

Научная статья

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-39-49

ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ Al–Li-СПЛАВОВ ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Е.А. Лукина¹, С.А. Наприенко¹, М.А. Горбовец¹, Д.В. Зайцев¹, Ю.С. Оглодкова¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Методами рентгеноструктурного анализа, оптической и электронной микроскопии исследованы структура и фазовый состав прессованных полуфабрикатов из двух партий сплава 1420 в состояниях после естественного и искусственного старения. Определены механические свойства, размеры и характер выделения упрочняющих фаз, проанализированы значения периодов решетки матрицы и фазы прессованных профилей сплава 1420. Проведен сравнительный, структурный анализ с холоднокатаными полуфабрикатами сплава 1424 – после старения, а также дополнительных, длительных низкотемпературных нагревов.

Ключевые слова: Al–Li-сплавы, старение, нагревы, излом, δ' -фаза, S_1 -фаза, период решетки, механические свойства, просвечивающая электронная микроскопия, растровая электронная микроскопия

Для цитирования: Лукина Е.А., Наприенко С.А., Горбовец М.А., Зайцев Д.В., Оглодкова Ю.С. Изменения структурно-фазового состояния холоднодеформированных полуфабрикатов из Al–Li-сплавов после различных низкотемпературных воздействий // Труды ВИАМ. 2023. № 1 (119). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-39-49.

Scientific article

CHANGES IN THE STRUCTURAL AND PHASE STATE OF COLD-FORMED SEMI-FINISHED PRODUCTS FROM Al–Li-ALLOYS AFTER VARIOUS LOW-TEMPERATURE EFFECTS

E.A. Lukina¹, S.A. Naprienko¹, M.A. Gorbovets¹, D.V. Zaitsev¹, Yu.S. Oglochkova¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The structure and phase composition of pressed semi-finished products from two batches of alloy 1420 in states after natural and artificial aging have been studied by x-ray diffraction analysis, optical and electron microscopy. The mechanical properties, dimensions and character of the separation of the hardening phases are determined, the values of the lattice periods of the matrix and the phase of the pressed profiles of alloy 1420 are analyzed. A comparative structural analysis was carried out with cold-rolled semi-finished products of alloy 1424 – after aging, as well as additional, long-term low-temperature heating.

Keywords: Al–Li-alloys, aging, heating, fracture, δ' -phase, S_1 -phase, lattice period, mechanical properties, transmission electron microscopy, scanning electron microscopy

For citation: Lukina E.A., Naprienko S.A., Gorbovets M.A., Zaitsev D.V., Oglochkova Yu.S. Changes in the structural and phase state of cold-formed semi-finished products from Al–Li-alloys after various low-temperature effects. *Trudy VIAM*, 2023, no. 1 (119), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-39-49.

Введение

Алюминий-литиевые сплавы системы Al–Mg–Li [1–7] являются весьма перспективными для применения в самолето- и вертолетостроении благодаря хорошему сочетанию механических свойств, малой плотности и повышенного модуля упругости. Снижение массы – одна из наиболее актуальных задач конструирования летательных аппаратов, которая эффективно решается заменой широко применяемого алюминиевого сплава Д16 на алюминий-литиевые сплавы. Однако Al–Li-сплавам свойственен один недостаток – низкая пластичность в состоянии максимальной прочности.

Сплав 1420 принадлежит к сплавам первого и начала второго поколения и характеризуется невысокой технологичностью при изготовлении полуфабрикатов и деталей, особенно при холодной пластической деформации. Сплавы третьего поколения отличаются пониженным содержанием Li и дополнительным легированием Zn, к этому классу можно отнести сплав 1424. Эти сплавы характеризуются повышенными технологичностью при деформации и вязкостью разрушения.

Помимо ограничения содержания лития, для повышения пластичности также используют легирование (в первую очередь Cu и Mg), которое влияет на характер распада твердого раствора [2].

Все промышленные Al–Li-сплавы характеризуются высоким легированием и сложностью фазовых превращений при старении. Структура полуфабрикатов из сплавов Al–Li, которая характеризуется высокой плотностью выделений стабильных фаз на границах зерен и наличием пограничных свободных от выделений зон, строчечным расположением избыточных фаз влияет на уровень коррозионной стойкости, пластичности и вязкости разрушения.

Сочетание пониженной плотности, высокого модуля упругости, высокой коррозионной стойкости и свариваемости определяет большое практическое значение сплава 1420. Применение сплава 1420 взамен дюралюмина Д16 обеспечивает снижение массы конструкций на 10–12 % [6, 7].

Вместе с тем сплав 1420 более чувствителен к концентраторам напряжений (чем сплав Д16) и характеризуется значительной анизотропией механических свойств. Неравномерность механических свойств в полуфабрикатах вообще свойственна алюминий-литиевым сплавам 1420 и 1424 и в значительной степени зависит от характера микроструктуры и неравномерного распределения упрочняющих фаз. На прессованных полуфабрикатах сплава 1420 (профилях и прутках) анизотропия свойств проявляется в большей степени по пределу текучести. В то же время известно, что кристаллографическая текстура оказывает существенное влияние на анизотропию свойств [6].

