

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА
ФОЛЬГ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al–Mg–Li**

Столяр И.А.¹, Ташлыкова-Бушкевич И.И.², Шепелевич В.Г.¹

¹УО «Белорусский государственный университет»

220050, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, д.4

E-mail: culyuana@gmail.com

²УО «Белорусский государственный университет

информатики и радиоэлектроники»

220013, Беларусь, г. Минск, ул. П. Бровки, д.6

Многокомпонентные сплавы системы Al–Li широко используются в аэрокосмической и других высокотехнологичных отраслях благодаря низкой плотности, высоким удельным прочности и модулю упругости, устойчивости к коррозионному растрескиванию и коррозионной усталости, а также высокой вязкости при криогенных температурах. Легирование сплавов магнием в сочетании с Zr и редкоземельными элементами (Sc, Er) способствует формированию когерентных наноразмерных выделений типа «ядро–оболочка» со структурой L₁2, улучшая прочностные и коррозионные свойства и расширяя применимость сплавов при повышенных температурах [1, 2]. Однако при традиционном литье сплавов Al–Li и Al–Mg–Li образуются крупные частицы первичных фаз, снижающие прочность и вязкость. Для реализации потенциала наноразмерного упрочнения при последующем отжиге представляют интерес методы высокоскоростной кристаллизации (скорость охлаждения $\geq 10^6$ К/с), обеспечивающие высокую фазовую и структурную гомогенность и позволяющие эффективно модифицировать как существующие, так и новые композиции сплавов.

В работе синтезирован промышленный сплав системы Al–Mg–Li–Sc–Zr марки 1421 методом высокоскоростной кристаллизации с целью исследования термической стабильности микроструктуры, фазового состава и механических свойств быстрозатвердевших (БЗ) фольг в широком температурном диапазоне. Микроструктуру фольг исследовали с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ). Размеры выделений вторых

фаз определяли методом секущих. Измерение микротвёрдости в ходе отжига оценивали по результатам измерений по Виккерсу.

Сверхбыстрая закалка из расплава промышленного деформируемого сплава 1421 ($\text{Al}-5.8\%$ $\text{Mg}-8.1\%$ $\text{Li}-0.03\%$ $\text{Zr}-0.11\%$ Sc) (ат.%) осуществлялась методом одностороннего охлаждения [3] при скорости охлаждения не ниже 10^6 К/с. Полученные фольги имели толщину 60-100 мкм и ширину 5-10 мм. Поперечное сечение свежезакаленных и отожжённых фольг в интервале температур от 80 до 380°C (с выдержкой 1 ч) было изучено с помощью РЭМ в режиме детектирования обратно отраженных электронов. Размер D выделений вторых фаз и их объемную долю V определяли методом секущих с погрешностью $\sim 13\%$. Микротвердость фольг измерялась на приборе MVD 402 Wolpert Wilson Instruments. Использовалась нагрузка в 50 г, время выдержки под нагрузкой составляло 30 с. Погрешность измерений составила 4%.

На основе РЭМ-изображений поперечного сечения свежезакалённых и отожжённых фольг на рис. 1 построены гистограммы распределения магнийсодержащих фаз по размерам, включая (Sc, Zr) -содержащую фазу (X фаза переменного состава $\text{Al}(\text{Mg}, \text{Sc}, \text{Zr}, \text{Li})_x$ типа «ядро–оболочка» [3]) (рис. 1 d). Во всех случаях эмпирические кривые распределения частот имеют чётко выраженный максимум, существенно отклоняются от нормального закона (положительная асимметрия) и с высокой достоверностью аппроксимируются логнормальным законом (табл. 1). Средний размер частиц \bar{D} , определённый методом секущих, превышает моду распределения (x_{\max}) как в свежезакалённых, так и в отожжённых образцах. Коэффициент вариации (CV) составляет более 33 % — порогового значения для однородной совокупности — и выше для отожжённых фольг, что указывает на повышенную неоднородность распределения магнийсодержащих фаз после отжига. По-видимому, это связано с тем, что при низкотемпературном отжиге в сплавах системы Al–Mg происходит коагуляция кластеров легирующих элементов и по всему объему матричного твердого раствора зарождаются зоны Гинье–Престона (ЗГП). Одновременное формирование выделений различного фазового состава в процессе отжига обуславливает

повышенную дисперсность и неоднородность распределения частиц вторых фаз в отожжённых образцах в сравнении с более однородным распределением частиц γ -фазы (Al_3Mg_4) [3] в свежезакалённых фольгах.

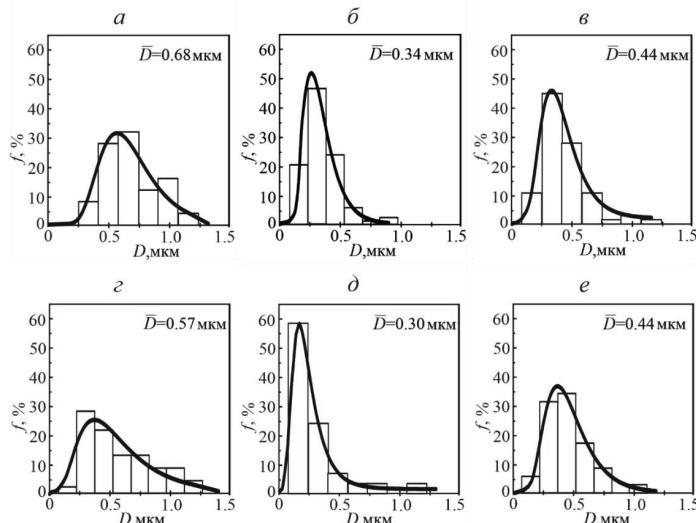


Рисунок 1 – Гистограммы распределения частиц интерметаллидных фаз по размерам и их аппроксимация логнормальным законом:

- (а) — магнийсодержащая γ -фаза в свежезакалённой фольге сплава 1421;
- (б–*э*) — магнийсодержащие фазы в фольгах после отжига при 80°C , 300°C и 380°C соответственно;
- (д) и (е) — (Sc,Zr)-содержащая фаза в фольгах, отожженных при 300°C и 380°C соответственно;
- (*э*) — зависимость суммарной объёмной доли магнийсодержащих фаз от температуры отжига и размера выделений.

