

# Исследование структуры и свойств Structure and properties research

**Физические методы  
исследования и контроля**

**Physical methods  
of research and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-7-28-35>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВО-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ В-1461 И В-1469

© Алексей Алексеевич Скупов<sup>1\*</sup>, Алексей Владимирович Щербаков<sup>2</sup>,  
Светлана Викторовна Сбитнева<sup>1</sup>, Ева Александровна Лукина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ВИАМ, Москва, Россия; \*e-mail: [weld\\_lab@viam.ru](mailto:weld_lab@viam.ru)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия.

*Статья поступила 30 июля 2018 г. Поступила после доработки 22 февраля 2019 г.  
Принята к публикации 25 февраля 2019 г.*

Известно, что применение присадочного материала, легированного редкоземельными металлами (РЗМ), повышает механические свойства сварных соединений высокопрочных алюминиево-литиевых сплавов по сравнению с использованием серийного присадочного материала. Представлены результаты исследования влияния состава легированных присадочных материалов марок Св1209 и Св1221 и режима термообработки на механические свойства и структуру сварных соединений высокопрочных алюминиево-литиевых сплавов В-1461 и В-1469. Показано, что присадочные материалы, легированные РЗМ, в сочетании с полной термической обработкой (закалка + искусственное старение), проведенной после сварки, обеспечивают рост прочностных характеристик сварного соединения до уровня прочности основного материала при достаточно высоких показателях пластичности и ударной вязкости. Металлографические исследования сварных соединений после термической обработки показали, что благодаря легированию присадочного материала РЗМ для центра сварного шва характерна мелкозернистая структура. Выделения упрочняющих фаз в сварных соединениях исследованы с помощью просвечивающей электронной микроскопии. Установлено, что в околошовной зоне сплава В-1469 присутствуют выделения  $Al_3(Sc, Zr)$  округлой формы и мелкодисперсная  $\delta'$ -фаза, выделившаяся в процессе охлаждения сварного соединения. Вместе с тем искусственное старение после сварки приводит к выделению медесодержащих  $\Omega'$ - и  $\theta'$ -фаз. Для сплава В-1461 после закалки и искусственного старения сварного соединения в зоне термического влияния зафиксировано увеличение размеров выделений упрочняющих  $T_1'$ -,  $S'$ -,  $\theta'$ -фаз и плотности их распределения в объеме зерна. Таким образом, подогрев при сварке ведет к неравномерному выделению фаз, а дополнительное искусственное старение усугубляет неравномерность распада посредством частичного растворения одних фаз и укрупнения других.

**Ключевые слова:** присадочные материалы; сварка; алюминий-литиевые сплавы; редкоземельные металлы; термообработка.

## STUDY OF THE HEAT TREATMENT EFFECT ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES WELDED JOINTS OF ALUMINUM-LITHIUM ALLOYS V-1461 AND V-1469

© Aleksey A. Skupov<sup>1\*</sup>, Aleksey V. Scherbakov<sup>2</sup>, Svetlana V. Sbitneva<sup>1</sup>, Eva A. Lukina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> All-Russian scientific research institute of aviation materials, Moscow, Russia; \*e-mail: [weld\\_lab@viam.ru](mailto:weld_lab@viam.ru)

<sup>2</sup> National Research University "MPEI", Moscow, Russia.

Received July 30, 2018. Revised February 22, 2019. Accepted February 25, 2019.

The use of rare earth elements for alloying of aluminum alloys is a promising direction nowadays — filler materials doped with rare earth metals (REM) improve the mechanical properties of welded joints of high-strength aluminum-lithium alloys compared to serial filler material. The results of studying the effect of the composition of alloyed filler materials Sv1209 and Sv1221 and heat treatment mode on the mechanical properties and structure of welded joints of high-strength aluminum-lithium alloys B-1461 and B-1469 are presented. It is shown that the use of filler materials alloyed with rare earth metals in combination with full heat treatment (quenching and artificial aging) carried out after welding provide an increase in the strength characteristics of the welded joint to the level of strength of the base material with sufficiently high ductility and toughness. Metallographic study of welded joints after heat treatment revealed a fine-grained structure in the center of welds attributed to alloying of the filler with REM. Transmission electron microscopy is used to study precipitated hardening phases in welded joints. The round-shaped phase  $Al_3(Sc, Zr)$  and a fine  $\delta'$ -phase precipitated upon cooling of the welded joint are present in weld adjacent zone of V-1469 alloy. At the same time, artificial aging after welding results in formation of copper-containing  $\Omega'$ - and  $\theta'$ -phases. Quenching and artificial aging of the welded joint resulted in an increase in the size of precipitated hardening  $Ti_2$ -,  $S'$ -,  $\theta'$ -phases and density of their distribution in the grain volume in the heat-affected zone of V-1461 alloy. Thus, heating upon welding leads to uneven phase precipitation, whereas additional artificial aging aggravates the non-uniformity of decomposition through partial dissolution of some phases and coarsening of the other.

**Keywords:** filler materials; welding; aluminum-lithium alloys; rare-earth metals; heat treatment.

## Введение

Применение редкоземельных металлов (РЗМ) в металлургическом производстве основано на том, что при их взаимодействии с кислородом, серой, азотом, водородом происходит очистка расплава за счет образования прочных тугоплавких соединений. РЗМ обладают также модифицирующим действием, позволяя уменьшать размер зерна, при введении их незначительных количеств [1 – 5].

Исследования сварных соединений высокопрочных алюминий-литиевых сплавов, выполненных с применением серийных присадочных материалов, показали, что для них характерно значительное снижение прочностных характеристик (до 50 %) по сравнению со свариваемыми сплавами, обусловленное действием термического цикла сварки [6 – 8]. Применение присадочных материалов, легированных РЗМ, и термической обработки (ТО), напротив, повышает прочность сварных соединений (до 0,76 и выше от прочности сплавов) [9 – 12].