Для формирования в различных полуфабрикатах регламентированной микроструктуры (от нерекристаллизованной до полностью рекристаллизованной) в зависимости от требуемого уровня механических свойств в Al–Li-сплавы вводят элементы антирекристаллизаторы и редкоземельные элементы, в том числе Zr и Sc, оказывающие сильное влияние на формирование микроструктуры в полуфабрикатах при их изготовлении. Например, добавки Sc в Al–Li-сплавы приводят к измельчению зерна и активизируют субструктурное упрочнение [8, 9], а также препятствуют огрублению основной упрочняющей фазы Al_3Li за счет уменьшения коэффициента диффузии [10]. Вместе с тем в структуре уже при гомогенизационном отжиге образуются композиционные частицы $Al_3(Zr, Sc)$, которые могут оказывать упрочняющее влияние на микроструктуру и являться местами для гетерогенного зарождения δ' -фазы при старении.

В связи с тем, что алюминиевые сплавы, легированные литием, отличаются сложностью фазового состава, возникают проблемы, связанные со стабильностью

свойств при эксплуатации в результате длительных низкотемпературных нагревов. Основной упрочняющей фазой для таких Al–Li-сплавов, как 1420 и 1424, является δ' (Al₃Li)-фаза. По оценочным данным, после искусственного старения твердый раствор может быть пересыщен при температуре 20 °С по Li – до 0,5 % (по массе). Вследствие чего при длительном старении в ходе низкотемпературных эксплуатационных нагревов твердый раствор данных сплавов может дораспадаться с выделением мелкодисперсной δ' -фазы, химический состав которой отличается от исходной δ' (Al₃Li)-фазы [11–13]. Кроме того, Li – химически активный элемент, обладающий высокой диффузионной подвижностью, что облегчает его миграцию к границам зерен при циклических нагрузках и разогревах при эксплуатации [2].

Таким образом, структурно-фазовые факторы, отвечающие за стабильность свойств, оказывают существенное влияние на характеристики трещиностойкости, вязкости разрушения, коррозионной стойкости и требуют повышенного внимания и системного изучения [14–17]. Цель данной работы – изучение структурно-фазового состояния холоднодеформированных полуфабрикатов из Al–Li-сплавов марок 1420 и 1424 после длительных низкотемпературных воздействий и естественного старения.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования взяты образцы прессованного профиля из сплава 1420 и листа из сплава 1424 толщиной 4,5 мм. Профиль из сплава 1420 исследован после естественного старения в течение 10 лет. С целью проведения сравнения структуры и фазового состава сплава 1420 непосредственно после искусственного и естественного старения произведены перезакалка и старение образцов по режиму ТГ1. Для сплава 1424 в качестве предварительного старения выбрано разработанное в работе [6] трехступенчатое старение в интервале температур 85–120 °С, которое обеспечивает термическую стабильность по показателю вязкости разрушения при низкотемпературном (85 °С) нагреве до 3000 ч. Изучена структура листов из сплава 1424 в ходе дополнительных нагревов при температуре 85 °С длительностью от 1000 до 7500 ч.

Определение химического состава материала выполнили на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 5100.

Для испытаний при растяжении изготовлены образцы профилей шириной 10 мм и толщиной, соответствующей толщине профиля (~2 мм), и длиной рабочей части, составляющей 30 мм. Испытание при растяжении образцов проводили на испытательной машине Zwick/Roell Z030 в соответствии с ГОСТ 11701–84.

Фрактографические и микроструктурные исследования проводили методами оптической и растровой электронной микроскопии на металлографическом комплексе фирмы Olympus и растровом микроскопе Zeiss EVO MA10.

Исследования фазового состава и параметров кристаллической решетки обнаруженных фаз проводили с применением многофункционального дифрактометра EMPYREAN фирмы PanAlytical. Регистрацию дифрактограмм проводили в монохроматическом Cu K α -излучении в геометрии Брэгга–Брентано. Расшифровку дифрактограмм для рентгенофазового анализа проводили с помощью специализированной программы HighScore+ и базы данных PDF-2 2014.

Исследования зеренной структуры, фазовый анализ и локальный рентгеноспектральный анализ проводили методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе Tecnai G2 F20 S-TWIN фирмы FEI, оснащенном энергодисперсионным анализатором X-Max 80T с разрешением 122 эВ.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты

Результаты механических испытаний показали, что пределы прочности и текучести образцов из сплава 1420 после естественного старения на 25–35 % превышают уровень характеристик образцов непосредственно после перезакалки и старения по режиму ТГ1 (табл. 1). В ходе длительных нагревов, имитирующих эксплуатационные, механические свойства прессованных профилей из сплава 1424 также изменяются, однако данные изменения составляют 5–10 %.

Таблица 1

Механические характеристики прессованных профилей из алюминий-литиевых сплавов после 10 лет естественного старения (е.с.) (средние значения) и длительных низкотемпературных нагревов (ТГ1)

Сплав	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа		Предел прочности σ_B , МПа		Относительное удлинение δ_5 , %	
	после ТГ1	после 10 лет е.с.	после ТГ1	после 10 лет е.с.	после ТГ1	после 10 лет е.с.
1420	305	382	475	550	10,5	6,1
1424	Б/н	85 °С + 1000 ч	85 °С + 2000 ч	Б/н	85 °С + 1000 ч	85 °С + 2000 ч
	340	340	365	440	460	480
Примечание. Б/н – без нагрева.						

