

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ МИКРОСТРУКТУРЫ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШЕГО СПЛАВА Al-Mg-Li-Sc-Zr

¹Бушкевич И.А. *, ¹Бородын А.В., ²Фишкина Ю.Э., ²Ташлыкова-Бушкевич И.И.

¹Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, 220050, Минск, Беларусь

² Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, ул. П. Бровки, 6220013, Минск, Беларусь

* *uyluana@gmail.com*

Введение

Необходимость достижения высоких эксплуатационных характеристик алюминиевых сплавов требует их легирования редкоземельными и переходными металлами. Целью настоящей работы является исследование изменения микроструктуры быстрозатвердевшего сплава 1421 системы Al-Mg-Li-Sc-Zr при термической обработке для того, чтобы за счет использования высокоскоростной кристаллизации повысить предельные рабочие температуры сплава в результате повышенного содержания легирующих элементов в твердом растворе и формирования метастабильных фаз. К достоинствам сплавов этой системы относятся малая плотность, повышенный модуль упругости, достаточно высокие прочность и коррозионная стойкость [1], что особенно важно в аэрокосмической технике.

Методика эксперимента

Фольги сплава 1421 (Al-5,5% Mg-2,2% Li-0,12% Zr-0,2% Sc) (мас.%) были получены сверхбыстрой закалкой из жидкой фазы методом одностороннего охлаждения. Скорость охлаждения расплава была порядка 10^6 К/с. Толщина фольг составила 40-80 мкм.

Изучение микроструктуры и фазового состава поперечного сечения фольг проводилось с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ): микроскоп марки LEO1455VP с приставкой "HKL CHANNEL5". При локальном микрорентгеноспектральном анализе учитывался контраст областей структуры фольг, исследованных методом РЭМ, поскольку включения, сформированные атомами с более высокой атомной массой, чем Al, имеют более светлый контраст на РЭМ изображениях, полученных в обратно отраженных электронах. Рентгеноструктурный анализ выполнялся на дифрактометре Rigaku Ultima IV с использованием Cu_α излучения. Изотермический отжиг фольг проводился в интервале температур от 80 °С до 480 °С, время изотермической выдержки - 1 ч. Для измерения длины хорд сечений l выделений вторых фаз, их объемной доли V и удельной поверхности межфазных границ S в образцах применялся метод секущих.

Результаты и их обсуждение

В настоящем исследовании обнаружено, что в результате высокоскоростной кристаллизации свежезакаленный сплав 1421 имеет двухфазную структуру (рис. 1 а), поскольку содержит кроме пересыщенного α -твердого раствора незначительное количество первичных частиц (Sc, Zr)-содержащей фазы. По данным ряда авторов указанная фаза имеет сложный состав $\text{Al}(\text{Mg}, \text{Sc}, \text{Zr}, \text{Li})_x$ [2]. После естественного старения в течение 5 ч в микроструктуре фольг также наблюдаются темные выделения, в состав которых входит Mg. Найдено, что V и S для светлых выделений составляет 0,09 % и $0,01 \text{ мкм}^{-1}$, а для темных – 0,23 % и $0,03 \text{ мкм}^{-1}$, соответственно, рис.1 б.

Получено, что в интервале температур отжига 80-280 °С продолжается образование и рост в пересыщенном растворе фольг выделений промежуточной Mg-содержащей фазы (V и

S составляют 5,90 % и $0,34 \text{ мкм}^{-1}$ соответственно при $80 \text{ }^\circ\text{C}$, рис. 1 б и е). Анализ литературных данных позволяет заключить, что в результате процесса укрупнения кластеров легирующих элементов при низкотемпературном отжиге по всему объему матричного твердого раствора зарождаются зоны Гинье-Престона (ЗГП). Наблюдается последовательность превращений $\text{ЗГП} \rightarrow \beta' (\text{Mg}_5\text{Al}_8) \rightarrow \beta (\text{Al}_3\text{Mg}_2)$: с $47 \text{ }^\circ\text{C}$ до $277 \text{ }^\circ\text{C}$ происходит выделение метастабильной β' -фазы, β -фаза образуется при температурах около $200 \text{ }^\circ\text{C}$ и выше до $375\text{-}400 \text{ }^\circ\text{C}$ [3].

