

А. И. Трудоношин, К. В. Михаленков

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

МОРФОЛОГИЯ И СВОЙСТВА ПЕРВИЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ Mg_2Si В СПЛАВАХ СИСТЕМЫ Al-Mg-Si*

Представлены трехмерная морфология и механизм роста первичных кристаллов Mg_2Si в Al-Mg-Si сплавах. Первичные кристаллы Mg_2Si могут принимать такие различные геометрические формы, как октаэдр, куб, усеченные октаэдр и куб, скелетный кристалл и дендрит, но они имеют тенденцию к образованию октаэдра, кристалла равноосной формы с минимальной поверхностной энергией. Показано два механизма модификации, а также проанализировано влияние легирующих элементов (Mn, Sr, Li, Ti) на размер и морфологию первичных кристаллов Mg_2Si .

Ключевые слова: Al-Mg-Si литейные сплавы, первичные кристаллы Mg_2Si , гетерогенное зародышеобразование.

Представлено тривимірну морфологію і механізм росту первинних кристалів Mg_2Si в Al-Mg-Si сплавах. Первинні кристали Mg_2Si демонструють такі різні геометричні форми, як октаедр, куб, усечені октаедр та куб, скелетний кристалл та дендрит, хоча вони мають тенденцію до утворення октаедра, кристалла рівноосної форми, з мінімальною поверхневою енергією. Показано два механізми модифікації, а також проаналізовано вплив легуючих елементів (Mn, Sr, Li, Ti) на розмір і морфологію первинних кристалів Mg_2Si .

Ключові слова: Al-Mg-Si ливарні сплави, первинні кристали Mg_2Si , гетерогенне зародкоутворення.

Three-dimensional morphologies and growth mechanism of primary crystals Mg_2Si in Al-Mg-Si alloys were studied. Primary crystals Mg_2Si in the alloys display various geometric shapes, such as octahedron, hopper, truncated octahedron, cube and dendrite, although they tend to form faceted octahedron (equilibrium shape) with minimized total surface free energy. Two mechanisms of modification was presented in the paper, as well as the influence on the size and morphology of the primary crystals Mg_2Si of alloying elements (Mn, Sr, Li, Ti) was analyzed.

Keywords: cast Al-Mg-Si alloys, Mg_2Si primary crystal, heterogeneous nucleation.

Введение

В последние годы при создании новых материалов интересы смещаются в сторону облегчения веса, уменьшения стоимости, повышения экологичности. В связи с этим, благодаря своим свойствам (высокие литейные свойства, коррозионная стойкость, механические характеристики) все большее применение получают композиционные, дисперсионноупрочняющиеся сплавы.

С такой тенденцией в литейной практике при изготовлении автомобильных деталей используют старый класс легких алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si. В литом состоянии сплавы с номинальными составами AlMg7Si3Mn и AlMg5Si2Mn имеют трехфазную структуру: алюминиевую матрицу (α -Al), эвтектику (Al)+(Mg₂Si) и первичные кристаллы Mg₂Si [1].

Квазибинарные Al-Mg₂Si сплавы имеют эвтектическую структуру состоящую из α -Al и Mg₂Si, первым этапом образования которой часто выступают первичные

*Авторы благодарят Вышеградской фонд за поддержку исследований, включенных в статью. Кроме того, авторы выражают благодарность исследовательскому центру ICDAM в г. Прага (Чехия) за предоставление материальной базы для проведения исследований.

кристаллы Mg_2Si [1]. Таким образом, контроль морфологии и количества образованных кристаллов Mg_2Si является важным и интересным направлением в создании современных конструкционных материалов.

Силицид магния (Mg_2Si) обладает низкой плотностью ($1,99 \times 10^3$ кг/м³), высокой температурой плавления (1085 °С), высокой твердостью ($4,5 \times 10^9$ Н/м²), высоким модулем упругости (120 ГПа) и низким коэффициентом теплового расширения ($7,5 \times 10^{-6}$ К⁻¹) [2]. Благодаря превосходному сочетанию физических и механических свойств Mg_2Si широко используется в качестве упрочняющей фазы в Mg_2Si/Al и Mg_2Si/Mg композитах, которые считаются перспективными кандидатами для авиа- и автомобилестроения, биомедицины и других направлений [2, 3].

Хорошо известно, что форма кристалла зависит от термодинамических и кинетических факторов. Термодинамически устойчивая морфология всегда имеет самую низкую поверхностную энергию. Тем не менее морфологию кристалла также можно изменить за счет контроля кинетических факторов [3].

Теоретически формирование кристалла Mg_2Si при стандартных условиях кристаллизации идет по классической модели роста граненого кристалла. Авторы [3-7] наблюдали ряд таких геометрических морфологий первичных кристаллов Mg_2Si , как октаэдр, усеченный октаэдр, куб, скелетный кристалл («хоппер»), дендрит (рис. 1).