Образцы прессованного профиля из сплава 1420 и листа из сплава 1424 имеют частично рекристаллизованную и преимущественно нерекристаллизованную структуру соответственно (рис. 1).

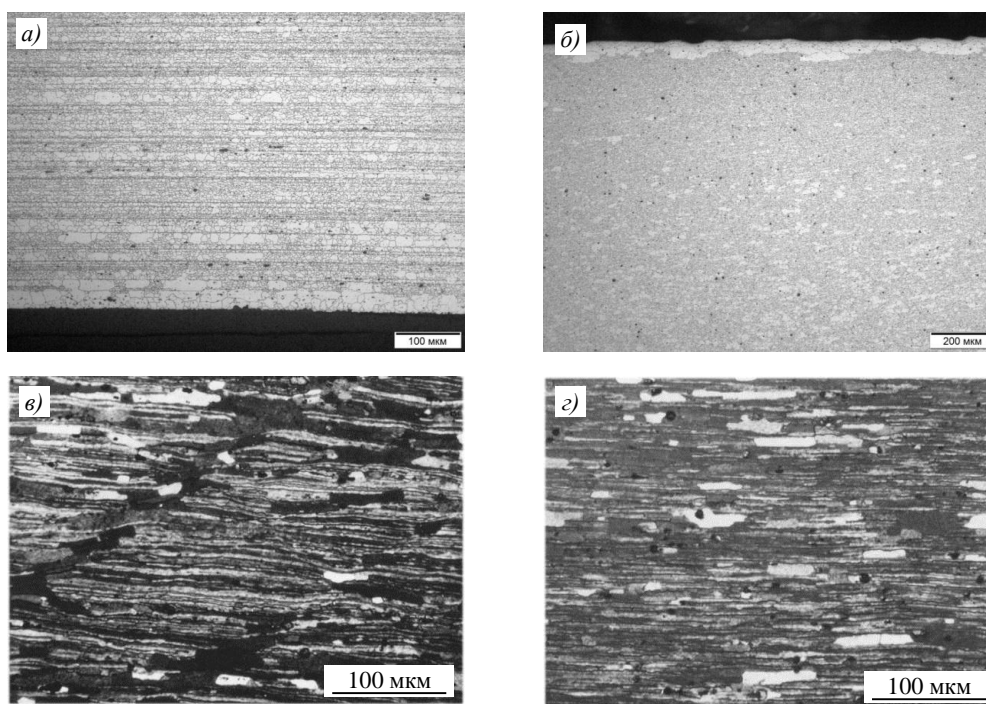


Рис. 1. Микроструктура профиля из сплава 1420 (а, б) и холоднокатаного листа сплава 1424 (в, г) в продольном (а, в) и поперечном (б, г) направлениях

С применением рентгеновского анализа установлен фазовый состав сплавов 1420 и 1424. Выявлены следующие фазы: Al – твердый раствор, $\delta'(Al_3Li)$, $S_1(Al_2LiMg)$. На рентгенограммах исследуемых сплавов в искусственно состаренном состоянии форма линий, принадлежащих δ' -фазе, близка к симметричной. После длительных низкотемпературных нагревов, а также естественного старения наблюдается асимметрия

рентгеновских линий $(100)_{\delta'}$, $(110)_{\delta'}$ и $(210)_{\delta'}$ δ' -фазы. Данная асимметрия направлена в сторону малых углов (рис. 2).

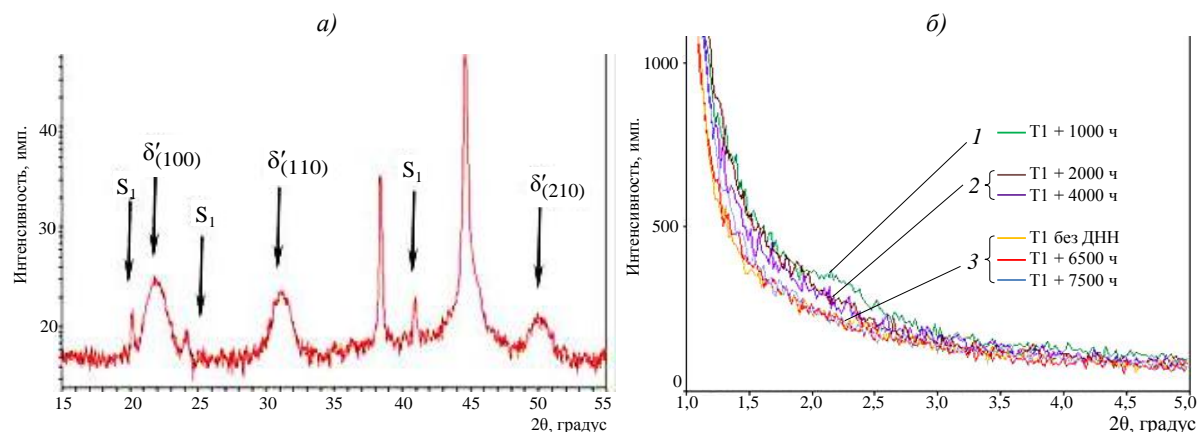


Рис. 2. Исследования профиля рентгеновских линий сплава 1424: рентгенограммы после трехступенчатого старения при температуре 85 °С в течение 2000 ч (а) и в области малых брэгговских углов (1–5 градусов) (б) при термообработке по режиму Т1 с различной продолжительностью выдержки (2 и 3 – совпадающие профили; ДНН – длительный низкотемпературный нагрев) [11]