Цель работы — исследование влияния ТО на структуру и механические свойства сварных соединений высокопрочных алюминий-литиевых сплавов B-1461 и B-1469, выполненных аргоно-

дуговой сваркой с присадочными материалами марок Св1209 и Св1221, легированными РЗМ.

## Материалы и методы

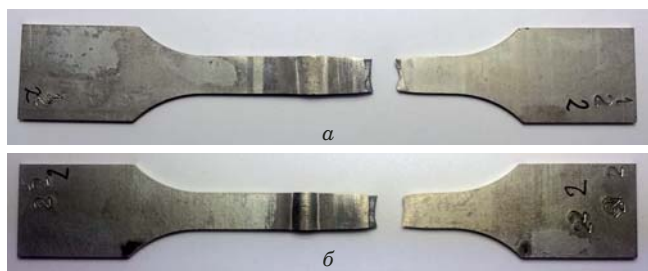
Исследовали листовые полуфабрикаты сплавов B-1461 и B-1469 [13, 14] толщиной 2,5 и 1,8 мм соответственно в состоянии после полной (закалка + искусственное старение) термической обработки. Автоматическую аргонодуговую сварку (ААрДС) осуществляли на установке Fronius. В качестве присадочного материала использовали алюминийевые проволоки марок Св1209 и Св1221 [15]. Составы сплавов и присадочных материалов приведены в табл. 1.

Микроструктуру сварных соединений исследовали на инвертированном оптическом микроскопе Leica DM IRM с программно-аппаратным комплексом обработки изображения Image Expert Pro3x. Электронно-микроскопический анализ выделений упрочняющих фаз проводили с помощью просвечивающих электронных микроскопов JEM200CX и Tescna G2 F20 при ускоряющем напряжении 160 и 200 кВ. Локальный химический состав фазовых составляющих определяли методом рентгеноспектрального микроанализа с применением энергодисперсионного спектрометра X-Max80T. Образцы для электронной

**Таблица 1.** Химические составы сплавов B-1461, B-1469 и присадочных материалов Св1209, Св1221 (% масс.)

**Table 1.** Chemical composition of alloys V-1461, V-1469 and filler material Sv1209, Sv1221 (% wt.)

| Материал | Al   | Cu        | Mn          | Mg         | Li         | Sc          | Ti        | Zr          | Hf        | Nd        | Dy        | Zn          | Ag         |
|----------|------|-----------|-------------|------------|------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|-------------|------------|
| B-1461   | Осн. | 2,5 – 3,5 | 0,01 – 0,6  | 0,01 – 0,6 | 1,5 – 1,95 | 0,01 – 0,15 | —         | 0,05 – 0,15 | —         | —         | —         | 0,2 – 0,8   | —          |
| B-1469   | Осн. | 3,2 – 4,5 | 0,003 – 0,5 | 0,01 – 0,5 | 1,0 – 1,7  | 0,02 – 0,28 | —         | 0,04 – 0,20 | —         | —         | —         | —           | 0,15 – 1,5 |
| Св1209   | Осн. | 5,5 – 6,5 | 0,2 – 0,3   | —          | —          | 0,2 – 0,5   | 0,1 – 0,2 | 0,1 – 0,2   | 0,1 – 0,4 | 0,1 – 0,2 | 0,1 – 0,2 | 0,05 – 0,15 | 0,6 – 1    |
| Св1221   | Осн. | 9 – 11    | 0,2 – 0,3   | —          | —          | 0,2 – 0,5   | 0,1 – 0,2 | 0,1 – 0,2   | 0,1 – 0,4 | 0,1 – 0,2 | 0,1 – 0,2 | 0,05 – 0,15 | 0,6 – 1    |



**Рис. 1.** Образцы сварных соединений сплава В-1469 с присадками Св1209 (а) и Св1221 (б) после испытаний на кратковременную прочность при растяжении

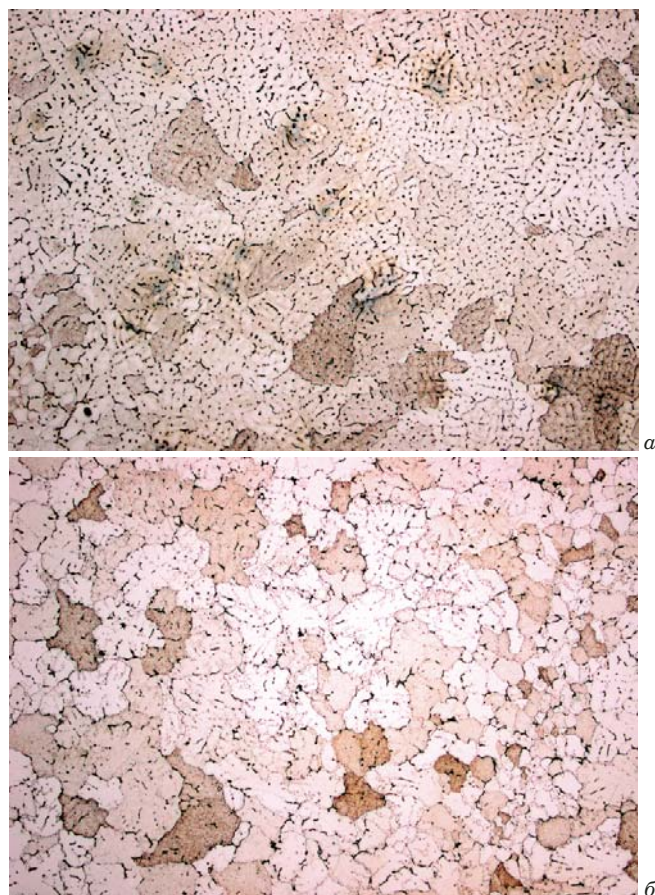
**Fig. 1.** Welded joints of alloy V-1469 with filler material Sv1209 (a) and Sv1221 (b) after testing for short-term tensile strength

микроскопии вырезали на электроэрозионном станке с последующим механическим утонением до 100 мкм и струйной электрополировкой в кислотно-спиртовом электролите, охлажденном до минус 38 °С на установке TENUPOL-5. Термическую обработку осуществляли по двум схемам: 1) закалка + искусственное старение; 2) искусственное старение.