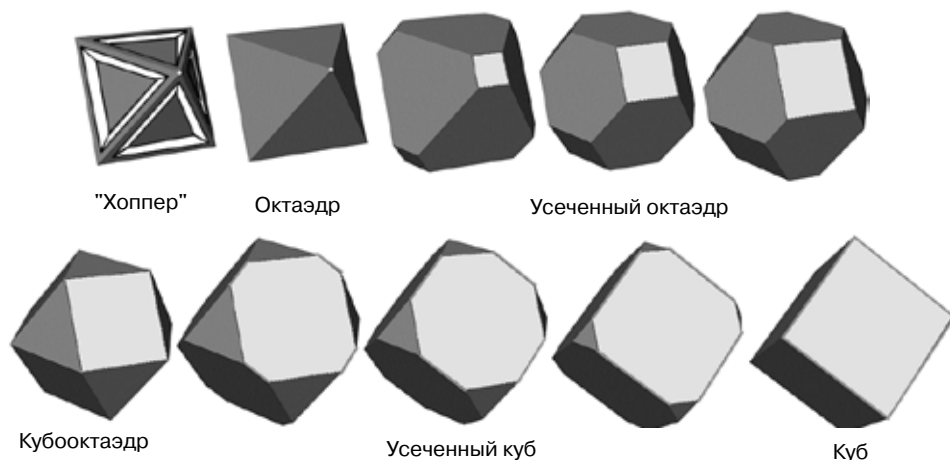


Рис. 1. Варианты морфологии и стадии роста кристаллов Mg_2Si

Среди перечисленных форм октаэдр и куб с ориентацией граней $\{111\}$ или $\{100\}$ представляют особое значение в качестве центра роста эвтектики и оказывают существенное влияние на механические свойства сплавов [2, 3].

Влиять на морфологию первичных кристаллов можно разными способами. Например, первичные кристаллы Mg_2Si при низких скоростях кристаллизации имеют тенденцию к образованию дендритной морфологии, которая ухудшает механические свойства сплавов и таким образом серьезно ограничивает их промышленное применение, и наоборот [3, 6].

С увеличением содержания магния и кремния в сплавах размер первичных кристаллов также увеличивается, а морфология меняется на дендритную [2].

Морфология кристаллов Mg_2Si меняется от дендритной к многогранной и кубической с увеличением содержания стронция в $Al-Mg_2Si$ сплавах [8]. На размер и форму кристаллов влияют подобным образом фосфор и марганец [4, 9, 10].

Некоторые авторы также обнаружили изменение размера и формы первичных кристаллов при введении в сплав незначительного количества зародышеобразующих компонентов. Так, в работе [11] установлена возможность гетерогенного зарождения кристаллов Mg_2Si на $Sr_{11}Sb_{10}$ на зародыше, а в [12] – на зародыше TiB_2 .

Кристаллизация и структурообразование сплавов

Все вышеперечисленные исследования проводились на заэвтектических сплавах.

Целью данного исследования является изучение изменения морфологии и механизма роста кристаллов Mg_2Si в доэвтектических сплавах Al- Mg_2Si на основе теории роста кристаллов и детального наблюдения трехмерной морфологии первичных кристаллов.

Методика проведения эксперимента

Исследования проводили на литых доэвтектических сплавах системы Al- Mg_2Si (рис. 2), дополнительно легированных марганцем, титаном, стронцием и литием, химический состав которых представлен в табл. 1.

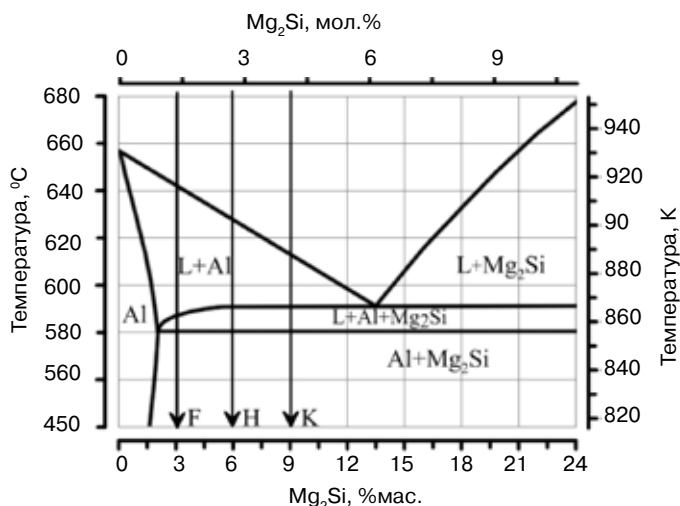


Рис. 2. Равновесная диаграмма состояния Al- Mg_2Si (на диаграмме стрелками обозначены исследуемые сплавы)

Таблица 1. Номинальный состав сплавов

Сплав	Содержание элементов, %мас. (Al – бал.)					
	Mg	Si	Mn	Sr	Ti	Li
G	7,0	3,0	-	-	-	-
F	3,0	1,0	0,6	-	-	-
H	5,0	2,0	0,6	-	-	-
K	7,0	3,0	0,6	-	-	-
T	7,0	3,0	0,6	-	0,2	-
S	7,0	3,0	0,6	0,2	-	-
L	5,0	2,0	0,6	-	-	1,0
M	5,0	2,0	0,6	-	0,2	-

