Оригинальное исследование

УДК 621.791.725
DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_245 EDN: XQEDVC

Термическая обработка разнородных лазерных сварных соединений Al-Cu-Li сплавов с существенной разницей в соотношении Li/Cu

И.Е. Витошкин[1], А.Г. Маликов[1], А.П. Завьялов[2], Н.Ю. Бурхинова[1], Е.В. Карпов[3]

[1] Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия;
[2] Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» Института катализа СО РАН, Новосибирск, Россия;
[3] Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Соединение разнородных материалов — сложная, но вместе с тем важная задача для промышленности, поскольку применение разнородных материалов в сложных конструкциях неизбежно. В данной статье приведены результаты работы по оптимизации микроструктуры разнородного лазерного сварного соединения Al-Cu-Li сплавов с различным соотношением Cu/Li.

Цель работы. Целью работы было изучение структуры лазерного сварного соединения между разнородными Al-Cu-Li сплавами, а также разработка методов улучшения этой структуре на основе термической обработки.

Материалы и методы исследования. В работе применялись методы растровой электронной микроскопии, дифракции синхротронного излучения, а также испытания на растяжение. Применение дифракции СИ позволило установить присутствие литий-содержащих фаз, объёмная доля и рассеивающая способность которых не позволяет в полной мере обнаружить их, используя менее яркие источники излучения.

Результаты. Показано, что сварка приводит к формированию неблагоприятной микроструктуры с точки зрения механических свойств — дендритные зёрна алюминия, окруженные эвтектической сеткой из интерметаллидных соединений T_1Al_2CuLi, $T_2Al_6CuLi_3$ и $T_3Al_5CuLi_3$. В таком состоянии сварной шов обладал низкими механическими свойствами: предел прочности σ_B составлял 252 МПа, предел текучести $\sigma_{0,2}$ 184 МПа и относительное удлинение δ 2,9 %. Закалка при 530 °C позволила практически полностью растворить эвтектическую сетку, что было подтверждено растровой электронной микроскопией. Искусственное старение при 170 °C в течении 16 часов позволило добиться рекристаллизации упрочняющих фаз, что привело к увеличению предела прочности сварного соединения σ_B до 344 МПа, предела текучести $\sigma_{0,2}$ до 230 МПа и относительного удлинения δ до 4,8 %.

Заключение. В результате работы была установлена структура лазерных сварных соединения разнородных Al-Cu-Li сплавов, а также показано, что эту структуру можно улучшить при помощи термической обработки, таким образом достигая значительного прироста как прочностных свойств соединения, так и его пластичности.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы; разнородная сварка; лазерная сварка; термическая обработка; дифракция синхротронного излучения; сканирующая электронная микроскопия; испытания на растяжение.

Как цитировать
Витошкин И.Е., Маликов А.Г., Завьялов А.П., Бурхинова Н.Ю., Карпов Е.В. Термическая обработка разнородных лазерных сварных соединений Al-Cu-Li сплавов с существенной разницей в соотношении Li/Cu // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 245–252. DOI: 10.52899/24141437_2025_02_245 EDN: XQEDVC

Рукопись получена: 10.04.2025 **Рукопись одобрена:** 21.04.2025 **Опубликована online:** 27.06.2025

ЭКО • ВЕКТОР

Статья доступна по лицензии CC BY 4.0 International
© Авторы, 2025

Original study article
DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_245 EDN: XQEDVC

Heat Treatment of Laser Welded Dissimilar Al-Cu-Li Joints With Significant Li/Cu Ratio Difference

Igor E. Vitoshkin[1], Alexander G. Malikov[1], Alexey P. Zavjalov[2], Nomina Yu. Burkhinova[1], Evgeniy V. Karpov[3]

[1] Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia;
[2] Boreskov Institute of Catalysis, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia;
[3] Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Joining dissimilar materials is a complex but important task for industry as dissimilar materials are necessary in complex structures. This paper presents the results of microstructure optimization of a laser welded dissimilar Al-Cu-Li joint with different Cu/Li ratios.

AIM: The aim was to study the structure of a laser welded dissimilar Al-Cu-Li joint and to develop methods to improve this structure based on heat treatment.

METHODS: We used scanning electron microscopy, synchrotron radiation diffraction, and tensile testing. Synchrotron radiation (SR) diffraction allowed to detect lithium-containing phases, where they cannot be fully detected using less bright radiation sources due to their volume fraction and scattering.