Проведены исследования профилей интенсивности рентгеновских линий для сплава 1424 после нагревов при температуре 85 °С в течение 1000, 2000 и 4000 ч в области малых брэгговских углов – от 1 до 5 градусов. Отмечено дополнительное уширение нулевой рентгеновской линии для выдержек до 2000 ч.

Методом полнопрофильного рентгеновского анализа экспериментального спектра проведено уточнение параметров решетки матрицы и δ' -фазы для сплавов 1424 и 1420. Определение параметра решетки проводили для твердого раствора Al (Fm3m) и фазы Al_3Li ($L1_2$). Профиль линии описывается функцией Войта (свертка функций Гаусса и Лоренца). Полученные данные для сплава 1420 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения периодов решетки структурных составляющих в прессованных профилях из сплава 1420 в различных состояниях

Состояние	Период решетки a , нм	
	Al	Al_3Li (δ')
После естественного старения в течение 10 лет	0,407321	0,40675
Закаленное	0,407412	0,406413
После естественного старения в течение 10 лет + режим ТГ1	0,407254	0,406418

Аналогичные изменения параметра решетки фазы и матрицы в ходе имитационных нагревов характерны и для сплава 1424.

Следует отметить изменение периода решетки твердого раствора в зависимости от состояния материала. Максимальные значения периода решетки характерны для состояния после закалки. Кроме того, наблюдаются изменения периода решетки δ' -фазы.

Исследования светлопольными методами просвечивающей микроскопии образцов прессованных профилей из сплава 1420 показали, что структура субзеренная с размером субзерен от 2 до 4 мкм (рис. 3, б). Для участка с нерекристаллизованной структурой характерна высокая плотность дислокаций и большое количество малоугловых границ, что свидетельствует о достаточной степени наклепа.

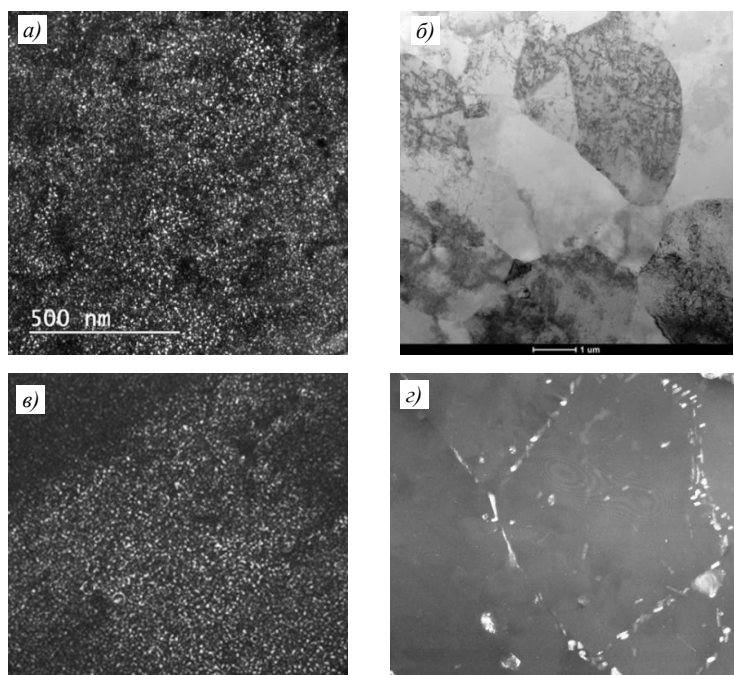


Рис. 3. Выделения δ' -фазы для сплава 1420 после длительного естественного старения (а) и сплава 1424 после нагрева при температуре 85 °С в течение 4000 ч (б); б – субзеренная структура сплава 1420; в – темнопольное изображение выделений S_1 -фазы

В структуре образцов из сплава 1420 после длительного естественного старения и из сплава 1424 после применения нагрева 1000 ч и более наблюдаются как отдельные дискретные выделения S_1 -фазы (Al_2LiMg) на границах и стыках зерен, так и однородно распределенные вдоль границ (рис. 3, в). На стыках зерен данные частицы более крупные – размером 0,5–1 мкм.