Сплавы выплавляли в печи сопротивления в графитовом тигле (масса плавки 0,25 кг). В качестве исходных материалов использовали алюминий высокой чистоты (99,997), лигатуры AlSi25, AlMn26, AlMg50, AlTi6, AlSr10, AlLi5. Перед разливкой металл продували аргоном на протяжении 10 мин. После продувки с поверхности расплава удаляли шлак, и жидкий металл заливали в кокиль при температуре формы 20 °С. При таких условиях скорость охлаждения составляла 5 К с⁻¹.

Исследование структуры проводили на литых образцах и образцах после гомогенизации, глубокое травление осуществляли с использованием стандартной методики в 15 %-ном водном растворе NaOH.

Результаты и обсуждение

Морфология кристаллов Mg_2Si . В рассматриваемой системе сплавов обнаружены практически все морфологии первичных кристаллов (рис. 3), описанные ранее [2-7, 10-13].

Кристаллы типа «хopper» или скелетные кристаллы (рис. 3, а) наблюдались в сплаве G в зоне слитка, прилегающей к форме, а значит в зоне с повышенной скоростью охлаждения. Как известно [14], образование подобной морфологии обычно связано с повышенной вязкостью и пресыщением среды. Кристаллы с дендритной морфологией (рис. 3, д) в доэвтектических сплавах встречаются крайне редко и нами наблюдались только в сплаве G. Их появление в сплаве может быть связано с плохим распределением магния и кремния по слитку, а также с высокими скоростями охлаждения [6, 15]. Подобные морфологии чаще встречаются в заэвтектических сплавах с содержанием 13,9 % Mg_2Si и выше [2, 6, 16].

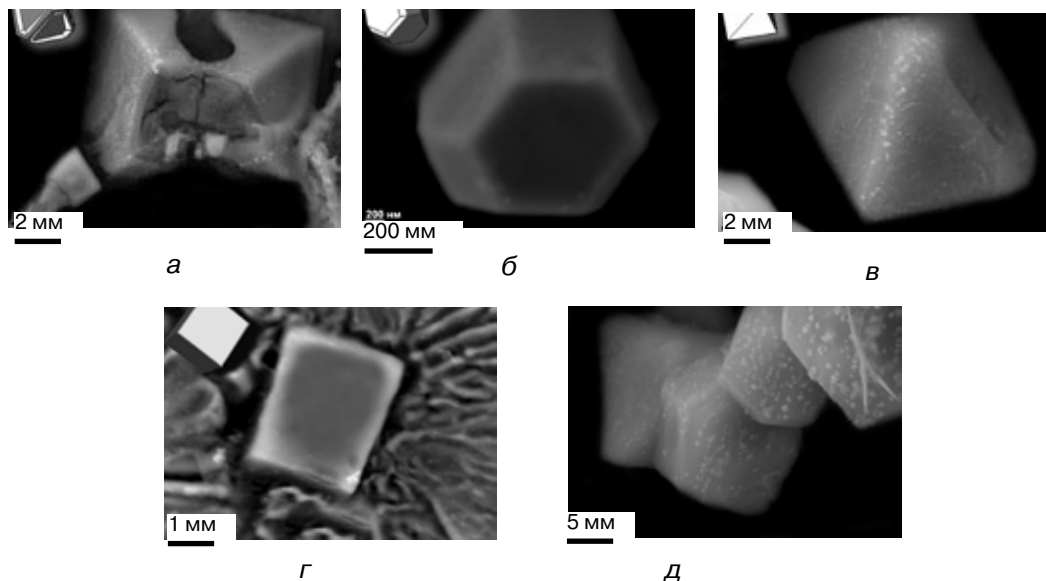


Рис. 3. Трехмерная морфология первичных кристаллов Mg_2Si в глубокоотравленных образцах: а – «хopper» – сплав G; б – усеченный октаэдр – сплав F; в – правильный октаэдр – сплав H; г – куб – сплав S; д – ветвь дендрита – сплав G

В отличие от заэвтектических сплавов, где при увеличении скорости охлаждения кристаллы приобретают явно выраженную дендритную структуру, а эвтектика деградирует [16], в доэвтектических сплавах происходит уменьшение размеров кристаллов с 20-30 до 0,5-1 мкм (рис. 4 а, б), увеличение их количества приблизительно в 10 раз, но изменение морфологии не происходит.

