It is established that eutectic Al – Mg₂Si in hypoeutectic in Al – Mg – Si alloys has a spiral morphology and the three-dimensional model of its formation is presented.