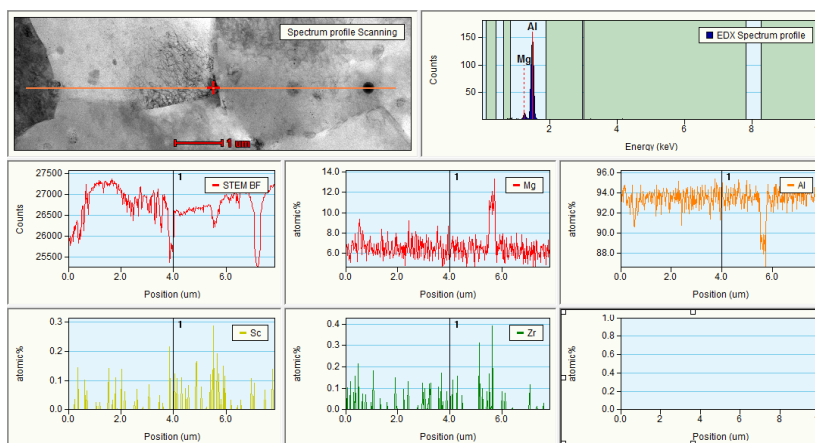


Рис. 4. Локальный рентгеноспектральный анализ образцов из сплава 1420, выделения S_1 -фазы на границе зерна и внутри зерен

Темнопольные дифракционные исследования фазово-структурного состояния позволили выявить δ' -фазу (Al_3Li) – основную упрочняющую фазу, характерную для сплавов 1420 и 1424. Данная фаза распределена в структуре образцов с высокой плотностью по объему зерна (рис. 3, а, в). Частицы местами образуют скопления, межфазные границы выражены не явно. Средний размер частиц составляет $\sim(7-10)$ нм. Следует отметить наличие более мелкой (1–2 нм) фракции частиц, присутствующих в структуре

образцов из сплавов 1420 и 1424 как после длительного естественного старения, так и после низкотемпературных имитационных нагревов.

В объеме зерен наблюдаются частицы дисперсоидов сферической формы, в состав которых входят Zr и Sc (рис. 4).

После перезакалки и старения в структуре сплава 1420 наблюдаются частицы S_1 -фазы (Al_2LiMg) с отдельными дискретными выделениями на границах и стыках зерен (рис. 5 и 6). Частицы δ' -фазы (Al_3Li) равномерно распределены по объему зерна, средний размер частиц δ' -фазы составляет $\sim(3-4)$ нм (рис. 5, б).

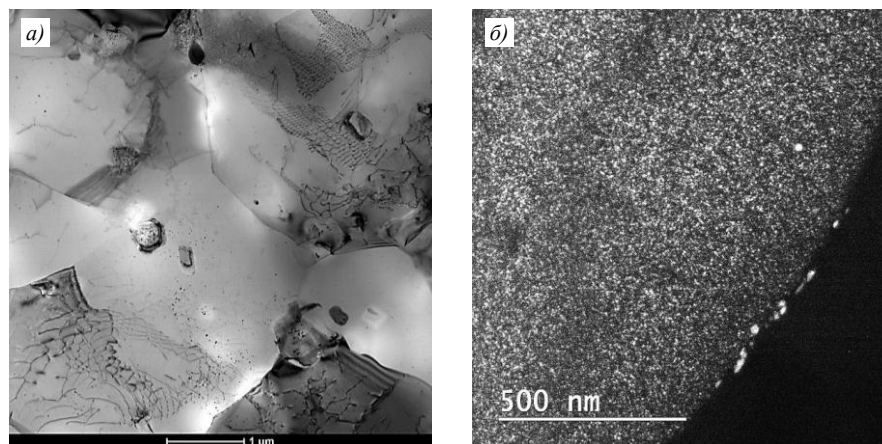


Рис. 5. Субзеренная структура (а) и выделения δ' -фазы (б) в образцах из прессованного профиля сплава 1420 после перезакалки и старения

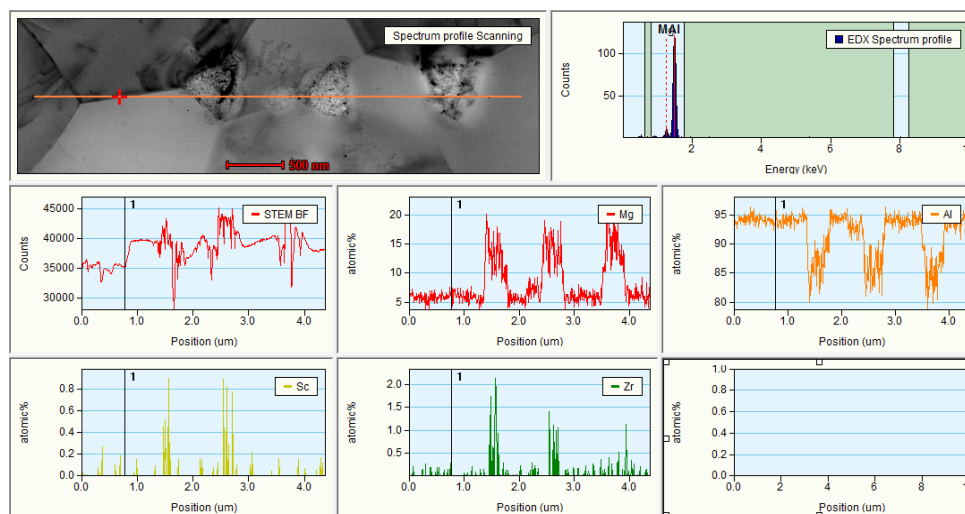


Рис. 6. Локальный рентгеноспектральный анализ структуры образцов профилей после повторной термообработки

Результаты фрактографических исследований образцов прессованных профилей из сплава 1420 после длительного естественного старения, испытанных при растяжении, показали, что поверхность излома представлена хрупким межзеренным разрушением (рис. 7).