Авторы работы [2] в заэвтектических Al-Mg-Si сплавах показали зависимость изменения морфологии, количества и размеров первичных кристаллов при увеличении содержания Mg_2Si . Установили, что с повышением содержания Mg_2Si от 15 до 30 %мас. количество кристаллов увеличивается, а сами кристаллы приобретают явно выраженную дендритную морфологию. На рис. 3 представлена различная морфология кристаллов в доэвтектических сплавах при разном содержании Mg_2Si , а на рис. 4 показано изменение количества кристаллов, на рис. 3, б – преобладающая морфология кристаллов в сплаве Al-3 %мас. Mg_2Si . При увеличении содержания Mg_2Si до 5-7 %мас. кристаллы преимущественно имеют форму правильного октаэдра (рис. 3, в), а при дальнейшем увеличении также можно встретить и кубические кристаллы.

Добавление в основной состав (сплав G) марганца в количестве 0,5-0,6 %мас. смещает точку эвтектики в область, богатую алюминием на диаграмме состояния (рис. 2), и способствует более равномерному распределению эвтектики в объеме, а также уменьшает размеры (с 20-30 до 10-15 мкм) кристаллов и их количество (рис. 4, а и г). Результаты эксперимента также подтверждаются авторами работы [9],

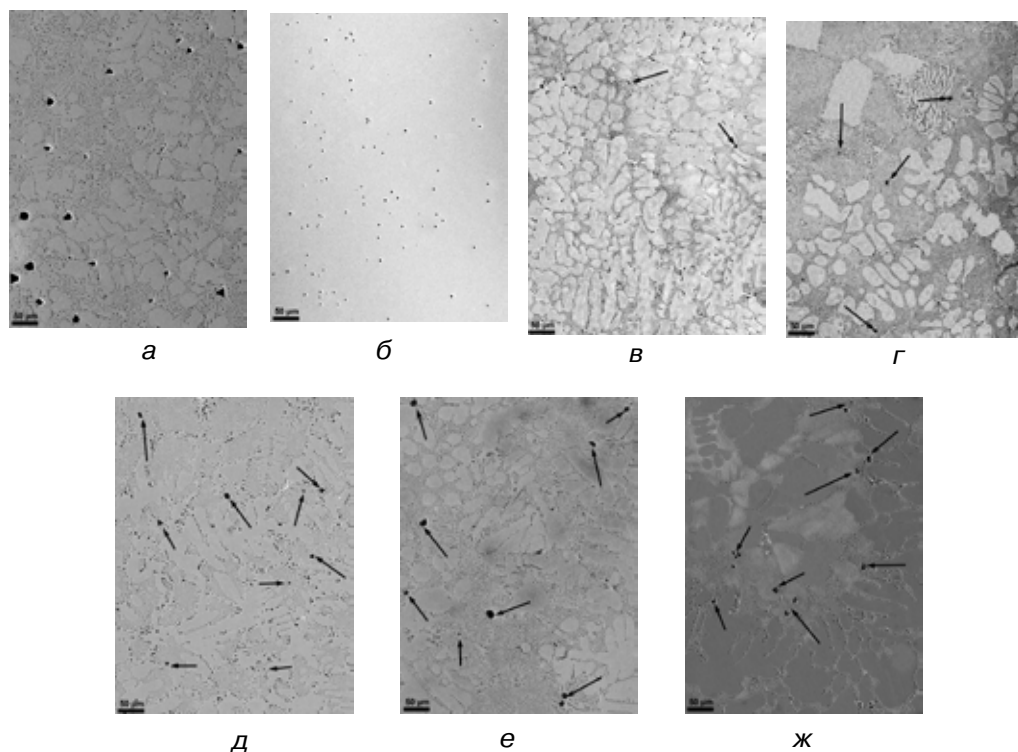


Рис. 4. SEM-изображения микроструктур исследуемых сплавов: а – сплав G; б – сплав G с повышенной скоростью охлаждения; в – сплав H; г – сплав K; д – сплав Al-11 Mg₂Si; е – сплав S; ж – сплав L; стрелками показаны кристаллы Mg₂Si

которые исследовали влияние марганца на структуру заэвтектических сплавов. Они также отметили резкое сокращение кристаллов типа «хоппер» после добавления в сплав марганца.

Добавление в сплав K стронция в количестве 0,1 %мас. (сплав S) привело к увеличению (в сравнении со сплавом K) размеров (с 10-15 до 20-25 мкм) и количества (в среднем в 2 раза) первичных кристаллов Mg₂Si, а также способствует формированию кристаллов кубической формы (рис. 4, г, е). В работе [8] пришли к выводу, что добавление стронция способствует замедлению роста кристалла в направлении [100], что приводит к формированию кубической морфологии (рис. 1). Авторы также установили оптимальное содержания стронция в сплаве – 1,5 %мас. Более высокое содержание способствует формированию нежелательных соединений стронция с кремнием.

Добавление в сплав H лития в количестве 1,0 %мас. (сплав L) привело к увеличению количества кристаллов (в среднем в 2-2,5 раза), а также среднего размера кристаллов (с 5 до 7-10 мкм) и к более равномерному их распределению в объеме слитка. Как сообщают [13, 17, 18], это связано с изменением поверхностной энергии кристаллов Mg₂Si, вызванным присутствием атомов Li на поверхности кристалла.