RESULTS: The study shows that welding promotes creation of a mechanically unfavorable microstructure; dendritic grains of aluminum surrounded by an eutectic network of intermetallic compounds T_1Al_2CuLi, $T_2Al_6CuLi_3$, and $T_3Al_5CuLi_3$. In this state, the weld seam had low mechanical properties; tensile strength σ_B was 252 MPa, yield strength $\sigma_{0.2}$ was 184 MPa, and linear strain δ was 2.9%. Thermal quenching at 530 °C allowed to almost completely dissolve the eutectic network, which was confirmed by scanning electron microscopy. Artificial aging at 170 °C for 16 hours allowed for the recrystallization of the strengthening phases. As a result, the welded joint tensile strength σ_B increased to 344 MPa, yield strength $\sigma_{0.2}$ increased to 230 MPa and the linear strain δ increased to 4.8%.

CONCLUSION: The study allowed to identify the structure of laser welded dissimilar Al-Cu-Li joints and showed that this structure can be improved by heat treatment, ensuring a significant increase in both the strength properties and ductility of the joint.

Keywords: aluminum alloys; dissimilar welding; laser welding; heat treatment; synchrotron radiation diffraction; scanning electron microscopy; tensile testing.

To cite this article
Vitoshkin IE, Malikov AG, Zavjalov AP, Burkhinova NYu, Karpov EV. Heat Treatment of Laser Welded Dissimilar Al-Cu-Li Joints With Significant Li/Cu Ratio Difference. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University.* 2025;4(2):245–252. DOI: 10.52899/24141437_2025_02_245 EDN: XQEDVC

Submitted: 10.04.2025 **Accepted:** 21.04.2025 **Published online:** 27.06.2025

ECO • VECTOR
The article can be used under the CC BY 4.0 license
© Authors, 2025

1. ВВЕДЕНИЕ

Создание сложных конструкций зачастую требует применения множества различных материалов, отвечающих различным, иногда неприменимым к одному материалу, требованиям. Современные авиационные конструкции не исключение. Например, в работе [1] насчитывается более двадцати различных сплавов, применяемых в конструкции одной модели самолета.

Новейшие алюминий-литиевые сплавы третьего поколения уже находят широкое применение в авиастроении [2]. Несмотря на их превосходные механические свойства, технологии их соединения не позволяют полностью раскрыть их потенциал. В настоящее время для этого применяется клепаное соединение, которое, несмотря на почти полное отсутствие ограничений в применимости к каким-либо материалам, обладает существенными недостатками: большая трудоемкость и опасность производства, существенное снижение надежности конструкции и, что немаловажно, существенное влияние на массу конструкции [1]. Применение лазерной сварки взамен клепаного соединения может позволить исключить или по крайней мере существенно уменьшить влияние этих факторов на характеристики авиационных конструкций. Однако для этого необходимо решить проблему микроструктурных изменений, к которым неизбежно приводит процесс сварки.

Данную проблему можно решить, применяя термическую обработку (ТО) к сварным соединениям. В данной работе представлены первые шаги в разработке такой ТО для сварных соединений пары сплавов В-1461/В-1469. Хотя качественно эти сплавы практически не имеют различий в химическом составе, соотношение Li/Cu (определяющее фазовый состав Al-Cu-Li сплавов) существенно отличается: ~6,0 для В-1461 против ~2,8 для В-1469 (в атомных долях). Таким образом, целью данной работы являлось определение влияния температуры закалки на получаемые в результате ТО механические свойства сварного лазерного соединения этих сплавов.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материалов использовались 2-мм листы сплавов В-1461 и В-1469. Их химический состав представлен в табл. 1. Для сварки применялся волоконный лазер производства IPG с длиной волны 1,07 мкм. Параметры режимов сварки были подобраны на предварительном этапе исследования: P = 3 кВт, V = 2,1 м/мин, ΔF = 0 (P — мощность излучения, V — скорость сварки, ΔF — положение фокуса относительно поверхности пластины).

Термическая обработка включала закалку в воде и искусственное старение. Поскольку целью работы являлось определение влияния температуры закалки на конечные свойства сварного соединения, были выбраны две температуры закалки — 530 и 560 °С и одна температура старения — 170 °С. При этом время выдержки составляло 30 минут для закалки и 32 часа для старения в обоих случаях.