Следует отметить, что на изломах наблюдаются признаки пластической деформации, характеризующиеся отдельными вязкими ямками (рис. 7, б). Данные фрактографические особенности не характерны для разрушения сплава 1420 в закаленном и искусственно состаренном состоянии.

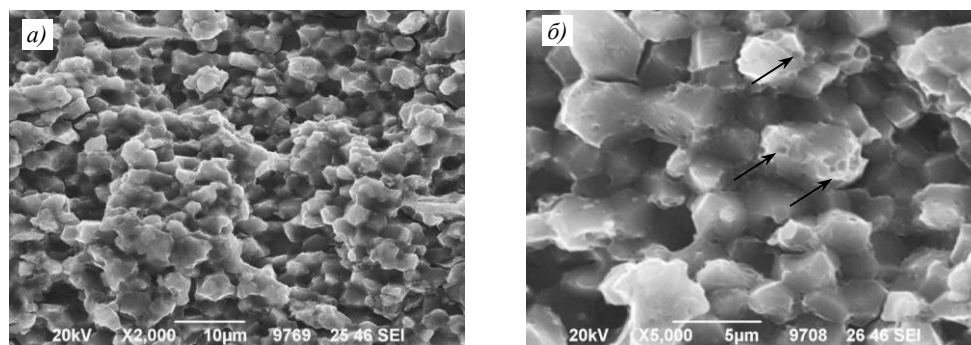


Рис. 7. Микростроение изломов образцов из сплава 1420 после эксплуатации, испытанных при растяжении (стрелками показаны отдельные вязкие ямки)

Результаты исследования поверхности разрушения образцов, подвергнутых повторной термической обработке после вылеживания, показали, что излом имеет пластичный, мелкоямочный рельеф (рис. 8). Это характерно для разрушения сплава 1420 в закаленном и искусственно состаренном состоянии.

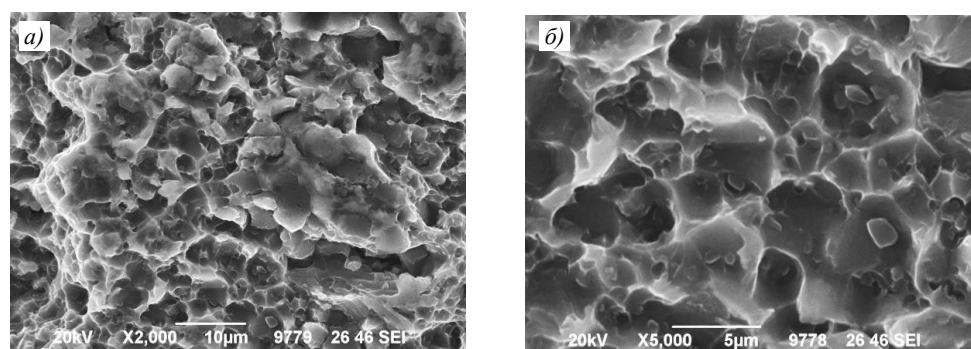


Рис. 8. Микростроение изломов образцов профилей из сплава 1420 в перезакаленном и состаренном состоянии

Обсуждение и заключения

В структуре сплавов 1420 и 1424, подвергавшихся длительным низкотемпературным воздействиям, отмечен ряд особенностей: наличие на границах субзерен как единичных выделений S_1 -фазы, так и ее равномерного выделения, а также присутствие дополнительных мелкодисперсных частиц δ' -фазы.

В структуре образцов из сплавов 1420 и 1424 (закаленных и состаренных) частицы S_1 -фазы распределены неравномерно, наблюдаются участки с повышенной плотностью данных частиц, а выделение S_1 -фазы сопровождается образованием зон, свободных от выделений δ' -фазы. Распределение по размерам частиц δ' -фазы равномерное.

Повышенная объемная доля и более крупный размер частиц упрочняющей δ' -фазы в теле зерен образца (по сравнению с аналогичными состаренными образцами) подтверждают высокую (по сравнению с требованиями нормативной документации) прочность в материале как прессованных профилей из сплава 1420, так и листов из сплава 1424.

Появление на поверхности разрушения естественно состаренных образцов профилей из сплава 1420 признаков пластической деформации после испытаний также может быть обусловлено наличием в структуре сплава 1420 на границах субзерен единичных выделений S_1 -фазы.

Анализируя особенности распада твердого раствора с образованием δ' -фазы в исследованных Al–Li-сплавах, необходимо отметить, что наличие после длительных

низкотемпературных воздействий дисперсной фазы указывает на протекание дораспадных процессов, которые приводят к дополнительному упрочнению. Протекание таких процессов подтверждается различием в значениях периода решетки твердого раствора после различных температурно-временных воздействий. Поскольку в твердом растворе Al большинства сплавов с литием после старения сохраняется остаточное пересыщение литием [3], то при длительном вылеживании либо в условиях длительной эксплуатации с вероятностью солнечных нагревов это пересыщение должно приводить к дополнительному образованию до 8 % фазы δ' (Al₃Li), т. е. дораспаду. В состав основной упрочняющей δ' -фазы кроме атомов лития могут входить атомы Mg, поэтому в сплаве 1420 после различных температурно-временных воздействий наблюдается изменение периода решетки матрицы, как и в сплаве 1424 после имитационных нагревов.