В [17, 18] сообщается, что литий сдвигает точку эвтектики в область, богатую Mg₂Si, а также, что добавление лития изменяет морфологию первичных кристаллов на сферическую. Результаты, полученные в данном исследовании, а также в работе [13] не подтверждают эти данные. При введении в сплав 1,0 %мас. Li в статье не обнаружили ни одного первичного кристалла Mg₂Si сферической формы. Можно предположить, что сфероидизация первичных кристаллов, представленная в [18], вызвана только экструзией. В [13] дано обоснование смещения точки эвтектики в зону, богатую алюминием, после добавления в сплав лития, а также снижение температуры протекания эвтектической реакции.

Гетерогенное зародышеобразование и рост кристаллов Mg_2Si .

Как правило, есть два возможных механизма модификации сплавов. Один заключается во влиянии модификаторов на фронт кристаллизации, то есть на изменение поверхностной энергии растущих кристаллов. Второй основывается на гетерогенном зародышеобразовании, то есть модифицирующие компоненты выступают в качестве гетерогенного зародыша. На рис. 5 показан процесс роста октаэдрического кристалла Mg_2Si из зародыша.

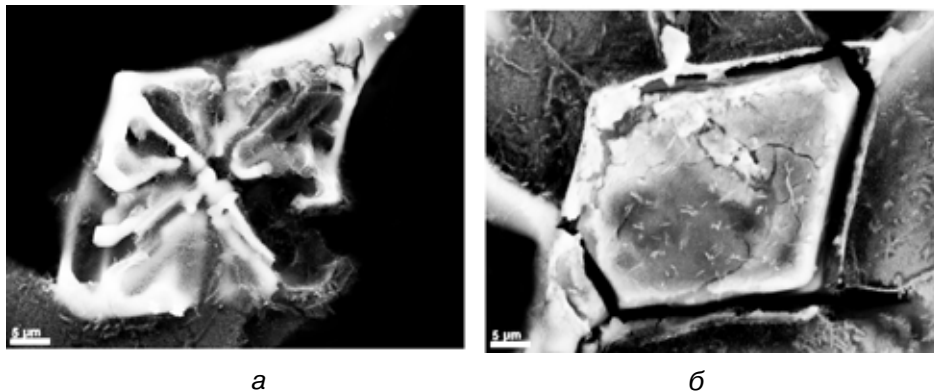


Рис. 5. Морфология деградированного кристалла Mg_2Si в результате повышенной скорости охлаждения, в центре кристалла находится зародышеобразующая частичка (а), октаэдрическая морфология Mg_2Si (б)

В работах [11, 12] описан процесс гетерогенного зародышеобразования в заэвтектических Al- Mg_2Si сплавах на частицах TiB_2 и $Sr_{11}Sb_{10}$ соответственно.

В данном исследовании представлены химический состав и возможные морфологии зародышеобразующих частиц в доэвтектических сплавах Al-Mg-Si без и с добавлением титана.

На рис. 6 показаны SEM-изображения кристаллов Mg_2Si с зародышами в сплавах без добавления титана: G (рис. 6, а, б), К (рис. 6, в, г) и сплав Н (рис. 6, д, е). EDX-анализ кристаллов показал соответствие их химического состава стехиометрическому соотношению (2:1), а в табл. 2 представлен EDX-анализ зародышей.

Проанализировав полученные результаты, можно прийти к выводу, что зародышеобразующие частички состоят из соединения $Al_2O_3+SiO_2+MgO$ (рис. 7, а) и в отличие от титаносодержащих зародышей (рис. 8), как видно из рис. 6, не обладают выраженной кристаллической морфологией.

На рис. 6 представлены кристаллы и их зародышеобразующие частички, обнаруженные в сплавах Т (рис. 8, а, б) и М (рис. 8, в-е).

В табл. 3 приведены данные EDX-анализа зародышей, обнаруженных в титаносодержащих сплавах.

При сопоставлении полученных результатов с диаграммой состояния Al-Ti-O (рис. 7, б) было обнаружено, что все три зародыша имеют различный химический состав, они были идентифицированы, согласно [21] (табл. 3).

Титаносодержащие зародыши имеют ярко выраженную кристаллическую структуру. На рис. 8, г представлен зародыш, состоящий из конгломерата частичек. Отсутствие первичного кристалла на рис. 8, в, вероятно, является следствием приготовления шлифа. Зародыш кристалла остался прикрепленным к α -Al. Это может быть свидетельством того, что и первичные кристаллы Mg_2Si , и α -Al могут зарождаться на одних зародышеобразующих частичках. Титаносодержащие зародыши во всех представленных кристаллах (рис. 8) прилегают к α -Al (в отличие от зародышей, представленных на рис. 6).