## Результаты и их обсуждение

Механические характеристики сварных соединений определяли по стандартным методикам [16]. Сварные соединения испытывали на кратковременную прочность при растяжении ( $\sigma_B$ ), ударную вязкость с U-образным надрезом (КCU) и статический изгиб ( $\alpha$ ). Результаты приведены в табл. 2.

Видно, что искусственное старение после сварки не приводит к повышению механических свойств. Полная же термическая обработка обеспечивает рост прочностных характеристик сварного соединения до уровня прочности основного



**Рис. 2.** Микроструктура центра сварного шва сплавов В-1469 после закалки и искусственного старения (а) и В-1461 после искусственного старения (б) (присадка — Св1209,  $\times 200$ )

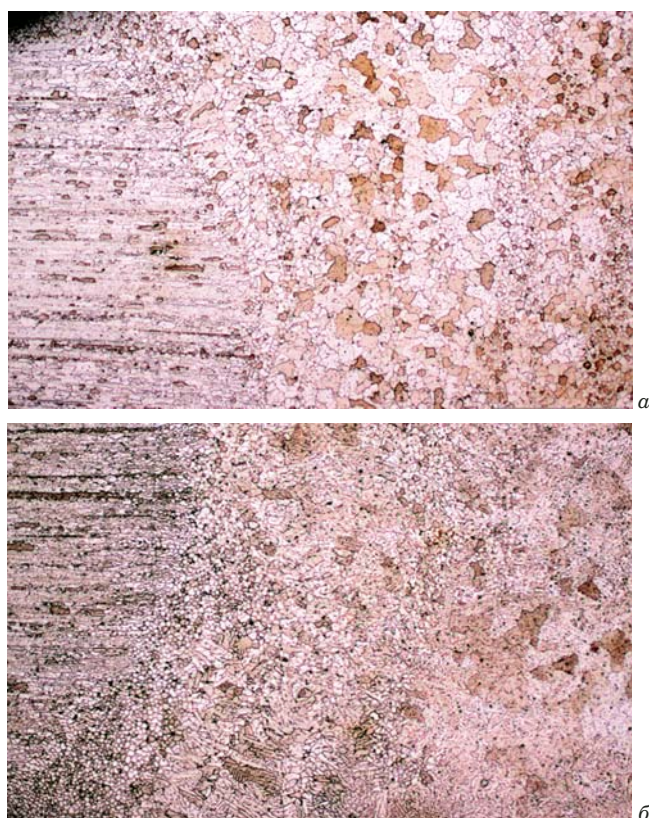
**Fig. 2.** Microstructure of the weld center of alloys V-1469 after hardening and artificial aging (a) and V-1461 after artificial aging (b) ( $\times 200$ , filler material Sv1209)

материала при незначительном снижении пластичности и ударной вязкости (по сравнению с соединениями без ТО).

**Таблица 2.** Механические характеристики сварных соединений сплавов В-1461 и В-1469

**Table 2.** Mechanical properties of welded joints of alloys V-1461, V-1469

| Сплав  | Присадка | Вид ТО после сварки              | $\sigma_{B, св.с.}$ , МПа | ККУ, кДж/м <sup>2</sup> | $\alpha$ , град. |
|--------|----------|----------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|
| В-1461 | Св1209   | Без ТО                           | 420                       | 190                     | 65               |
|        |          | Искусственное старение           | 415                       | 200                     | 70               |
|        |          | Закалка + искусственное старение | 535                       | 195                     | 60               |
|        | Св1221   | Без ТО                           | 415                       | 160                     | 50               |
|        |          | Искусственное старение           | 430                       | 160                     | 50               |
|        |          | Закалка + искусственное старение | 520                       | 130                     | 50               |
| В-1469 | Св1209   | Без ТО                           | 410                       | 195                     | 95               |
|        |          | Искусственное старение           | 430                       | 180                     | 70               |
|        |          | Закалка + искусственное старение | 495                       | 145                     | 60               |
|        | Св1221   | Без ТО                           | 415                       | 170                     | 85               |
|        |          | Искусственное старение           | 425                       | 160                     | 60               |
|        |          | Закалка + искусственное старение | 500                       | 105                     | 55               |



**Рис. 3.** Микроструктура переходной зоны сварного соединения сплавов В-1469 после искусственного старения (а) и В-1461 после закалки и искусственного старения (б) (присадка — Св1209,  $\times 50$ )

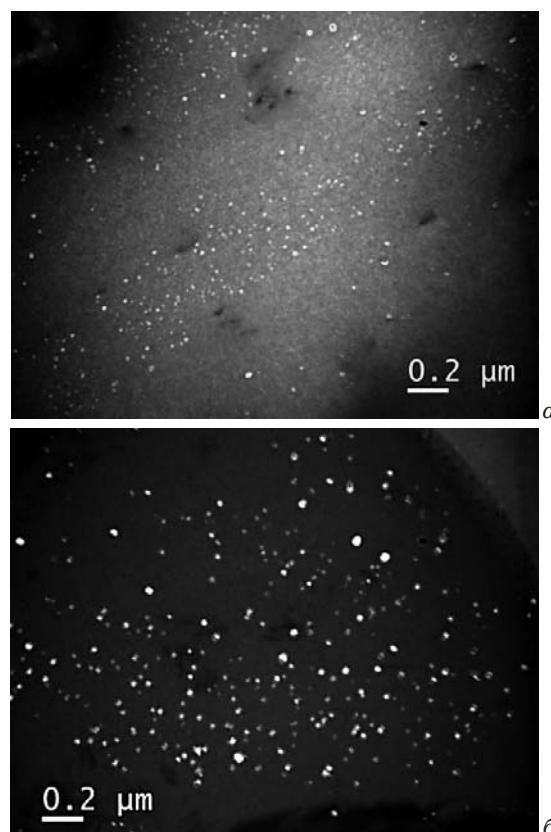
**Fig. 3.** Microstructure of the transition zone of welded joint of alloys V-1469 after artificial aging (a) and V-1461 after hardening and artificial aging (b) ( $\times 50$ , filler material Sv1209)

