

Е. Л. Прач, К. В. Михаленков

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Mg-Si-Mn С ДОБАВЛЕНИЕМ ЛИТИЯ*

Литейный сплав с номинальным составом AlMg5Si2MnLi был исследован с помощью световой микроскопии и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). С использованием световой микроскопии была изучена морфология сплава. Исследования СЭМ показали наличие первичных кристаллов Mg₂Si и упрочняющей марганцевой фазы. Отмечено, что гомогенизация приводит к изменению морфологии эвтектических ламелей Mg₂Si в сферы. Проведены механические испытания, полученные результаты показали позитивное влияние добавления лития в сплавы системы Al-Mg-Si-Mn.

Ключевые слова: Al-Mg-Si-Mn литейные сплавы, СЭМ, наноразмерные частицы.

Ливарний сплав з номінальним складом AlMg5Si2MnLi був досліджений за допомогою світлової мікроскопії та скануючої електронної мікроскопії (СЕМ). З використанням світлової мікроскопії була вивчена морфологія сплаву. Дослідження СЕМ показали наявність первинних кристалів Mg₂Si та зміцнюючої марганцевої фази. Показано, що гомогенізація призводить до зміни морфології евтектичних ламелей Mg₂Si в сфери. Проведено механічні випробування, отримані результати показали позитивний вплив додавання літію в сплави системи Al-Mg-Si-Mn.

Ключові слова: Al-Mg-Si-Mn сплави після лиття, ДСК, нанорозмірні частинки.

Aluminum casting alloy with a nominal composition AlMg5Si2MnLi was examined by light microscopy (LM) and scanning electron microscopy (SEM). Morphology of alloy was studied using LM. SEM research showed the presence of the primary Mg₂Si crystals and hardening Al(Mn,Fe)Si phase. The research showed that homogenization leads to changes in the morphology of eutectic lamella Mg₂Si in spears. Mechanical tests were conducted, the results showed a positive effect of the addition of lithium in alloys of the Al-Mg-Si-Mn.

Keywords: cast Al-Mg-Si aluminium alloys, SEM, nanosize precipitation.

Введение

Потребность в улучшении механических свойств алюминиевых сплавов при одновременном уменьшении массы отливки и снижении затрат на термическую обработку определяет необходимость разработки новых сплавов для деталей, работающих при повышенных нагрузках и температурах. Это особенно актуально для деталей двигателей внутреннего сгорания, в которых планируется использовать водород как топливо [1, 2].

Группа литейных сплавов системы Al-Si является наиболее распространенной группой материалов для получения фасонных отливок [1]. Главное их преимущество состоит в том, что детали из них могут быть получены всеми известными литейными технологиями. Авторы работы [3] показали, что добавки магния в силумины обеспечивают формирование упрочняющих частиц при дисперсионном твердении. Отмечали, что повышение содержания марганца увеличивает количество упрочняющих частиц, однако при содержании его 0,5 %мас. увеличения предела текучести не замечалось.

*Авторы благодарят Вышеградской фонд и Немецкую службу академических обменов (DAAD) в поддержке исследований, включенных в статью. Кроме того, авторы выражают благодарность исследовательскому центру ICDAM в г. Прага (Чехия) за предоставление материальной базы для проведения исследований

Коммерческие алюминиевые сплавы в большей степени создаются путем термообработки и искусственного старения, но только девять элементов показывают заметную растворимость в твердом состоянии (более 1 ат.%) в алюминии и только 5 (Mg, Si, Fe, Cu, Zn) используются в коммерческих сплавах [4]. Добавки исследуемого сплава указаны в табл. 1.

Таблица 1. Наиболее важные добавки и их влияние [5]

	Li	Способствует росту модуля упругости. Несет модифицирующий эффект
	Mn	
Si	Mg	повышает коррозионную стойкость, в сочетании с магнием снижают тепло- и электропроводность алюминия
Повышает коррозионную стойкость	повышает прочность, увеличивает твердость и улучшает коррозионную стойкость, сварочную способность	

Основная проблема в разработке материала с хорошими механическими свойствами заключается в контроле морфологии, относительного объема и состава фазовых частиц, образующихся в процессе литья и во время термообработки. Укрупненное зерно, как правило, приводит к образованию трещин. Таким образом, важны не только условия применяемой термообработки, но также оптимальный химический состав материала.