При перекалке образцов из сплава 1420 из прессованных полуфабрикатов без последующего старения период решетки твердого раствора увеличивается, что может быть связано с его обогащением Mg за счет растворения магнийсодержащих δ' - и S₁-фаз. После искусственного старения, а также длительного естественного старения происходит процесс обеднения магнием твердого раствора за счет прохождения нескольких процессов: выделения S₁-фазы, роста обогащенной магнием δ' -фазы и выделением дораспадной δ' -фазы, менее обогащенной магнием. Результаты исследования микроструктуры хорошо согласуются с данными механических испытаний и результатами фрактографического анализа.

Таким образом, низкотемпературные воздействия на структуру литийсодержащих сплавов приводят к изменению структурно-фазового состояния и, следовательно, к изменению механических свойств материала. В процессе эксплуатации данных полуфабрикатов подобные воздействия в комплексе с напряжениями оказывают влияние на структуру и фазовый состав, а также на характер и морфологию выделений, и могут приводить к нестабильности свойств и изменению в сторону повышения прочностных характеристик и снижения пластичности.

Для повышения стабильности свойств при эксплуатации, по-видимому, целесообразно применять ступенчатые режимы старения, обеспечивающие полноту и равномерность распада пересыщенного твердого раствора с выделением двух и более фаз.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-11-2021-085 от 22.12.2021).

Список источников

1. Shanyavskiy A., Osipov D. Stringer-sheets fatigue cracking of helicopter-tail-boom in welding joints of 01420 Al–Li alloy // International Journal of Fatigue. 2015. Vol. 76. P. 39–46.
2. Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л., Колобнев Н.И. Al–Li сплавы (структура и свойства). Киев: Наукова думка, 1992. 192 с.
3. Kablov E.N., Antipov V.V., Girsh R.I. et al. Fiber Metal Laminates Based on Aluminum–Lithium Alloy Sheets in New-generation Aircraft // Russian Engineering Research. 2021. Vol. 41. No. 3. P. 215–221.
4. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Лукина Е.А. Тенденции развития алюминий-литиевых сплавов и технологии их обработки / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2019. 367 с.
5. Оглодков М.С., Щетинина Н.Д., Рудченко А.С., Пантелеев М.Д. Направления развития перспективных алюминий-литиевых сплавов для авиационно-космической техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 19–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-19-29.
6. Zhang X.L., Zhang L., Wu G.H. et al. Influence of Sc content on the microstructure and mechanical properties of cast Al–2Li–2Cu–5Mg–0,2Zr alloy // Material Characterization. 2018. Vol. 142. P. 223–236.

7. Joh C.-H., Yamada K., Miura Y. Effect of Sc-addition on the coarsening behavior of Al₃Li precipitates in Al–Li alloys // *Material Transactions*. 1999. Vol. 40. P. 439–442.
8. Rioja R.J., Liu J. The Evolution of Al–Li Base Products for Aerospace and Space Applications // *Metal Material Transactions*. 2012. Vol. 43A. P. 3325–3337.
9. Лукина Е.А., Алексеев А.А., Антипов В.В., Хохлатова Л.Б., Журавлева П.Л. Фазовые превращения в процессе длительных низкотемпературных выдержек для сплавов 1424, В-1469 и 1441 // *Физика металлов и металловедение*. 2011. Т. 112. № 3. С. 253–261.
10. Noble B., Harris S.J., Katsikis S., Dinsdale D. Influence of Magnesium and Copper Additions on the Low Temperature Thermal Stability of Al–Li Alloys // *Proceedings of the 9th International Conference on Aluminium Alloys*. Institute of Materials Engineering Australasia Ltd, 2004. P. 777.
11. Noble B., Harris S.J., Katsikis S., Dinsdale D. Low Temperature Thermal Stability of Quaternary Al–Li–Cu–Mg-Alloys // *Materials Science Forum*. 2006. Vol. 519–521. P. 209–214. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.519-521.209.
12. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе // *Цветные металлы*. 2016. № 8 (884). С. 86–91.
13. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф. Новый класс слоистых алюмокомпозитов на основе алюминий-литиевого сплава 1441 с пониженной плотностью // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2011. № SP2. С. 174–183.
14. Каблов Е.Н., Морозова Л.В., Григоренко В.Б., Жегина И.П., Фомина М.А. Исследование влияния коррозионной среды на процесс накопления повреждений и характер разрушения конструкционных алюминиевых сплавов 1441 и В-1469 при испытаниях на растяжение и малоцикловую усталость // *Материаловедение*. 2017. № 1. С. 41–48.
15. Антипов В.В., Григорьев М.В., Коновалов А.Н., Мешков А.А., Серебренникова Н.Ю. Изучение влияния режимов клепки на малоцикловую усталость клепаных соединений листов, изготовленных из алюминий-литиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-3-8.
16. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Коновалов А.Н., Нефедова Ю.Н. Перспективы применения в авиационных конструкциях слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 45–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53.
17. Булина Н.В., Маликов А.Г., Оришич А.М., Ключков Г.Г. Исследование структурно-фазового состава сварных соединений листов алюминий-литиевого сплава В-1469, полученных лазерной сваркой, в зависимости от термообработки // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 31–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-31-39.