Отметим, что разрушение сварных соединений сплава В-1469 с обеими присадками после закалки и искусственного старения происходит на расстоянии 10 – 15 мм от линии сплавления (рис. 1). Отсюда можно заключить, что уменьшение прочности вызвано разупрочнением полуфабриката после повторной ТО [17] и не связано с действием сварочного термического цикла.

Результаты металлографических исследований соединений после ТО свидетельствуют, что благодаря легированию присадочного материала РЗМ для центра сварного шва характерна мелкозернистая структура (рис. 2).

Вместе с тем переходная зона сварных соединений имеет равноосную структуру и ободок мелкого рекристаллизованного зерна (рис. 3). В зоне сплавления происходит оплавление границ зерен, что сопровождается их заметным утолщением. Граничные участки (одно-два зерна от линии сплавления) обогащаются медью, а основной объем зерна — обедняется.

Выделения упрочняющих фаз исследовали методами просвечивающей электронной микро-



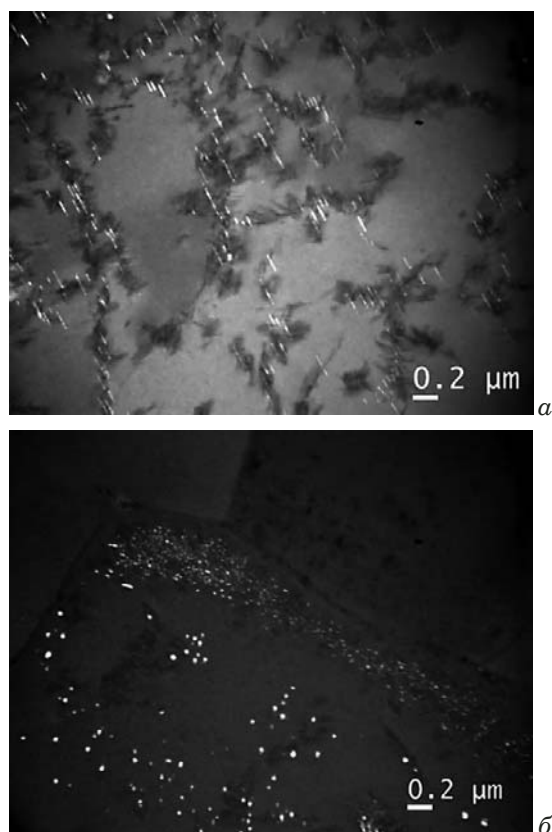
**Рис. 4.** Выделения в зоне термического влияния сварного соединения сплава В-1469 без ТО после сварки (а) и после искусственного старения (б) (присадка — Св1209)

**Fig. 4.** Isolation in the zone of thermal influence of the welded joint of alloy V-1469 without heat treatment after welding (a) and after artificial aging (b) (filler material Sv1209)

скопии. Образцы вырезали из центральной зоны шва и области термического влияния в непосредственной близости от линии сплавления.

Установили, что околошовная зона сварных соединений из сплава В-1469 имеет частично рекристаллизованную структуру, типичную для листов сплава [18]. В состоянии «после сварки» в структуре сплава присутствуют выделения  $Al_3(Sc, Zr)$  округлой формы и мелкодисперсная  $\delta'$ -фаза, выделившаяся в процессе охлаждения сварного соединения. После искусственного старения сплава В-1469 выделений мелкодисперсной  $\delta'$ -фазы в структуре не наблюдали (рис. 4).

Однако искусственное старение после сварки ведет к появлению медесодержащих  $\Omega'$ - и  $\theta'$ -фаз, характер и интенсивность выделения которых взаимосвязаны. При этом частицы упрочняющей  $\Omega'$ -фазы, представляющие собой пластины, выделяются преимущественно гетерогенно на дислокациях, образующих субграницы, не затрагивая объем субзерен. Частицы  $\theta'$ -фазы выделяются неравномерно, но преимущественно гомогенно, местами образуя скопления повышенной плотности вблизи субграниц (рис. 5).



**Рис. 5.** Выделения упрочняющих  $\Omega'$ - (а) и  $\theta'$ -фаз (б) в зоне термического влияния сварного соединения сплава В-1469 после искусственного старения (присадка — Св1209)