В данной работе рассматривается сплав системы Al-Mg-Si-Mn-Li, который был гомогенизирован в течение 30, 60 и 90 мин.

Целью данной работы является изучение структуры исследуемого сплава и определение влияния термической обработки на микро- и макротвердость. Исследования проводились с помощью световой и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Методика проведения исследования

В качестве исследуемого материала выбрали сплав AlMg5Si2MnLi (табл. 2), выплавленный в лабораторных условиях (заливка в металлическую форму). Исходным материалом был алюминий высокой чистоты (A99, 997), AlMg50, AlSi25, AlMn26 и AlLi5, которые использовались в качестве легирующих добавок. Для сравнения выбрали промышленный литейный сплав Magsimal 59.

Таблица 2. Состав исследуемых сплавов, ат. % (Al – основа)

Сплав	Mg	Si	Mn	Fe	Li
Magsimal 59	5,47	2,20	0,69	0,12	–
L	5,52	1,91	0,29	–	3,79

Механические свойства и структура сплава изучались в литом состоянии и после гомогенизации при $t = 570$ °C в течение 30, 60 и 90 мин.

Полученные образцы подвергались стандартной металлографической процедуре приготовления шлифов и были протравлены реактивом Келлера в течение 17 с для исследования микроструктуры. Глубокое травление проводили по стандартной методике с использованием 15 % водного раствора NaOH.

Микротвердость измеряли по методу Викерса для зерен α -Al с нагрузкой 0,05 кгс и временем индентирования 10 с, а также по методу Бринелля, диаметр индентора составлял 2,5 мм, нагрузка – 62,5 кг.

Кристаллизация и структурообразование сплавов

Исследования структуры проводились с использованием светового микроскопа Neophot 32, снимки СЭМ были получены на JEOL 7600.

Результаты и обсуждения

В данной работе были определены характер и морфология сплава в литом состоянии и после гомогенизации. Морфология фаз была первоначально исследована с помощью световой микроскопии. На изображениях, полученных с помощью СЭМ, были обнаружены первичные кристаллы Mg_2Si (рис. 1, 2). Химический анализ α -Al фазы показал наличие, ат. %: 2,32 Mg; 0,32, 0,25 Mn; 97,12 Al.

