

Министерство образования Республики Беларусь

Научно-исследовательское учреждение
«ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ
ИМЕНИ А.Н.СЕВЧЕНКО»
Белорусского государственного университета

**Прикладные проблемы оптики,
информатики, радиофизики и физики
конденсированного состояния**

*Материалы пятой
Международной научно-практической
конференции*

16 – 17 мая 2019 года

Минск, 2019

**РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ
В БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШЕМ СПЛАВЕ Al-Mg-Li-Sc-Zr ПРИ ОТЖИГЕ**¹Белорусский государственный университет. Минск, Республика Беларусь.²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.

Минск, Республика Беларусь

Методом рентгеноструктурного анализа изучен фазовый состав быстрозатвердевших фольг авиационного алюминиевого сплава 1421. Определены температурные интервалы фазовых превращений в фольгах при последовательных изохронных отжигах. Обнаружено, что упрочняющая (Sc, Zr)-содержащая фаза распадается при температурах отжига выше 400°C с выделением фазы Al₃Sc.

В настоящее время активно исследуются сплавы систем Al-Mg и Al-Li, легированные редкоземельным элементом скандием. олученные материалы имеют высокие прочностные и другие механические свойства (увеличение предела текучести и др.) благодаря повышению температуры рекристаллизации. При термической обработке таких сплавов происходит выделение упрочняющих фаз – δ (Al₃Li) и S_1 (Al₂LiMg). Также на дисперсионное упрочнение оказывают влияние интерметаллиды, в состав которых входит Sc и/или Zr, образующиеся при кристаллизации или при распаде пересыщенного твердого раствора в процессе тепловой обработки [1]. В работах [2, 3] представлены результаты о том, что совместное легирование Sc и Zr алюминиевых сплавов обеспечивает наилучшее сочетание таких свойств как прочность и пластичность.

При исследовании упрочнения фольг авиационного алюминиевого сплава 1421 системы Al-Mg-Li-Sc-Zr, полученных сверхбыстрой закалкой из расплава (СБЗР), нами установлено наличие трех температурных интервалов упрочнения образцов при термической обработке [4]. С целью исследования фазовых превращений при отжиге быстрозатвердевших (БЗ) образцов сплава 1421 в данной работе выполнен рентгеноструктурный анализ фольг при последовательных изохронных отжигах. Исследования фольг алюминиевого сплава 1421 (Al-5.5% Mg-2.2% Li-0.12% Zr-0.2% Sc) (мас.%), полученных сверхбыстрой закалкой из жидкой фазы методом одностороннего охлаждения, были выполнены методом рентгеновского фазового анализа на дифрактометре Rigaku Ultima IV в излучении Cu-K α . Скорость охлаждения расплава составляла 10⁶ К/с [5]. При выполнении фазового анализа была использована БД ICDD PDF-2 (2013). Отжиг фольг проводился при температурах 80°C, 130°C, 180°C, 220°C, 280°C, 309°C, 350°C, 400°C, 450°C с выдержкой 20 мин при каждой температуре.

В результате фазового анализа в структуре фольг сплава 1421, полученных сверхбыстрой кристаллизацией, обнаружены такие фазы как Al₃Zr и γ -фаза (Al₃Mg₄) (рис. 1 а). Ряд дополнительных отражений на дифрактограммах может также принадлежать β -фазе (Mg₅Al₈). Получено, что на поверхности образцов присутствуют оксиды магния (MgO) и лития (Li₂O₂). При повышении температуры отжига до 80°C наличие новых фаз не выявлено. При температурах отжига 180°C и 220°C наблюдаются выделения δ -фазы (Al₃Li) (рис. 1 б). С ростом температуры отжига интенсивность ее линий возрастает. Ожидаемые рефлексы фазы Al₃Li в образце, отожженном при 130°C, не зафиксированы, по-видимому, из-за их малой интенсивности. На дифрактограммах образцов, отожженных в интервале температур от 180°C до 350°C, появляются линии δ -фазы (AlLi) (рис. 1 в). При температурах отжига 280°C–450°C возникают линии фазы S_1 (рис. 1 г). β -фаза (Al₃Mg₂) присутствует в образцах, отожженных при температурах, начиная с 220°C и выше (рис. 1 е). Рефлексы фазы Al₃Sc отчетливо присутствуют на дифрактограммах, полученных после отжига при 450°C (рис. 1 д). Дополнительно обнаружено, что при температуре отжига фольг 450°C образуется оксид Li₂CO₃.