Испытания на растяжение выполнялись на электромеханической универсальной разрывной машине Zwick/Roell. Относительное удлинение измерялось при помощи экстензометра на базе 20 мм, в центре которой располагался сварной шов шириной около 1 мм. Рабочее сечение образца составляло 2×10 мм.

Микроструктурные исследования осуществлялись при помощи растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO MA 15, оснащенного детекторами обратнорассеянных (BSD) и вторичных (SE) электронов, а также EDX-детектором Oxford Instruments X-Max 80.

Рентгенофазовые исследования проводились при помощи анализа дифракции синхротронного излучения (СИ), полученной на 8-м канале экспериментальной станции накопительного кольца ВЭПП-4 «Диагностика рентгеновским излучением высоких энергий» на базе электрон-позитронных ускорителей комплекса ВЭПП-4 — ВЭПП-2000 в Институте ядерной физики СО РАН [4]. Накопление сигнала (рис. 1) происходило в геометрии Дебая – Шеррера на плоском двумерном детекторе Mar345 (MarResearch, Германия). Накопление сигнала происходило в центре сварного шва и на удалении от него на ~5 мм по обе стороны от него (для исследования исходных сплавов). Длина волны составляла 0,2591 Å (47,85 кэВ). Пучок имел квадратное сечение с размером сторон 300 мкм. Дистанция между образцом и детектором составляла примерно 610 мм. Толщина образцов — 2 мм. Двумерные картины дифракции преобразовывались в одномерные посредством интегрирования вокруг центрального рефлекса при помощи Area Diffraction Machine [5]. Анализ полученных картин дифракции осуществлялся путем соотношения

Таблица 1. Химический состав сплавов В-1461 и В-1469 (вес. %) [3]
Table 1. Chemical composition of B-1461 and B-1469 alloys (weight %) [3]

Сплав	Al	Li	Cu	Mg	Si	Fe	Zr	Sc	Mn	Другие
V-1461	Осн.	1,5–1,95	2,5–2,95	0,05–0,12	⩽ 0,08	0,01–0,1	0,05–0,12	0,05–0,10	0,2–0,6	Zn: 0,2–0,8 Cr: 0,01–0,05 Ni: 0,05–0,15
V-1469	Осн.	1,0–1,5	3,2–4,5	0,1–0,5	⩽ 0,1	⩽ 0,12	0,04–0,2	0,04–0,15	0,003–0,5	Ag: 0,15–0,6

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_245

положений полученных рефлексов теоретическим положениям для предполагаемых фаз, рассчитанным согласно кристаллографической информации в базе данных Springer Materials [6, 7] и в работе [8]. При построении профилей дифракции каждый из них был нормализован на максимальное значение внутри соответствующего набора данных.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Механические испытания

На рис. 2 представлены результаты механических испытаний сварных соединений до ТО, а также после ТО с двумя разными температурами закалки. Значения нормированы на значения соответствующих показателей сплава В-1461, абсолютные значения которых составляли: σ_B = 550 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 470 МПа, δ = 10,1 %. Результаты испытаний показали, что более высокая температура закалки позволяет сделать материал шва более пластичным в результате старения. В то же время более низкая температура закалки позволила получить более высокие прочностные показатели. Поскольку прочностные показатели являются более значимыми для сварных соединений, температура закалки 530 °С была принята как оптимальная в данном исследовании. Микроструктурные и рентгенофазовые исследования, описанные в последующих главах, будут относиться к сварному соединению, обработанному по этому режиму ТО.

3.2. Растровая электронная микроскопия

На рис. 3 представлены результаты растровой электронной микроскопии (РЭМ) в режиме BSD. В красных квадратах показан снимок той же области с дополнительным увеличением в 2,5 раза. Стрелки с арабскими числами указывают на частицы, исследованные EDX. Кресты с римскими числами указывают на точку анализа химического состава зерен алюминия. Результаты EDX в указанных точках представлены в табл. 2.

РЭМ показала, что исходные сплавы не подвергаются изменениям в результате ТО, которые бы можно было заметить используемым методом. В сплаве В-1461 наблюдаются частицы двух типов: крупные, с размером больше 1 мкм (рис. 3, *a–c*, стрелки 1–3), и мелкие, с размером менее 1 мкм (в красных квадратах на рис. 3, *a-c*). Согласно результатам EDX-анализа (табл. 2), в крупных частицах имеется повышенная концентрация меди, а также таких элементов, как Fe, Mn, Ni и Ca. Хотя, некоторые из этих элементов не заявлены в химическом составе производителем, они могут попасть в сплав вследствие неизбежного загрязнения, в результате чего они формируют подобные частицы вместе с остальными легирующими элементами.