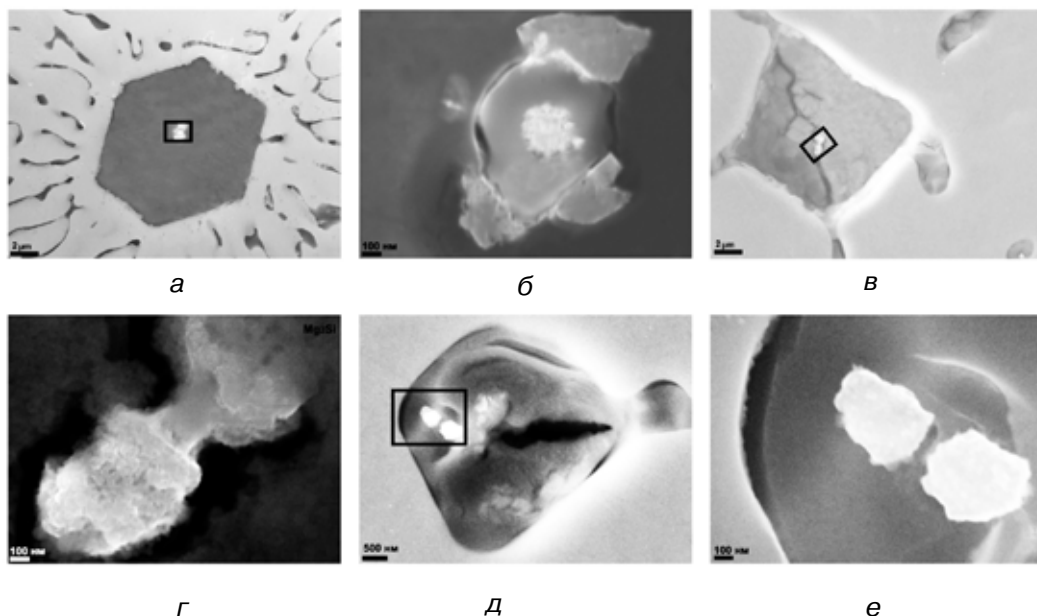


Рис. 6. Морфология кристаллов и зародышеобразующих частиц: а, б – сплав Г; в, г – сплав К; д, е – сплав Н

Таблица. 2. EDX-анализ зародышеобразующих частиц кристаллов Mg_2Si

Кристаллы	Элементы, ат. %				
	O	Mg	Al	Si	Mn
1 (рис. 6, а, б)	37,40	25,45	13,38	23,67	0,10
2 (рис. 6, в, з)	40,18	24,05	12,07	23,55	0,15
3 (рис. 6, д, е)	39,27	23,79	14,26	22,65	0,04

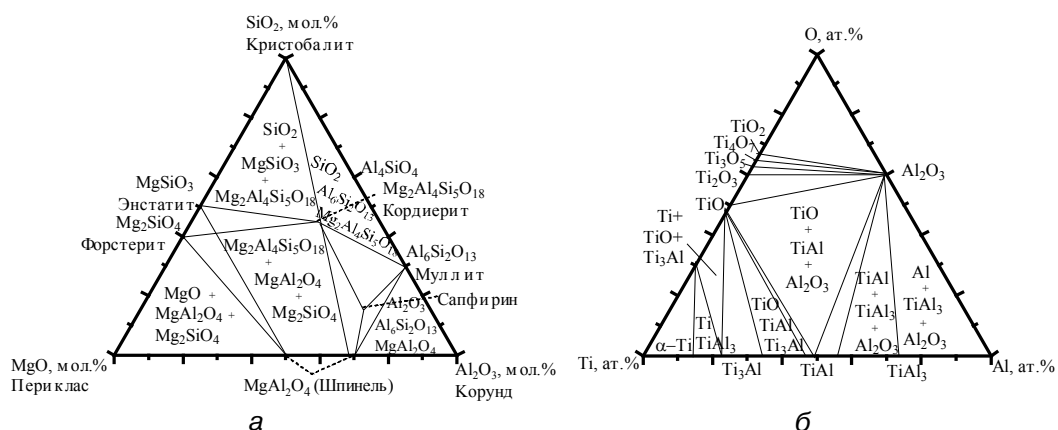


Рис. 7. Трехфазные равновесные диаграммы состояния: а – Al_2O_3 - SiO_2 - MgO ; б – Al - Ti - O

Введение в сплав титана приводит к увеличению количества кристаллов и способствует равномерному распределению их по всему объему слитка за счет увеличения количества зародышей. Это приводит к улучшению микроструктуры и механических свойств сплавов [11, 12].