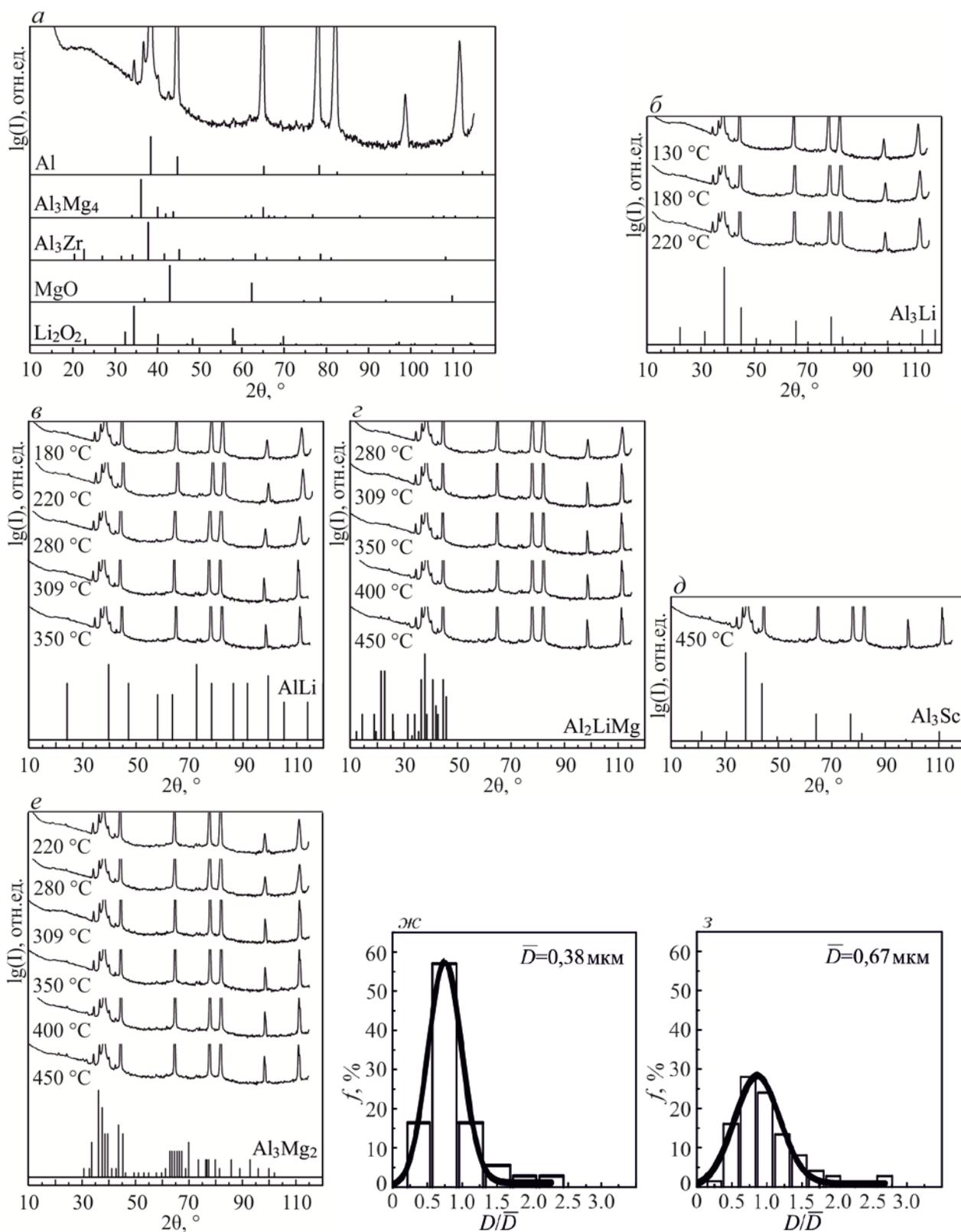


Рисунок 1. Дифрактограммы образцов фольг сплава 1421 – неотоженная свежезакаленная фольга (а), отожженные при различных температурах образцы, содержащие фазы Al_3Li (б), AlLi (в), Al_2LiMg (г), Al_3Sc (д), Al_3Mg_2 (е), – и распределение по размерам выделений (Sc, Zr)-содержащей фазы X (ж) и магнийсодержащих фаз (з) в образце, отожженном при 380°C в течение 30 мин.