Сплав В-1469 имеет подобную микроструктуру (рис. 3, *g–i*), однако крупные частицы можно разделить на два вида: обогащенные Fe, Ni и Mn (стрелки 8 и 11), как в предыдущем случае, и обогащенные Zr и Sc (стрелки 7, 9 и 10). Частицы того и другого типов также содержат большое количество меди.

Исследование шва показало (рис. 3, *d–f*), что процесс сварки приводит к существенному изменению микроструктуры материала. До ТО она состояла из дендритных зерен алюминия, окруженных сеткой из богатой медью и магнием эвтектики. Закалка привела к растворению большей части этой эвтектики, что увеличило концентрацию легирующих элементов внутри зерен алюминия (табл. 2, точки IV и V).

Как было замечено, часть окружающей зёрна алюминия сетчатой структуры в сварном шве осталась, несмотря

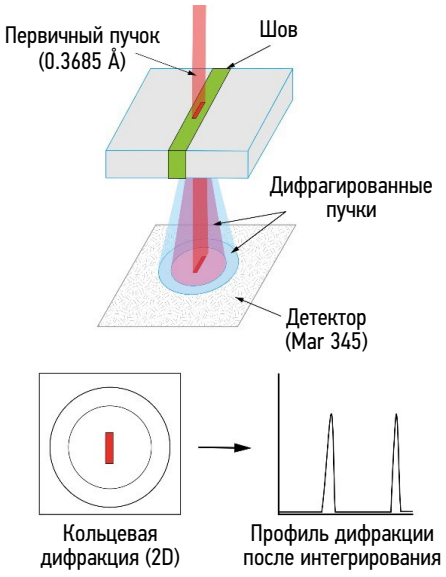

Рис. 1. Схема процесса записи и преобразования картин дифракции.
Fig. 1. Diffraction pattern recording and conversion diagram.

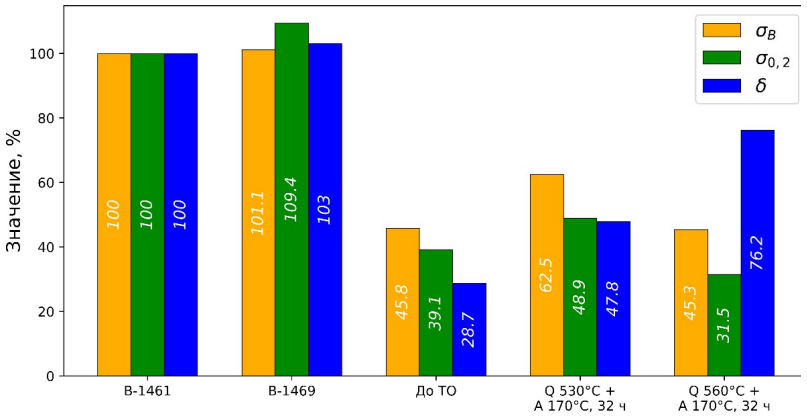

Рис. 2. Результаты испытаний на растяжение (Q — закалка, A — старение).
Fig. 2. Tensile testing (Q, thermal quenching, A, aging).

Таблица 2. Результаты EDX-анализа (ат. %)
Table 2. EDX analysis (at %)

Точка	Al	Cu	Mg	Zn	Sc	Zr	Mn	Fe	Ni	Si	Ca
1	96,61	1,97	0,56	0,21	0,10	–	0,15	0,15	–	–	0,26
2	94,02	3,84	0,48	0,18	–	–	0,16	1,16	0,16	–	–
3	95,77	2,79	0,50	0,22	–	–	0,22	–	–	–	0,50
I	98,16	1,15	0,54	0,14	–	–	–	–	–	–	–
II	98,12	1,09	0,57	0,22	–	–	–	–	–	–	–
III	98,17	1,12	0,51	0,20	–	–	–	–	–	–	–
4	92,32	5,78	1,14	0,27	0,09	–	–	0,17	–	0,22	–
5	92,90	6,40	0,30	–	0,30	–	–	0,10	–	–	–
6	94,50	4,71	0,42	–	0,13	–	–	0,13	–	–	0,11
IV	99,61	0,27	0,12	–	–	–	–	–	–	–	–
V	98,59	1,14	0,26	–	–	–	–	–	–	–	–
VI	98,56	1,09	0,35	–	–	–	–	–	–	–	–
7	96,36	2,30	0,24	–	0,79	0,31	–	–	–	–	–
8	79,88	13,60	–	–	–	–	0,52	5,75	0,25	–	–
9	87,08	11,27	0,18	–	1,33	–	–	–	–	–	0,15
10	95,01	4,31	0,24	–	0,44	–	–	–	–	–	–
11	87,61	8,52	0,21	–	–	–	0,35	3,10	0,21	–	–
VII	98,46	1,31	0,23	–	–	–	–	–	–	–	–
VIII	98,52	1,23	0,25	–	–	–	–	–	–	–	–
IX	98,54	1,23	0,23	–	–	–	–	–	–	–	–