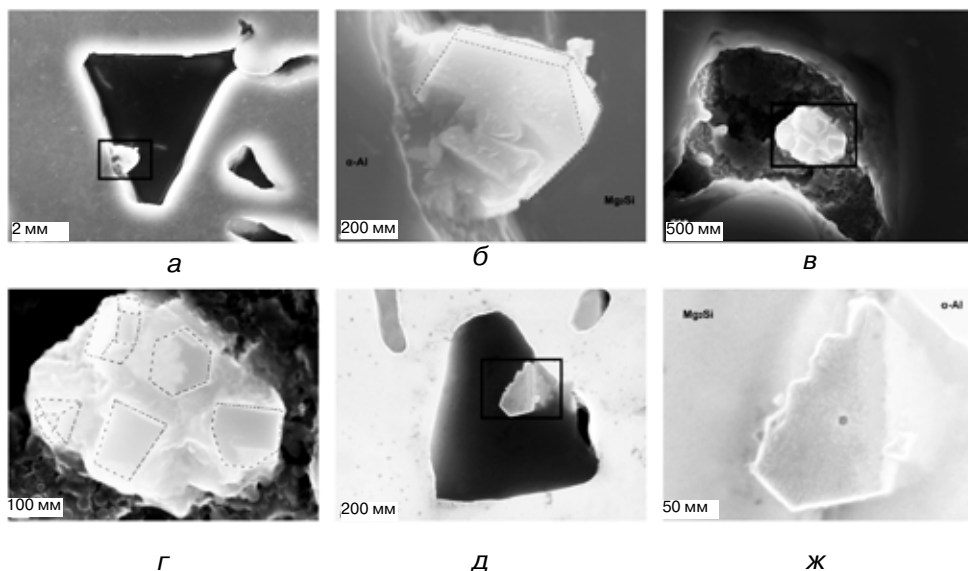


Рис. 8. Морфология кристаллов и зародышеобразующих частиц в сплавах, содержащих титан: а, б – сплав Т; в- е – сплав М

Таблица 3. EDX-анализ зародышеобразующих частиц кристаллов Mg₂Si

Кристаллы	Элементы, ат.%								Название фазы и стехиометрический состав зародыша [21]
	O	Mg	Al	Si	Ti	V	Mn	Zr	
4 (рис. 8, а, б)	20,07	2,80	19,45	4,11	36,81	15,53	0,67	0,56	$\alpha_2 - (Ti,V)_3Al(O)$
5 (рис. 8, в, з)	19,87	4,27	30,27	2,24	28,32	14,02	0,54	0,47	Z - $(Ti,V)_5Al_3O_2$
6 (рис. 8, д, е)	24,72	0,86	37,33	4,10	24,11	8,24	0,36	0,27	$\gamma - (Ti,V)Al(O)$

Выводы

- Сплавы системы Al-Mg-Si имеют квазибинарную структуру, состоящую из матрицы α -Al, эвтектики (Al)+(Mg₂Si) и первичных кристаллов Mg₂Si. Зерна α -Al имеют дендритную морфологию, а эвтектика состоит из пластин Mg₂Si, перемежающихся с α -Al. Зарождение эвтектических ламелей происходит на базовых кристаллах Mg₂Si, расположенных в центрах эвтектических колоний.

- Микроструктурные исследования показали наличие ряда таких геометрических морфологий первичных кристаллов Mg₂Si, как октаэдр, усеченный октаэдр, куб, полный кристалл («хоппер»), дендрит. Было установлено, что характерной морфологией является октаэдр.

- Увеличение содержания Mg₂Si приводит к увеличению количества и укрупнению размеров первичных кристаллов, скорость кристаллизации – к измельчению размеров кристаллов.

- Введение в сплав дополнительных элементов способствует к изменению формы и размеров кристаллов Mg₂Si. Вводимые элементы в зависимости от механизма влияния на морфологию делятся на две категории: оказывающие «отравляющий эффект» и способствующие гетерогенному зародышеобразованию.