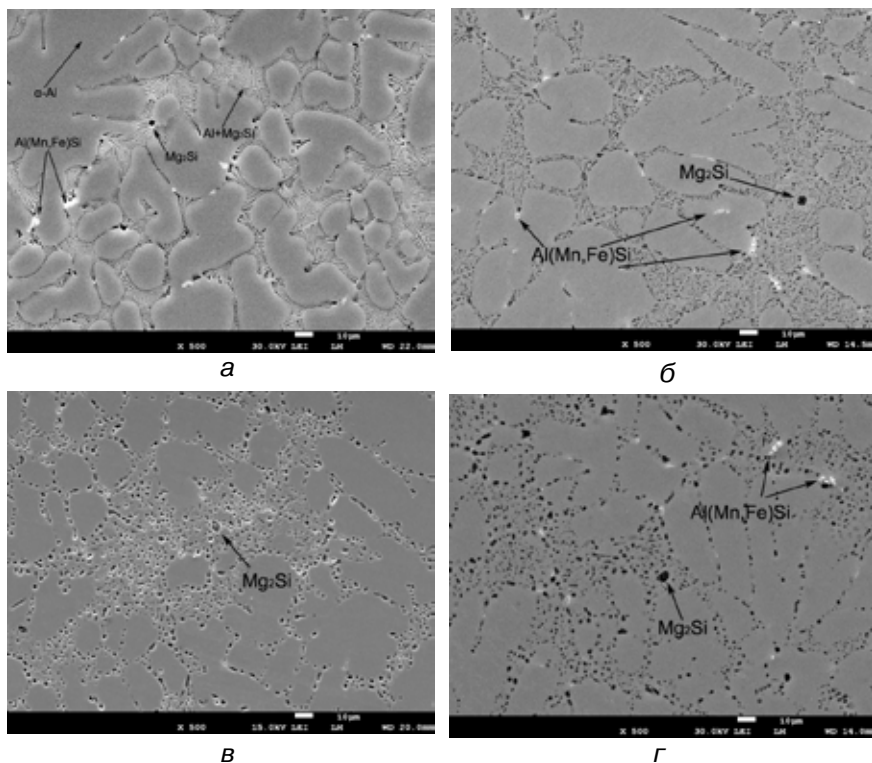


Рис. 1. Изображения сплава Li, полученные с помощью СЭМ: а – в литом состоянии; б – после гомогенизации в течение 30 мин; в – 60; г – 90 мин

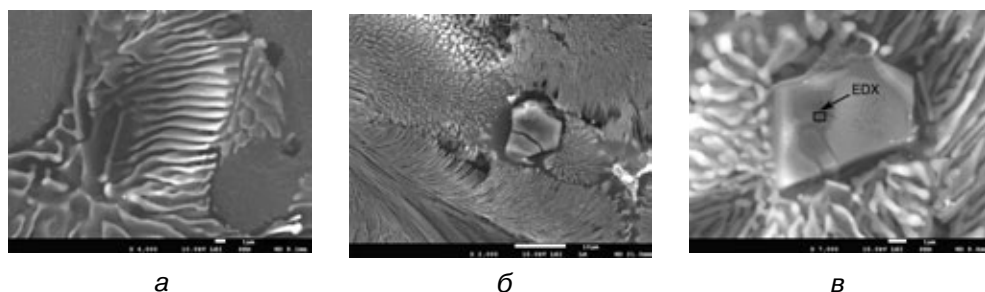


Рис. 2. Морфология эвтектики $(Al)+(Mg_2Si)$: а – глубокое травление в течение 5 мин без добавления Li; б – глубокое травление в течение 5 мин с добавлением Li; в – изображение первичного кристалла Mg_2Si после глубокого травления

На рис. 2, а, б представлена морфология эвтектики $(Al)+(Mg_2Si)$. Добавление лития несет модифицирующий эффект, ламели сплава системы Al-Mg-Si-Mn имеют пластинчатую морфологию, после добавления лития они трансформируются в тонкие волокна.

Таблица 3. Химический состав первичного кристалла, ат. %

Спектр	O	Mg	Al	Si	Всего
ат. %	31,76	33,98	9,05	25,20	100,00

С помощью EDX анализа был установлен химический состав найденных первичных кристаллов (табл. 3, рис. 2 б, в). Стехиометрический состав Mg_2Si составляет, ат. %: 66,7 Mg и 33,3 Si (отношение Mg/Si составляет 2,0), полученное

соотношение Mg/Si равно 1,3:1,0. Предположительно, это связано с тем, что алюминиевые сплавы, литий и фаза Mg_2Si склонны к быстрому окислению, что приводит к большому наличию кислорода в спектре благодаря тому, что электронный пучок может охватывать частично и матрицу.

Авторы [6] пришли к выводу, что добавление лития в количестве 0,5 %мас. и более ведет к изменению морфологии первичных кристаллов Mg_2Si от правильной кристаллической к сферической. По нашему мнению, изменение морфологии первичных кристаллов в работе [6] происходило исключительно в процессе экструзии. Результаты исследований в работе показали, что литий не меняет морфологию кристаллов, а лишь ведет к уменьшению размера (по сравнению с базовым сплавом Hydronalium 511, который не содержит лития) от 10-20 до 5-10 мкм, что подтверждается авторами работы [7].

Фаза, содержащая марганец, присутствует в обоих исследуемых сплавах (рис. 1, 3), ее химический состав следующий, ат. %: 3,4 Mg; 80,71 Al; 1,74 Si; 4,32 Mn; 3,33 Fe. Эта фаза может быть идентифицирована как $\alpha-Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ и является типичной для промышленных литейных сплавов, содержащих марганец. Добавление лития несет модифицирующий эффект, значительно уменьшая его в размерах по сравнению со сплавами, содержащими скандий (рис. 3).