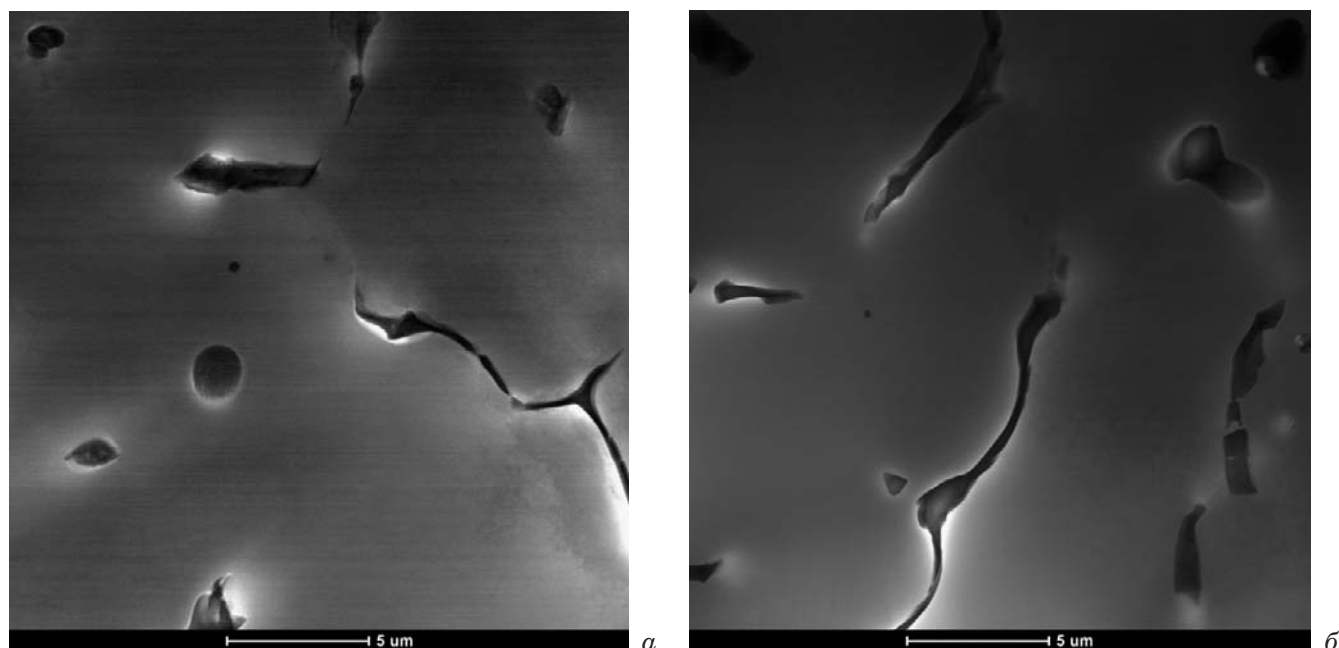
**Fig. 5.** Isolation of strengthening phases  $\Omega'$ - (a) and  $\theta'$ - (b) in the zone of thermal influence of welded joint of alloy V-1469 after artificial aging (filler material Sv1209)

Структура центральной зоны шва (рис. 6) сварных соединений представляет собой участки, разделенные прослойками фазы на основе Cu. Здесь также присутствуют округлые включения, имеющие в своем составе Mg и Cu в меньшем, чем в прослойках, количестве. Оба типа включений содержат небольшое количество Dy. Кроме того, в состав прослоек входят Nd и Sc. Таким образом, РЗМ в литой структуре шва наблюдаются в составе соединений, содержащих Cu и Mg. В твердом растворе выраженных флуктуаций по составу не фиксировали.

После закалки и искусственного старения в структуре шва образуются крупные рекристаллизованные зерна, на которых выделения-прослойки формируют структуру, подобную структуре незакаленного материала (рис. 7). Прослойки содержат Cu, Mg и Sc, а отдельные округлые частицы — Dy и Nd. В объеме рекристаллизованных зерен наблюдается выделение частиц стержнеобразной формы ( $\theta'$ -фаза), в состав которых входят преимущественно Cu и Sc. Такие частицы распределены неравномерно, их плотность увеличивается вблизи границ.

Структура околошовной зоны преимущественно нерекристаллизованная с выраженной разнотернистостью. При сварке зона нагревается, что активизирует процессы растворения мелких, роста и коагуляции крупных фаз.

После сварки происходит дисперсный распад с образованием  $\theta'$ - и  $\delta'$ -фаз (рис. 8). При этом границы и субграницы не декорированы выделе-



**Рис. 6.** Структура центральной зоны шва сварного соединения сплава В-1461 с присадками Св1221 (а) и Св1209 (б) без ТО после сварки

**Fig. 6.** Central zone microstructure of weld joint of alloy V-1461 without heat treatment after welding: a, b — filler material Sv1221 and Sv1209

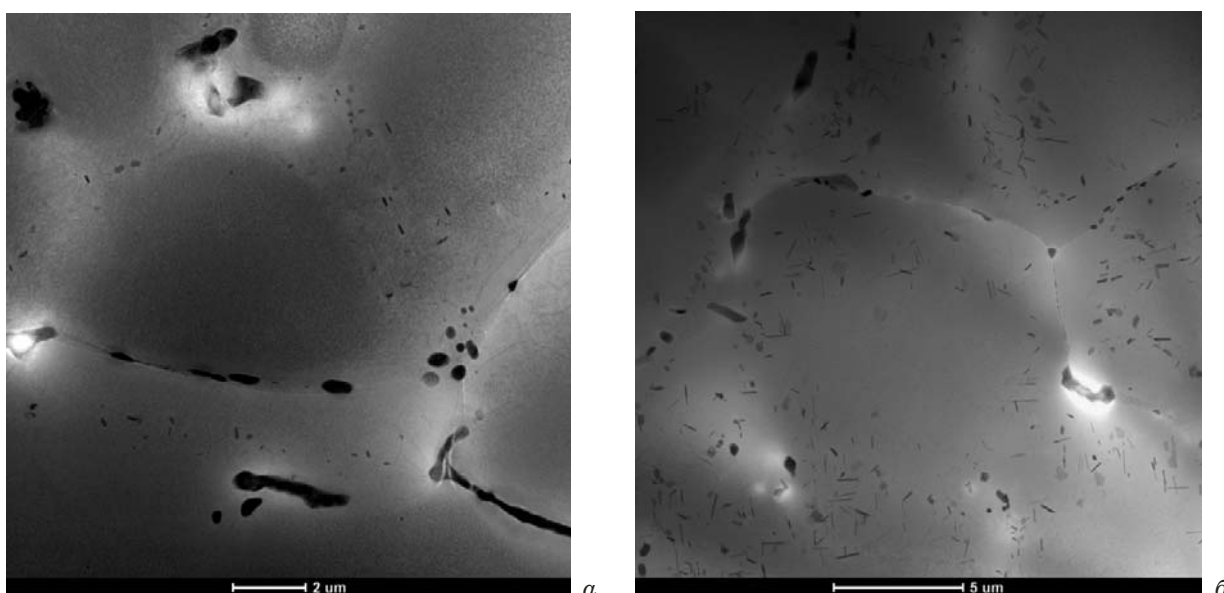
ниями крупных фаз, не наблюдается интенсивного выделения  $T_1'$ -фазы [19, 20].