References

1. Shanyavskiy A., Osipov D. Stringer-sheets fatigue cracking of helicopter-tail-boom in welding joints of 01420 Al–Li alloy. *International Journal of Fatigue*, 2015, vol. 76, pp. 39–46.
2. Fridlyander I.N., Chuistov K.V., Berezina A.L., Kolobnev N.I. *Al–Li alloys (structure and properties)*. Kyiv: Naukova dumka, 1992, 192 p.
3. Kablov E.N., Antipov V.V., Girsh R.I. et al. Fiber Metal Laminates Based on Aluminum–Lithium Alloy Sheets in New-generation Aircraft. *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41, no. 3, pp. 215–221.
4. Kolobnev N.I., Khokhlatova L.B., Lukina E.A. *Trends in the development of aluminum-lithium alloys and the technology of their processing*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2019, 367 p.
5. Oglodkov M.S., Shchetinina N.D., Rudchenko A.S., Panteleev M.D. Directions of the development of promising aluminum-lithium alloys for aero-space engineering (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 19–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-19-29.
6. Zhang X.L., Zhang L., Wu G.H. et al. Influence of Sc content on the microstructure and mechanical properties of cast Al–2Li–2Cu–5Mg–0,2Zr alloy. *Material Characterization*, 2018, vol. 142, pp. 223–236.
7. Joh C.-H., Yamada K., Miura Y. Effect of Sc-addition on the coarsening behavior of Al₃Li precipitates in Al–Li alloys. *Material Transactions*, 1999, vol. 40, pp. 439–442.

8. Rioja R.J., Liu J. The Evolution of Al–Li Base Products for Aerospace and Space Applications. *Metal Material Transactions*, 2012, vol. 43A, pp. 3325–3337.
9. Lukina E.A., Alekseev A.A., Antipov V.V., Khokhlatova L.B., Zhuravleva P.L. Phase transformations during long-term low-temperature holding for alloys 1424, V-1469 and 1441. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2011, vol. 112, no. 3, pp. 253–261.
10. Noble B., Harris S.J., Katsikis S., Dinsdale D. Influence of Magnesium and Copper Additions on the Low Temperature Thermal Stability of Al–Li Alloys. *Proceedings of the 9th International Conference on Aluminium Alloys*. Institute of Materials Engineering Australasia Ltd, 2004, p. 777.
11. Noble B., Harris S.J., Katsikis S., Dinsdale D. Low Temperature Thermal Stability of Quaternary Al–Li–Cu–Mg-Alloys. *Materials Science Forum*, 2006, vol. 519–521, pp. 209–214. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.519-521.209.
12. Kablov E.N., Antipov V.V., Klochkova Yu.Yu. Aluminium-lithium alloys of a new generation and layered aluminum-glass plastics based on them. *Tsvetnye metally*, 2016, no. 8 (884), pp. 86–91.
13. Kablov E.N., Antipov V.V., Senatorova O.G., Lukina N.F. A new class of layered aluminum-glass-reinforced plastics based on aluminum-lithium alloy 1441 with reduced density. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser.: Mechanical engineering*, 2011, no. SP2, pp. 174–183.
14. Kablov E.N., Morozova L.V., Grigorenko V.B., Zhegina I.P., Fomina M.A. Investigation of the influence of a corrosive environment on the process of damage accumulation and the nature of destruction of structural aluminum alloys 1441 and V-1469 during tensile tests and low-cycle fatigue. *Materialovedenie*, 2017, no. 1, pp. 41–48.
15. Antipov V.V., Grigoryev M.V., Konovalov A.N., Meshkov A.A., Serebrennikova N.Yu. Research of the influence of riveting on the low-cycle fatigue of riveted connection sheets of aluminum-lithium alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-3-8.
16. Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Konovalov A.N., Nefedova Yu.N. Perspectives of application of fiber metal laminate materials based on aluminum alloys in aircraft design. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 45–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53.
17. Bulina N.V., Malikov A.G., Orishich A.M., Klochkov G.G. Research of the structural-phase composition of laser weld joint depending on the thermal processing of the aluminum alloy V-1469. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 31–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-31-39.

Информация об авторах

Лукина Ева Александровна, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Наприенко Сергей Александрович, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Горбовец Михаил Александрович, начальник Испытательного центра, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Зайцев Денис Владимирович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Оглодкова Юлия Сергеевна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Eva A. Lukina, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey A. Naprienko, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Mikhail A. Gorbovets, Head of Testing Center, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Denis V. Zaytsev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Yulia S. Oglochkova, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 14.10.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 19.10.2022.

The article was submitted 14.10.2022; approved and accepted for publication after reviewing 19.10.2022.