Таким образом, можно сделать вывод, что температурные интервалы выделения фаз в литых образцах сплава 1421 [6] и образцах, полученных СБЗР, достаточно хорошо согласуются. Однако, следует отметить, что в результате формирования пересыщенного твердого

раствора при СБЗР, при термической обработке сплавов системы Al-Mg-Li наблюдается ускоренный распад твердого раствора с выделением интерметаллидных фаз (в сравнении с литыми образцами) и скорость фазовых превращений выше [6, 7].

Проведенный рентгеноструктурный анализ не позволяет из-за отсутствия соответствующей карточки БД ICCD PDF-2 проиндексировать рефлексы выделений метастабильной (Sc, Zr)-содержащей фазы X в виде светлых частиц размером около 0,38 мкм (рис. 1 ж), которые ранее были обнаружены нами методом растровой электронной микроскопии в фольгах, отожженных при 300°C [4]. Распределение по размерам выделений фазы X и магнийсодержащих фаз в фольгах после отжига при 380°C показано на рис. 1 ж, з. Полученные результаты указывают на то, что данная фаза X после отжига при температуре 450°C распадается с выделением фазы Al₃Sc. Приведенные в работе [8] данные о влиянии скорости кристаллизации на структурно-фазовые превращения в Al-Mg-Sc сплавах согласуются со сделанными выводами в настоящем исследовании. В [8] сообщается об аномальном пересыщении твердого раствора скандием и формировании в процессе СБЗР фазы Al(Mg, Sc)_x, которая распадается при 450°C с выделением частиц фазы Al₃Sc.

Список литературы

1. Корягин, Ю. Д. Структура и свойства алюминиевого сплава 1421, подвергнутого пластической деформации и термообработке / Ю. Д. Корягин, В. И. Крайнов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Металлургия. – 2017. – № 3. – С. 64-72.
2. Федорчук, В. Е. Особенности легирования скандием металла швов сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов / В. Е. Федорчук, О. С. Кушнарева, Т. А. Алексеевко, Ю. В. Фальченко // Автоматическая сварка. – 2014. – № 5. – С. 30-34.
3. Knipling, K. E. Precipitation evolution in Al–0.1Sc, Al–0.1Zr and Al–0.1Sc–0.1Zr (at.%) alloys during isochronal aging / K.E. Knipling, R. A. Karnesky, C. P. Lee, D. C. Dunand, D. N. Seidman Acta Mater. – 2010. – Vol. 58. – P. 5184–5195.
4. Бушкевич, И. А. Влияние микроструктуры на микротвердость быстрозатвердевших фольг сплава Al-Mg-Li-Sc-Zr / И. А. Бушкевич, В. Г. Шепелевич // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11–12 мая 2017 г. / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ “Ин-т приклад. физ. проблем им. А.Н. Севченко” Белорус. гос. ун-та; редкол.: В. И. Попечиц (гл. ред.), Ю. И. Дудчик, Г. А. Сенкевич. – Минск : Изд. центр БГУ. – 2017. – С. 234-236.
5. Бушкевич, И. А. Термическая стабильность микроструктуры быстрозатвердевшего сплава Al-Mg-Li-Sc-Zr / И. А. Бушкевич, А. В. Бородын, Ю. Э. Фишкина, И. И. Ташлыкова-Бушкевич // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докл. VIII Междунар. науч. конф., 24-28 сент. 2018 г., Минск. В 3 т. Т. 1. – Минск: Ковчег. – 2018. – С. 134-136.
6. Алиева, С. Г. Промышленные алюминиевые сплавы: справ. изд. / С. Г. Алиева, М. Б. Альтман, С. М. Амбарцумян // Metallurgia. – 1984. – 528 с.
7. Степанова, М. Г. Влияние больших скоростей охлаждения на структуру Al-Mg-Li / М. Г. Степанова, В. И. Валяева, Н. С. Герчикова // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka. – 1983. – № 7. – С. 22-25.
8. Березина, А. Л. Влияние скорости кристаллизации на аномальное пересыщение Al-Mg-Sc сплавов / А. Л. Березина, Е. А. Сегиды, Т. А. Монастырская, А. В. Котко // Metallofizika i novейшие tekhnologii. – 2008. – № 6. – С. 849-857.