Дополнительное старение после сварки приводит к укрупнению  $\delta'$ -фазы и наиболее полному распаду пересыщенного твердого раствора с образованием  $\theta'$ -фазы (рис. 9), а оставшееся пересыщение по меди — к неравномерному выделению  $T_1'$ -фазы. Распад пересыщенного твердого раствора (при большой плотности  $\theta'$ -фазы) носит не интенсивный и преимущественно гетерогенный (по субграницам) характер. Присутствуют отдельные дислокации, декорированные  $S'$ -фазой, и наблюдается выделение стержней дисперсной  $S'$ -фазы в объеме зерна.

После закалки и искусственного старения в зоне термического влияния размеры выделений упрочняющих  $T_1'$ -,  $S'$ - и  $\theta'$ -фаз и плотность их распределения в объеме зерна увеличиваются. Подогрев при сварке приводит к неравномерному выделению фаз, а дополнительное искусственное старение усугубляет неравномерность распада посредством частичного растворения одних фаз и укрупнения других.

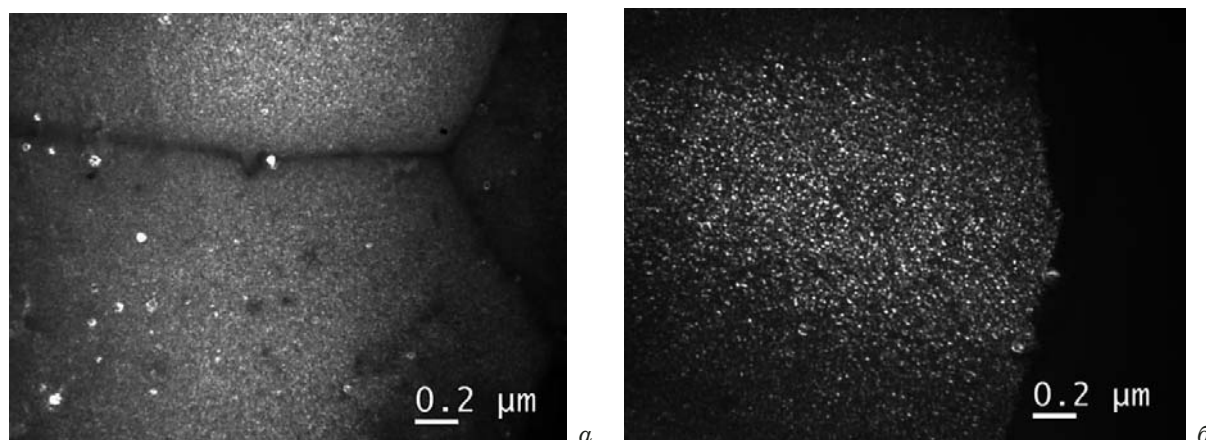
### Заключение

Применение присадочных материалов, легированных РЗМ, для сварки высокопрочных алю-



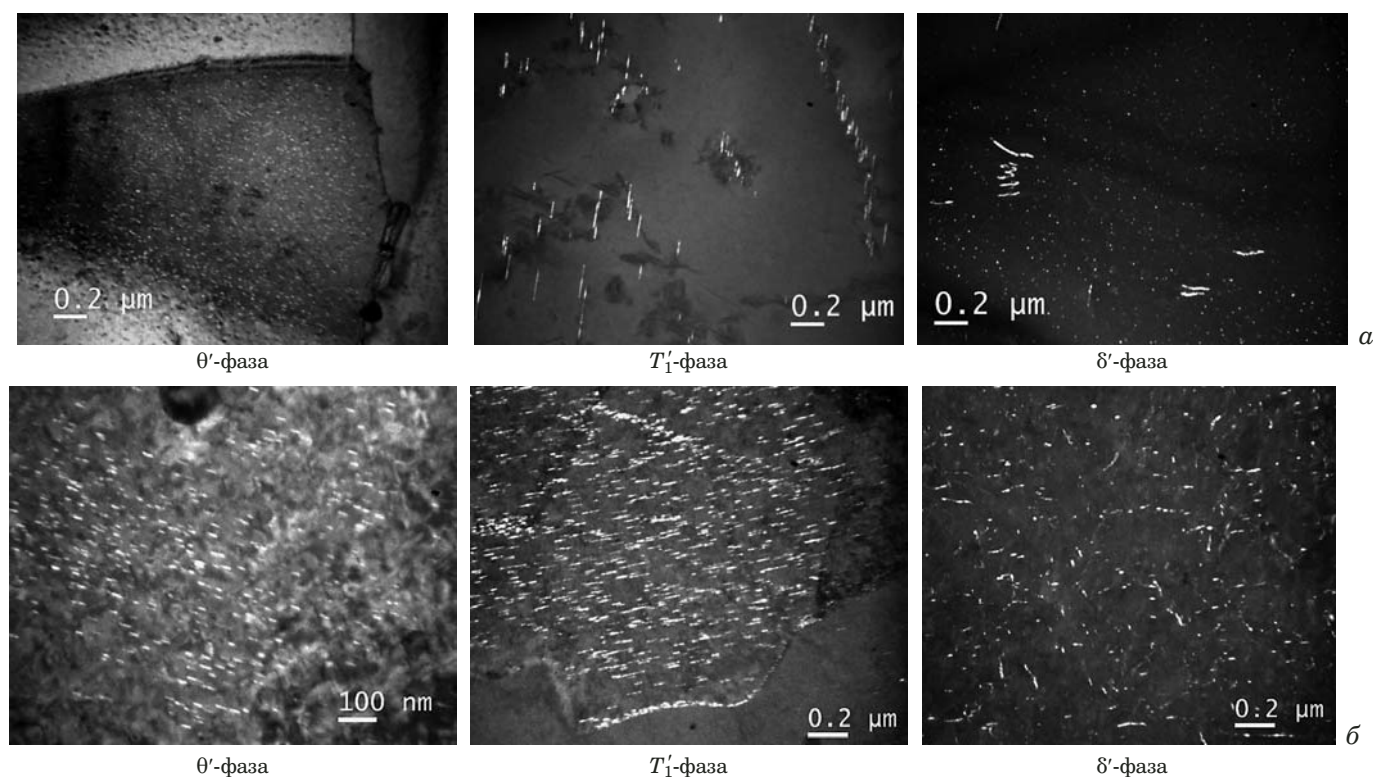
**Рис. 7.** Структура зоны шва сварного соединения сплава В-1469 с присадками Св1221 (а) и Св1209 (б) после закалки и искусственного старения