* Li не может быть обнаружен используемым методом

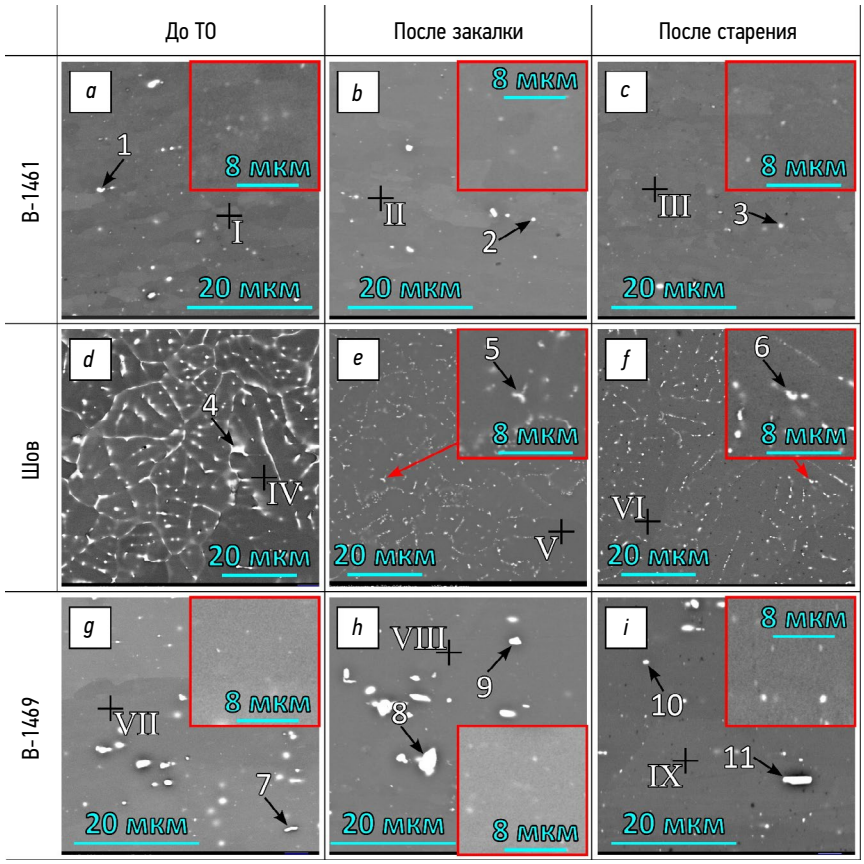

Рис. 3. Микроструктура (РЭМ) до и после каждого этапа ТО сплава В-1461 (*a–c*), сварного шва (*d–f*) и сплава В-1469 (*g–i*).
Fig. 3. Microstructure (SEM) before and after each heat treatment stage of B-1461 alloy (*a–c*), weld seam (*d–f*), and B-1469 alloy (*g–i*).

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_245

на закалку (рис. 3, *d–f*). Учитывая, что оставшиеся частицы имеют схожий химический состав (высокое содержание меди, присутствие Fe и Sc), можно сделать вывод, что эти частицы имеют ту же природу, что и найденные в исходных сплавах.

АНАЛИЗ ДИФРАКЦИИ СИ

Анализ дифракции СИ показал существенные изменения в качественном фазовом составе сварного соединения (рис. 4, *a*). В отличие от В-1461 (рис. 4, *b*), в сварном шве не наблюдается рефлексов δ'-фазы. К тому же пики фаз $\tau_{1\text{-}3}$ и $Al_{20}Cu_2Mn_3$ заметно слабее, нежели в сплаве В-1469 (рис. 4, *c*).