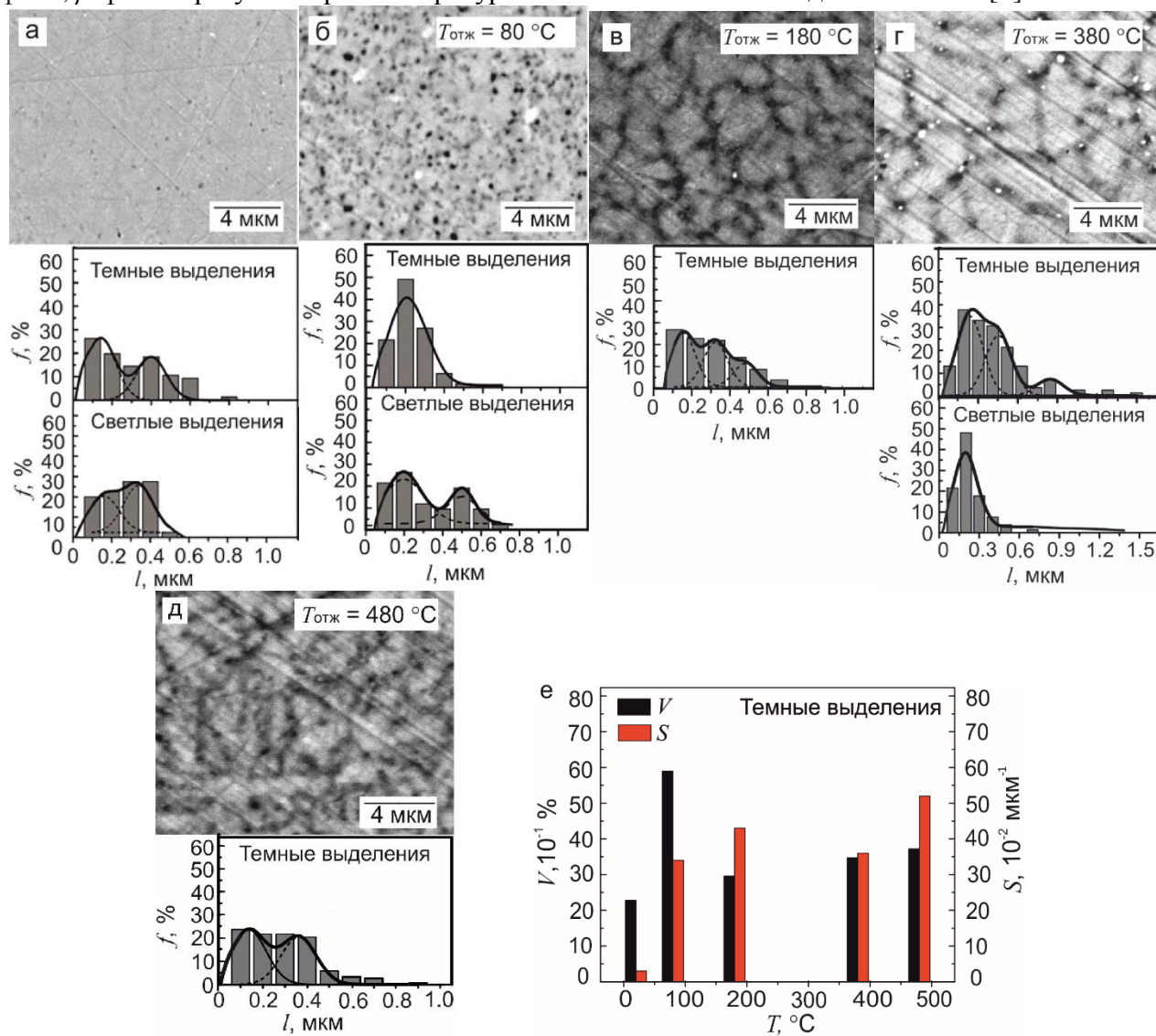


Рисунок 1. Микроструктура поперечного сечения и стереологический анализ выделений в фольгах сплава 1421 после отжига (а-д); зависимость V и S от температуры отжига (е)