**Fig. 7.** Microstructure of the welded joint zone of alloy V-1461 after quenching and artificial aging; *a, b* — filler material Sv1221 and Sv1209



**Рис. 8.** Выделения  $\delta'$ -фазы в зоне термического влияния сварного соединения сплава В-1461 без ТО после сварки (а) и после искусственного старения (б) (присадка — Св1209)

**Fig. 8.** Isolation of phase  $\delta'$  in the zone of thermal influence of the welded joint of ally V-1461 without heat treatment after welding (*a*) and after artificial aging (*b*) (filler material Sv1209)



**Рис. 9.** Выделения  $\theta'$ -,  $T_1'$ - и  $S'$ -фаз в зоне термического влияния сварного соединения сплава В-1461 после искусственного старения (а) и после закалки и старения (б) (присадка — Св1209)

**Fig. 9.** Isolation of phases  $\theta'$ ,  $T_1'$ , and  $S'$  (a) in the zone of thermal influence of welded joint of alloy B-1461 after artificial aging and quenching and aging (b) (filler material Sv1209)

миниево-литиевых сплавов В-1461 и В-1469 в сочетании с полной термической обработкой обеспечивает повышение прочностных характеристик сварного соединения до уровня прочности основного материала при достаточно высоких показателях пластичности и ударной вязкости. Рост прочности достигается за счет выделения в материале соединения упрочняющих  $\delta'$ -,  $T_1'$ -,  $S'$ -,  $\theta'$ -,  $\Omega'$ -фаз. Термообработку (закалка + искусственное старение) сварных соединений следует осуществлять по стандартным режимам, рекомендованным для данных сплавов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Вершков А. В. Редкие металлы и редкоземельные элементы — материалы современных и будущих высоких технологий / *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № S2. С. 3 – 10.
2. Скупов А. А., Иода Е. Н., Пантелеев М. Д. Новые присадочные материалы для сварки высокопрочных алюминий-литиевых сплавов / *Труды ВИАМ: электрон. науч.-тех. журн.* 2016. № 9. Ст. 04. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 30.05.2018).
3. Филатов Ю. А. Работы ВИАМ по деформируемым алюминиевым сплавам системы Al – Mg – Sc. История создания, структура, опыт применения, проблемы и перспективы / *Технология легких сплавов*. 2017. № 3. С. 7 – 25.
4. Скупов А. А., Пантелеев М. Д., Иода Е. Н., Мовенко Д. А. Эффективность применения редкоземельных металлов для легирования присадочных материалов / *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 3. С. 14 – 19.
5. Михайличенко А. И., Михлин Е. Б., Патрикеев Ю. Б. Редкоземельные металлы. — М.: Металлургия, 1987. — 232 с.
6. Грушко О. Е., Овсянников Б. В., Овчинников В. В. Алюминиево-литиевые сплавы: металлургия, сварка, металловедение. — М.: Наука, 2014. — 296 с.
7. Махин И. Д., Николаев В. В., Петровичев П. С. Исследование свариваемости сплавов В-1469 и 01570С с использованием электронно-лучевой сварки применительно к конструкции перспективного пилотируемого корабля / *Космическая техника и технология*. 2014. № 4(7). С. 68 – 75.
8. Рязанцев В. И. Сварные конструкции из алюминиевых сплавов с литием / *Авиационная промышленность*. 2005. № 2. С. 32 – 41.
9. Лукин В. И., Скупов А. А., Иода Е. Н. и др. Разработка присадочных материалов для сварки высокопрочных алюминий-литиевых сплавов / *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2017. № 7. С. 24 – 30.
10. Каблов Е. Н., Лукин В. И., Антипов В. В. и др. Эффективность применения присадочных материалов при лазерной сварке высокопрочных алюминий-литиевых сплавов / *Сварочное производство*. 2016. № 10. С. 17 – 21.
11. Лукин В. И., Иода Е. Н., Пантелеев М. Д. и др. Влияние термической обработки на характеристики сварных соединений высокопрочных алюминий-литиевых сплавов / *Труды ВИАМ: электрон. науч.-тех. журн.* 2015. № 4. Ст. 06. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2018).
12. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 7 – 17.
13. Пат. 2163940 РФ, МПК С22 С21/12. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него / Фридляндер И. Н., Каблов Е. Н., Колобнев Н. И., Хохлатова Л. Б., Самохвалов С. В., Воробьев А. А., Петраковский С. А.; заявитель и патентооб-