На дифрактограммах видно (рис. 4, *a*, *c*), что сварной шов и сплав В-1469 реагируют на ТО похожим образом. Несмотря на то что обычно закалка приводит к формированию пересыщенного твердого раствора взамен упрочняющих частиц (как это произошло в случае с В-1461, рис. 4, *b*), в случае сварного шва и сплава В-1469 закалка

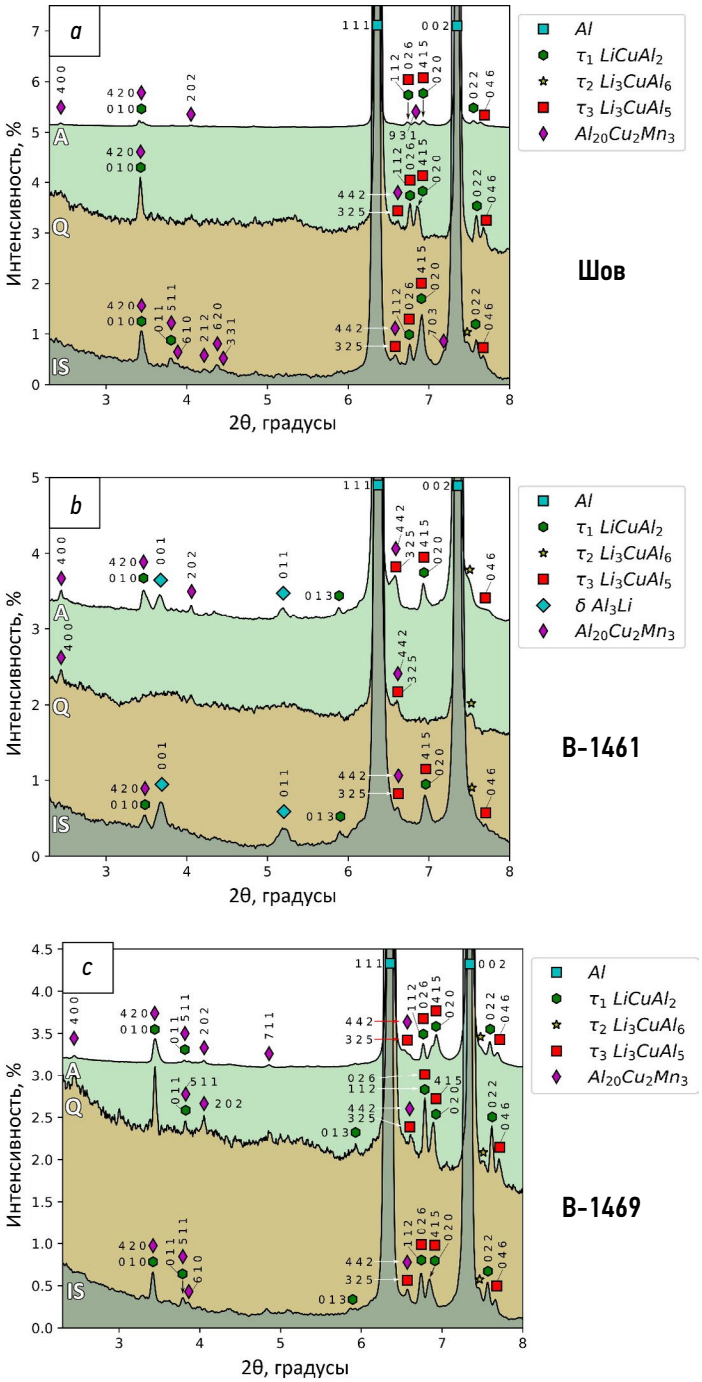

Рис. 4. Профили дифракции СИ для сварного соединения (*a*), сплава В-1461 (*b*) и сплава В-1469 (*c*) в исходном состоянии (IS), после закалки (Q) и старения (A).

Fig. 4. Synchrotron radiation (SR) diffraction profiles of the welded joint (*a*), B-1461 alloy (*b*), and B-1469 alloy (*c*) in the initial state (IS), after thermal quenching (Q), and aging (A).

привела дополнительному росту объема упрочняющих фаз, что можно заключить из существенного увеличения интенсивности рефлексов этих фаз (τ_1 0 2 2 и τ_3 0 4 6). Материал шва и сплав В-1469 отреагировали на закалку также нетипично: несмотря на ожидаемый дальнейший рост объема упрочняющих фаз, существенный их объем, напротив, уменьшился. Поскольку в данной работе не применялась просвечивающая электронная микроскопия, дальнейшее изучение этого феномена было невозможно.