На границах зерен фольг, отожженных при $180 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 1 в), наблюдается коагуляция частиц β' -фазы, что приводит к снижению объемной доли темных выделений до 2,96 % (рис. 1 е). Дополнительно отметим, что в интервале температур отжига $130\text{-}220 \text{ }^\circ\text{C}$ происходит выделение ($110\text{-}190 \text{ }^\circ\text{C}$) и растворение при $230 \text{ }^\circ\text{C}$ упрочняющей δ' -фазы (Al_3Li). Кроме δ' -фазы в сплаве 1421 выделяется упрочняющая фаза $S_1 (\text{Al}_2\text{MgLi})$, наибольшая плотность выделений которой наблюдается в диапазоне $270\text{-}370 \text{ }^\circ\text{C}$ [3].

Обнаружено, что после отжига при 380 °С микроструктура фольг на рис. 1 *з* содержит вторичные частицы фазы Al(Mg, Sc, Zr, Li)_x, которые выделяются по границам зерен. Их *V* и *S* составляют 1,15 % и 0,20 мкм⁻¹ соответственно. На рис. 1 *з* дополнительно видно, что границы зерен – это также места преимущественного выделения частиц фазы *S*₁. Объемная доля темных выделений составляет 3,47 % при удельной поверхности межфазных границ равной 0,36 мкм⁻¹. В фольгах, отожженных при 480 °С, установлено растворение частиц Al(Mg, Sc, Zr, Li)_x фазы. Часть частиц *S*₁-фазы сохраняется (*V* темных выделений остается неизменной при росте *S* до 0,52 мкм⁻¹).

Для определения преимущественной ориентации зерен в фольгах были вычислены значения полюсной плотности дифракционных линий. Как следует из таблицы 1, в фольгах формируется текстура {111}, которая начинает ослабевать при температурах отжига выше 350 °С. Факт частичного сохранения текстуры {111} до 450 °С указывает на то, что процессы рекристаллизации не успевают завершиться в изученном интервале температур отжига, по-видимому, поскольку часть частиц фазы *S*₁ сохраняется на границах зерен до 500 °С.

Таблица 1. Изменение полюсной плотности дифракционных линий фольг сплава 1421 после изотермического отжига

Дифракционная линия	Полюсная плотность (P_{hkl}) в зависимости от температуры отжига									
	20° С	80° С	130° С	180° С	220° С	280° С	309° С	350° С	400° С	450° С
111	2.7	2.6	2.7	2.9	2.9	2.5	2.5	2.5	2.4	2.2
200	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	0.5	0.4	0.6	0.4
220	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4
311	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.7
331	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	1.1	1.2	1.2	1.1	1.3

Заключение

Выполненное исследование демонстрирует, что применение сверхбыстрой закалки из расплава позволяет модифицировать микроструктуру промышленного алюминиевого сплава 1421 и получить микрокристаллические фольги, которые состоят из пересыщенного твердого раствора и незначительного количества дисперсных первичных частиц (Sc, Zr)-содержащей фазы, имеющей сложный состав Al(Mg, Sc, Zr, Li)_x. Обнаружено, что БЗ сплав 1421 имеет высокую температуру рекристаллизации за счет выделения дисперсных частиц фаз Al(Mg, Sc, Zr, Li)_x и *S*₁ на границах зерен. Полученные результаты указывают на перспективность изучения влияния микроструктуры и фазового состава на физико-химические свойства БЗ сплава 1421 для определения оптимальных режимов его термической обработки, чтобы обеспечить высокий уровень комплекса физико-механических свойств данного материала.

Авторы благодарны профессору Шепелевичу В. Г. (БГУ) за предоставленные образцы и обсуждение полученных результатов.

Литература

- [1] Yu. Buranova, V. Kulitskiy, M. Peterlechner, A. Mogucheva, R. Kaibyshev, S.V. Divinski, G. Wilde. Acta Materialia 124, 210 (2017).
- [2] A. Mogucheva, R. Kaibyshev. Metals 6, 254 (2016).
- [3] И.Н. Фридляндер, О.Г. Сенаторова, О.Е. Осинцев [и др.]. Машиностроение: энциклопедия. Т. II-3. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы / Под ред. К.В. Фролова (пред.). Машиностроение, М. (2001). 880 с.