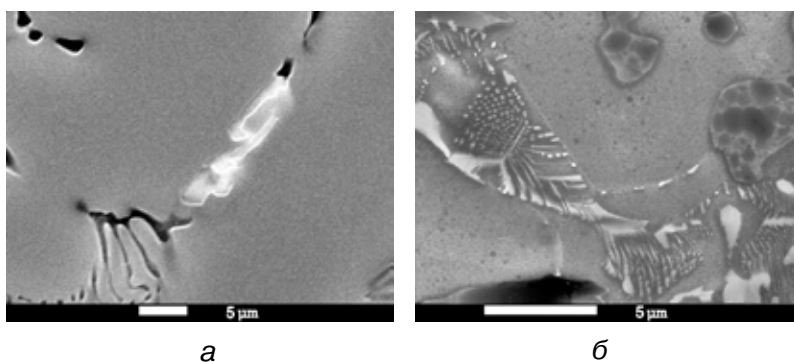


Рис. 3. СЭМ изображения марганцевой фазы $Al(Mn,Fe)Si$: а – в исследуемом сплаве; б – сплав системы Al-Mg-Si-Mn с добавлением скандия

Опытные сплавы были подвергнуты стандартным механическим испытаниям, результаты которых представлены в табл. 4. Полученные значения показывают значительное улучшение механических свойств у сплава с добавлением лития, по сравнению с промышленным сплавом Magsimal 59.

Таблица 4. Механические свойства исследуемых сплавов

Сплав	HV	HB	R_m , МПа	$R_{p0,2}$, МПа	Удлинение, мм
L	91	87	226,9	163	3,4
Magsimal 59	74	75	219,9	155,5	2,7

Изучено влияние лития и последующей гомогенизации на структуру и механические свойства сплава системы Al-Mg-Si-Mn, что позволяет сделать следующие выводы:

- Добавление лития в базовый состав несет модифицирующий эффект и приводит к изменению морфологии эвтектики (Al) + (Mg₂Si) от пластин к тонким волокнам. Последующая гомогенизация сплава способствует дезинтеграции ламелей Mg₂Si на отдельные сферы.

- Химический состав первичных кристаллов Mg₂Si, найденных в сплаве, хорошо согласуется с теоретическими данными. Модифицирующий эффект лития приводит к измельчению первичных кристаллов относительно базового сплава. Кристаллы имеют кубическую форму, гомогенизация способствует изменению их морфологии.

- Добавление лития положительно влияет на механические свойства исследуемого сплава.



Список литературы

1. Бойко В. В., Линк Т., Михаленков К. Упрочняющие частицы в литейных алюминиевых сплавах // Оборудование и инструмент для профессионалов. Сер Металлообработка. – 2013. – № 1.
2. Mrówka-Nowotnik G., Sieniawski J., Wierzbńska M. Morphology prediction of intermetallics formed in 4xxx type of aluminium alloy // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2008. – № 8/2.
3. Wang Q. G., Davidson C. J. Solidification and precipitation behaviour of Al-Si-Mg casting alloys // Journal of Materials Science. – 2001. – № 36. – P. 739-750.
4. Dobrzański L. A., Labisz K., Olsen A. Microstructure and mechanical properties of the Al-Ti alloy with calcium addition // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2008. – № 26/2.
5. Mondolfo L. F. Aluminium Alloys Structure and Properties. – London: Butterworths, 1976.
6. Razaghiana A., Bahramia A., Emamyb M. The influence of Li on the tensile properties of extruded in situ Al-15 % Mg₂Si composite // Materials Science and Engineering A. – 2012. – P. 346-353.
7. The effect of Li on the tensile properties of cast Al-Mg₂Si metal matrix composite / R. Hadian, M. Emamyb, N. Varahram, N. Nemati // Materials Science and Engineering A. – 2008. – № 490. – P. 250-257.

Поступила 29.04.2014