Сплав В-1461 реагировал на ТО типично: закалка привела к формированию пересыщенного твердого раствора за счет растворения упрочняющих фаз, а старение привело к его распаду с выделением этих фаз.

Поскольку интенсивность рефлексов фазы $Al_{20}Cu_2Mn_3$ была крайне мала, анализ ее поведения и отклика на ТО не был возможен.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно результатам проведенных исследований можно заключить, что:

1. Сварка приводит к формированию нежелательной микроструктуры, состоящей из дендритных зерен алюминия, окруженных сеткой из различных интерметаллидных соединений, из-за чего сварной шов до ТО имеет низкие механические свойства: σ_B = 252 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 184 МПа и δ = 2,9 %.

2. Температура закалки существенно влияет на конечные механические свойства сварного соединения. При одинаковых параметрах искусственного старения закалка при 530 °С приводит к большему приросту прочностных свойств, но меньшему приросту пластичности материала сварного шва (σ_B = 344 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 230 МПа и δ = 4,8 %) по сравнению с закалкой при 560 °С (σ_B = 249 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 148 МПа и δ = 7,7 %).

3. Еще одним важным эффектом процесса закалки было почти полное исчезновение интерметаллидной сетки вокруг зерен алюминия. Сами зёрна алюминия приобрели круглую форму взамен дендритной.

4. Материал сварного шва и сплав В-1469 отреагировал на ТО необычно: вместо формирования твердого раствора после закалки вторичные фазы, напротив, увеличили свой объем. Это может быть связано с недостаточно высокой температурой закалки, из-за чего упрочняющие частицы не растворились, а имеющийся твёрдый раствор распался с образованием дополнительных частиц или укрупнением имеющихся.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. И.Е. Витошкин — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, анализ дифракции СИ, анализ и оформление результатов РЭМ, анализ и оформление результатов механических испытаний; А.Г. Маликов — поиск публикаций по теме статьи, концептуализация, поиск финансирования, участие в написании рукописи; А.П. Завьялов — осуществление съёмки дифракции СИ, участие в написании рукописи; Н.Ю. Бурхинова — осуществление РЭМ, участие в написании рукописи; Е.В. Карпов — проведение механических испытаний, участие в написании рукописи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Источники финансирования. Данная работа выполнена в рамках государственного задания Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН Министерства науки и высшего образования РФ. А.П. Завьялов благодарен Министерству науки и высшего образования РФ за финансовую поддержку в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» Института катализа СО РАН (FWUR-2024-0042). В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 — ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

ADDITIONAL INFO

Author contributions: I.E. Vitoshkin: investigation, writing—original draft, formal analysis; A.G. Malikov: investigation, conceptualization, funding acquisition, writing—original draft; A.P. Zavyalov: visualization, writing—original draft; N.Yu. Burkhinova: investigation, writing—original draft; E.V. Karpov: validation, writing—original draft. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Funding sources: The study was conducted within the state assignment of the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. A.P. Zavyalov expresses gratitude to the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for financial support within the state assignment of the Center for Collective Use "Siberian Ring Photon Source" of the Institute of Catalysis, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (FWUR-2024-0042). The study used equipment from the Center for Collective Use "Siberian Center for Synchrotron and Terahertz Radiation," and the VEPP-4-VEPP-2000 Complex, a unique scientific installation, at the Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Disclosure of interests: The authors have no explicit or potential conflicts of interests associated with the publication of this article.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dursun T., Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys // Materials & Design (1980–2015). 2014. № 56. P. 862–871. doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.002
2. Abd El-Aty A. Xunzhong G., Shi-Hong Zh., et al. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al-Li alloys: A review // Journal of Advanced Research. 2018. № 10. P. 49–67. doi: 10.1016/j.jare.2017.12.004
3. Kablov E. N., Antipov V. V., Oglodkova J. S., Oglodkov M. S. Development and Application Prospects of Aluminum–Lithium Alloys in Aircraft and Space Technology // Metallurgist. 2021. № 65 (1). P. 72–81. doi: 10.1007/s11015-021-01134-9
4. Piminov C. A., Baranov G. N., Bogomyagkov A. V., et al. Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4 // Physics Procedia. 2016. № 84. P. 19–26. doi: 10.1016/j.phpro.2016.11.005
5. The Area Diffraction Machine: Analyze 2D powder diffraction data. Дата обращения: 12.09.2024. Режим доступа: https://github.com/joshualande/AreaDiffractionMachine
6. Al-Cu-Li Ternary Phase Diagram Evaluation // Springer Materials. Дата обращения: 12.09.2024. Режим доступа: https://materials.springer.com/msi/docs/sm_msi_r_10_015854_02
7. Al-Li-Mg Ternary Phase Diagram Evaluation // Springer Materials. Дата обращения: 12.09.2024. Режим доступа: https://materials.springer.com/msi/docs/sm_msi_r_10_012175_03
8. Shen Z., Chunhui L., Qingqing D., et al. The structure determination of Al20Cu2Mn3 by near atomic resolution chemical mapping // Journal of Alloys and Compounds. 2014. № 601. P. 25–30. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.02.125