Обнаружено, что в качестве характеристики размера выделений предпочтительно использовать среднее значение $\langle x \rangle$, поскольку в этом случае доверительные интервалы, полученные методом секущих и на основе аппроксимации экспериментальных данных логнормальным распределением, находятся в хорошем согласии (см. табл. 1). Ширина и амплитуда f_{\max} пика распределения частиц по размерам изменяются на различных стадиях эволюции выделений — зарождения, роста и коагуляции — что коррелирует с изменением их объёмной доли V (рис. 1 ϵ).

На рис. 2 представлено относительное изменение микротвёрдости фольг сплава 1421 при различных температурах термической обработки. Наибольшее увеличение микротвёрдости в интервале 300–380 °С обусловлено упрочняющим вкладом дисперсных выделений Li-содержащих фаз S_1 (Al_2LiMg) и X [3]. В то же время рост среднего размера магнийсодержащих выделений с ростом температуры отжига и сопровождающийся снижением их суммарной объёмной доли не приводит к разупрочнению материала.

Таблица 1.
Влияние термической обработки на распределение частиц интерметаллидных фаз по размерам в фольгах сплава 1421

Анализ	Метод секущих		OriginPro				
	\bar{D} , мкм	V , %	x_{max} , мкм	$\langle x \rangle$, мкм	f_{max} , %	CV, %	COD (R^2)
Магнийсодержащие фазы							
Свежезакаленная фольга	0,68	1,12	0,66	0,64	32,0	38,38	0,89
$T_{отж} = 80^\circ C$	0,34	11,66	0,25	0,30	51,97	45,56	0,98
$T_{отж} = 300^\circ C$	0,44	10,48	0,32	0,38	44,65	43,73	0,99
$T_{отж} = 380^\circ C$	0,57	1,97	0,37	0,51	25,27	71,0	0,83
(Sc, Zr)-содержащая фаза							
$T_{отж} = 300^\circ C$	0,30	0,58	0,16	0,21	57,15	62,79	0,99
$T_{отж} = 380^\circ C$	0,44	1,15	0,37	0,44	36,70	45,91	0,98

Таким образом, обнаружено, что микроструктура свежезакалённых и отожжёных фольг сплава 1421 характеризуется логнормальным распределением размеров интерметаллидных выделений с высокой степенью достоверности аппроксимации ($R^2 = 0,83\text{--}0,99$). При высокотемпературном отжиге в микроструктуре преобладают включения вторых фаз, характерный размер которых на $\sim 25\%$ ниже среднего значения. В ходе термической обработки наблюдается рост степени структурной неоднородности, что проявляется в увеличении коэффициента вариации распределения частиц. Эволюция ширины и амплитуды пиков распределения частиц магнийсодержащих и (Sc,Zr)-содержащей фаз

отражает изменение их объёмной доли на последовательных стадиях структурно-фазовых превращений, что свидетельствует о тесной взаимосвязи между кинетикой выделения, морфологией частиц и фазовой стабильностью в условиях термической обработки. Установлено упрочнение фольг при высокотемпературном отжиге, обусловленное выделением дисперсных Li-содержащих метастабильных фаз. Максимальное повышение микротвёрдости зафиксировано в интервале температур 300-380 °C, когда формируются частицы фазы X размером около 0,3-0,4 мкм.

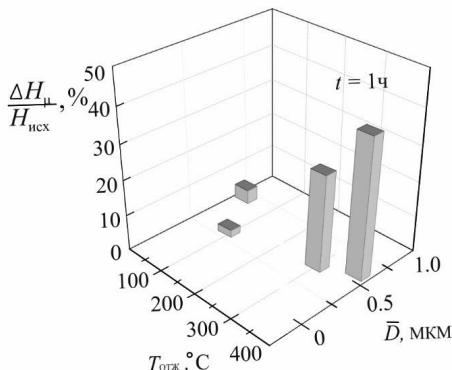


Рисунок 2 – Зависимость относительного изменения микротвёрдости фольг сплава 1421 от среднего размера магнийсодержащих выделений при изотермическом отжиге в различных температурных режимах

Литература

1. Захаров В. В., Филатов Ю. А. Обзор состояния и перспектив применения алюминиевых сплавов со скандием в российской промышленности // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2025. – №. 2. – С. 36-43.
2. Wang Y, Liu H., Ma X., Wu R., Sun J., Hou L., Zhang J., Li X., Zhang M. Effects of Sc and Zr on microstructure and properties of 1420 aluminum alloy //Materials Characterization. – 2019. – Vol. 154. – P. 241-247.
3. Столляр И. А., Шепелевич В. Г., Ташлыкова-Бушкевич И. И., Wendler E. Ядерно-физическое исследование состава поверхностных слоев быстро затвердевших фольг сплава Al–Mg–Li–Sc–Zr после термообработки // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023. – № 2. – С. 23-32.