- ладатель Всероссийский НИИ авиационных материалов. — № 99117392/02; заявл. 09.08.1999; опублик. 10.03.2001.
14. Пат. 2237098 РФ, МПК C22 C21/14. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него / Фридляндер И. Н., Каблов Е. Н., Грушко О. Е., Боровских С. Н., Иванова Л. А.; заявитель и патентообладатель Всероссийский НИИ авиационных материалов. — № 2003123027/02; заявл. 24.07.2003; опублик. 27.09.2004. Бюл. № 6.
  15. Пат. 2604084 РФ, МПК B23 K35/28. Присадочный сплав на основе алюминия, легированный редкоземельными металлами / Каблов Е. Н., Лукин В. И., Иода Е. Н., Свиридов А. В., Пантелеев М. Д., Скупов А. А.; заявитель и патентообладатель Всероссийский НИИ авиационных материалов. — № 2015137405/02; заявл. 02.09.2015; опублик. 10.12.2016. Бюл. № 34.
  16. ГОСТ 6996–66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. — М.: Стандартинформ, 2005. — 44 с.
  17. Аннин Б. Д., Фомин В. М., Карпов Е. В. и др. Комплексное исследование лазерной сварки высокопрочного сплава В-1469 / Авиационные материалы и технологии. 2016. № 3. С. 9 – 16.
  18. Алексеев А. А., Лукина Е. А., Ключкова Ю. Ю. Кристаллическая структура сверхтонких пластинчатых выделений / Физика металлов и металловедение. 2013. Т. 114. № 6. С. 527 – 533.
  19. Лукина Е. А., Алексеев А. А., Хохлатова Л. Б. и др. Закономерности формирования основных упрочняющих фаз в сплавах В-1424 системы Al – Mg – Li – Zn и В-1461 системы Al – Cu – Li – Zn – Mg / Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 9(699). С. 12 – 17.
  20. Каблов Е. Н., Лукина Е. А., Сбитнева С. В. и др. Формирование метастабильных фаз при распаде твердого раствора в процессе искусственного старения Al-сплавов / Технология легких сплавов. 2016. № 3. С. 7 – 17.
  7. Makhin I. D., Nikolaev V. V., Petrovichev P. S. Study of weldability of alloys V-1469 and 01570C using electron-beam welding as applied to the advanced manned spacecraft structure / Kosm. Tekhn. Tekhnol. 2014. N 4(7). P. 68 – 75 [in Russian].
  8. Ryazantsev V. I. Welded constructions of aluminium-lithium alloys / Aviats. Promyshl. 2005. N 2. P. 32 – 41 [in Russian].
  9. Lukin V. I., Skupov A. A., Ioda E. N., et al. Development of filler materials to weld high-strength aluminium-lithium alloys / Vse Mater. Entsikloped. Sprav. N 7. P. 24 – 30 [in Russian].
  10. Kablov E. N., Lukin V. I., Antipov V. V., et al. Efficiency of using filler materials in laser welding of high-strength aluminium-lithium alloys / Svar. Proizv. 2016. N 10. P. 17 – 21 [in Russian].
  11. Lukin V. I., Ioda E. N., Panteleev M. D., et al. Heat treatment influence on characteristics of welding joints of high-strength aluminium-lithium alloys / Tr. VIAM. Elektron. Nauch.-Tekh. Zh. 2015. N 4. Article 06. <http://www.viam-works.ru> (accessed 30.05.2018) [in Russian].
  12. Kablov E. N. The strategic direction of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030 / Aviats. Mater. Tekhnol. 2012. N S. P. 7 – 17 [in Russian].
  13. RF Pat. 2163940. MPK C22 C21/12. Aluminium-based alloy and product made from the same / Fridlyander I. N., Kablov E. N., Kolobnev N. I., Khokhlatova L. B., Samokhvalov S. V., Vorob'ev A. A., Petrakovskii S. A.; applicant and owner All-Russian scientific research institute of aviation materials. — N 99117392; appl. 09.08.1999; publ. 10.03.2001 [in Russian].
  14. RF Pat. 2237098. MPK C22 C21/14. Aluminium-based alloy and product made from the same / Fridlyander I. N., Kablov E. N., Grushko O. E., Borovskikh S. N., Ivanova L. A.; applicant and owner All-Russian scientific research institute of aviation materials. — N 20030123027; appl. 24.07.2003; publ. 27.09.2004. Byull. N 6 [in Russian].
  15. RF Pat. 2604084. MPK B23 K35/28. Aluminium-based filler material, alloyed with rare-earth metals / Kablov E. N., Lukin V. I., Ioda E. N., Sviridov A. V., Panteleev M. D., Skupov A. A.; applicant and owner All-Russian scientific research institute of aviation materials. — N 2015137405; appl. 02.09.2015; publ. 10.12.2016. Byull. N 34.
  16. State Standard GOST 6996–66. Welded joints. Methods for determining mechanical properties. — Moscow: Standartinform, 2005. — 44 p. [in Russian].
  17. Annin B. D., Fomin V. M., Karpov E. V., et al. Complex research of laser welding of high-strength alloy V-1469 / Aviats. Mater. Tekhnol. 2016. N 3. P. 9 – 16 [in Russian].
  18. Alekseev A. A., Lukina E. A., Klochkova Yu. Yu. Crystal structure of ultrathin lamellar precipitates / Fiz. Met. Metalloved. 2013. Vol. 114. N 6. P. 527 – 533 [in Russian].
  19. Lukina E. A., Alekseev A. A., Khokhlatova L. B., et al. Regular features of formation of main hardening phases in alloys V-1424 of the Al – Mg – Li – Zn system and V-1461 of the Al – Cu – Li – Zn – Mg system / Metalloved. Term. Obrab. Met. 2013. N 9(699). P. 12 – 17 [in Russian].
  20. Kablov E. N., Lukina E. A., Sbitneva S. V., et al. Formation of metastable phases during solid solution decomposition in the process of artificial ageing of aluminium alloys / Tekhnol. Legk. Splavov. 2016. N 3. P. 7 – 17 [in Russian].

## REFERENCES