REFERENCES

1. Dursun T, Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Materials & Design (1980–2015)*. 2014;56:862–871. doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.002
2. Abd El-Aty A, Xunzhong G, Shi-Hong Zh, et al. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al-Li alloys: A review. *Journal of Advanced Research*. 2018;10:49–67. doi: 10.1016/j.jare.2017.12.004
3. Kablov EN, Antipov VV, Oglodkova JS, Oglodkov MS. Development and Application Prospects of Aluminum–Lithium Alloys in Aircraft and Space Technology. *Metallurgist*. 2021;65(1):72–81. doi: 10.1007/s11015-021-01134-9
4. Piminov CA, Baranov GN, Bogomyagkov AV, et al. Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4. *Physics Procedia*. 2016;84:19–26. doi: 10.1016/j.phpro.2016.11.005
5. The Area Diffraction Machine: Analyze 2D powder diffraction data. Accessed: 12.09.2024. Available from: https://github.com/joshualande/AreaDiffractionMachine
6. Al-Cu-Li Ternary Phase Diagram Evaluation // Springer Materials. Accessed: 12.09.2024. Available from: https://materials.springer.com/msi/docs/sm_msi_r_10_015854_02
7. Al-Li-Mg Ternary Phase Diagram Evaluation // Springer Materials. Accessed: 12.09.2024. Available from: https://materials.springer.com/msi/docs/sm_msi_r_10_012175_03
8. Shen Z, Chunhui L, Qingqing D, et al. The structure determination of Al20Cu2Mn3 by near atomic resolution chemical mapping. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014;601:25–30. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.02.125

ОБ АВТОРАХ

***Игорь Евгеньевич Витошкин,** младший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН; адрес: Россия, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1; eLibrary SPIN: 1325-8521, ORCID: 0000-0001-5096-7250; e-mail: ghatu0oosj37@mail.ru

Александр Геннадьевич Маликов, д-р техн. наук, заведующий лабораторией, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН; eLibrary SPIN: 2488-7130; ORCID: 0000-0003-1268-8546; e-mail: smalik707@yandex.ru

Алексей Павлович Завьялов, канд. физ.-мат. наук, старший научных сотрудник, Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» Института катализа СО РАН; eLibrary SPIN: 3930-7861; ORCID: 0000-0001-9893-6840; e-mail: zav_alexey@list.ru

Номина Юможаповна Бурхинова, лаборант, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН; e-mail: nomina.burkhinova@mail.ru

Евгений Викторович Карпов, главный научный сотрудник, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН; eLibrary SPIN: 5140-9752; ORCID: 0000-0003-3089-5776; e-mail: evkarpov@mail.ru

AUTHORS' INFO

***Igor E. Vitoshkin,** Junior Research Associate, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; address: 4/1 Institutskaya st., Novosibirsk, 630090, Russia; eLibrary SPIN: 1325-8521; ORCID: 0000-0001-5096-7250; e-mail: ghatu0oosj37@mail.ru

Alexander G. Malikov, Dr. Sci. (Engineering), Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; eLibrary SPIN: 2488-7130; ORCID: 0000-0003-1268-8546; e-mail: smalik707@yandex.ru

Alexey P. Zavjalov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Research Associate, Boreskov Institute of Catalysis, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; eLibrary SPIN: 3930-7861; ORCID: 0000-0001-9893-6840; e-mail: zav_alexey@list.ru

Nomina Yu. Burkhinova, laboratory assistant, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: nomina.burkhinova@mail.ru

Evgeniy V. Karpov, Chief Research Associate, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; eLibrary SPIN: 5140-9752; ORCID: 0000-0003-3089-5776; e-mail: evkarpov@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author