Список литературы

1. Бойко В. В., Трудоношин А. И., Михаленков К. В. Особенности плавления и термической обработки литейного сплава Al-Mg-Si-Mn с добавками 0,1 Ti и 0,1 %мас. Zr // Процессы литья. – 2014. – № 3. – С. 27-37.
2. Morphological evolution and growth mechanism of primary Mg₂Si phase in //Al-Mg₂Si alloys C. Li, Y. Y. Wu, H. Li, X. F. Liu // Acta Materialia. – 2011. – Vol. 59. – P. 1058-1067.
3. Jiang Morphology and size control of octahedral and cubic primary Mg₂Si in an Mg-Si system by regulating Sr contents / L. Chen, H. Y. Wang, Y. J. Li, M. Zha // CrystEngComm. – 2014. – Vol. 16. – P. 448-454.
4. C. Li, X. Liu, Y. Wu Refinement and modification performance of Al-P master alloy on primary Mg₂Si in Al-Mg-Si alloys // Journal of Alloys and Compounds. – 2008. – Vol. 465. – P. 145-150.
5. Microstructural formation in hypereutectic Al-Mg₂Si with extra Si / C. Li, Y. Wu, H. Li, X. Liu // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – Vol. 477. – P. 212-216.
6. Qin Q. D., Zhao Y. G. Nonfaceted growth of intermetallic Mg₂Si in Al melt during rapid solidification // Journal of Alloys and Compounds. – 2008. – Vol. 462. – P. L28-L31.
7. Xu C. L., Wang H. Y., Liu C., Jiang Q. C. Growth of octahedral primary silicon in cast hypereutectic Al-Si alloys // Journal of Crystal Growth. – 2006. – Vol. 291. – P. 540-447.
8. Zhou Strontium modification and formation of cubic primary Mg₂Si crystals in Mg₂Si/Al composite / Q. D. Qin, Y. G. Zhao, C. Liu, P. J. Cong // Journal of Alloys and Compounds. – 2008. – Vol. 454. – P. 142-146
9. Emami Effect of Mn addition on the microstructure and tensile properties of Al-15%Mg₂Si composite / M. R. Ghorbani, M. Emamy, R. Khorshidi // Materials Science and Engineering A. – 2012. – Vol. 550. – P. 191-198.
10. Effect of phosphorus on microstructure and growth manner of primary Mg₂Si crystal in Mg₂Si/Al composite / Q. D. Qin, Y. G. Zhao, W. Zhou, P. J. Cong // Materials Science and Engineering A. – 2007. – Vol. 447. – P. 186-191.
11. Heterogeneous nucleation of Mg₂Si on Sr₁₁Sb₁₀ nucleus in Mg-x(3.5, 5 wt.%) Si-1Al alloys / H. Y. Wang, L. Chen, B. Liu and et. el. // Materials Chemistry and Physics. – 2012. – Vol. 135. – P. 358-364.
12. Li C., Liu X., Zhang G. Heterogeneous nucleating role of TiB₂ or AlP/TiB₂ coupled compounds on primary Mg₂Si in Al-Mg-Si alloys // Materials Science and Engineering A. – 2008. – Vol. 497. – P. 432-437.
13. Eutectic reaction and microstructural characteristics of Al (Li)-Mg₂Si alloys / S.-P. Lio, S.-X. Zhao, M.-X. Pany and et. el. // Journal of Materials Science. – 2001. – Vol. 36. – P. 1569-1575.
14. Булах А. Г., Кривовочев В. Г., Золотарев А. А. // Общая минералогия. – М.: Академия, 2008. – 561 с.
15. Effect of cooling rate on the microstructure of hypereutectic Al-Mg₂Si alloys / J. Zhang, Z. Fan, Y. Q. Wang, B. L. Zhou // Journal of Materials Science Letters. – 2000. – Vol. 19. – P. 1825-1828.
16. Ourfali M. F., Todd I., Jones H. Effect of Solidification Cooling Rate on the Morphology and Number per Unit Volume of Primary Mg₂Si Particles in a Hypereutectic Al-Mg-Si Alloy // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2005. – Vol. 36 A. – P. 13-68-1372.
17. The effect of Li on the tensile properties of cast Al-Mg₂Si metal matrix composite Materials Science and Engineering / R. Hadian, M. Emamy, N. Varahram, N. Nemati A. – 2008. – Vol. 490. – P. 250-257
18. Razaghian A. Bahrami A, Emamy M The influence of Li on the tensile properties of extruded in situ Al-15 % Mg₂Si composite // Materials Science and Engineering A. – 2012. – Vol. 532. – P. 346- 353

Кристаллизация и структурообразование сплавов

19. Decterov S. A., Kang Y. B., Jung I. H. Thermodynamic Database for the Al-Ca-Co-Cr-Fe-Mg-Mn-Ni-Si-O-P-S System and Applications in Ferrous Process Metallurgy // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2009. – Vol. 30, № 5. – P. 443-461.
20. Titanium and titanium alloys: Fundamentals and application, ed. C. Leyen M. Peters, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. – 2003. – P. 513.
21. Quadackers Synthesis of the cubic Z-phase in the Ti-Al-O system by a powder metallurgical method / V. Shemet, P. Karduck, H. Hoven and et. el. // Intermetallics. – 1997. – Vol. 5. – P. 271-280.

Поступила 16.06.2014

ВНИМАНИЕ!

Предлагаем разместить в нашем журнале рекламу Вашей продукции или рекламный материал о Вашем предприятии. Редакция также может подготовить заказной номер журнала.

Стоимость заказного номера - 4000 грн.

**Расценки на размещение рекламы
(цены приведены в гривнях)**

Размещение	Рекламная площадь	Стоимость, грн.
Рекламные блоки в текстовой части журнала		
Цветные	1/2 страницы	900
	1/3 страницы	600
	1/4 страницы	300
Черно-белые	1/2 страницы	550
	1/3 страницы	380
	1/4 страницы	200
Цветная реклама на обложке		
Третья страница обложки	1 страница	2800
	1/2 страницы	1400
	1/4 страницы	700
Четвертая страница обложки	1 страница	3100
	1/2 страницы	1550
	1/3 страницы	1000

При повторном размещении рекламы - скидка 15 %

Наш адрес: **Украина, 03680, г. Киев- ГСП. Вернадского, 34/1**
Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины
телефоны: (044) 424-04-10, 424-34-50
факс: (044) 424-35-15; **E-mail:** proclit@optima.kiev.ua