



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Исследование микроструктуры высокопрочных лазерных сварных соединений алюминиево-литиевых сплавов авиационного назначения

Александр Гольшиев<sup>а, \*</sup>, Александр Маликов<sup>б</sup>, Анатолий Оришич<sup>с</sup>

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4243-0602>, [alexgol@itam.nsc.ru](mailto:alexgol@itam.nsc.ru), <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1268-8546>, [smalik@ngs.ru](mailto:smalik@ngs.ru),  
<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0551-0213>, [laser@itam.nsc.ru](mailto:laser@itam.nsc.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.725

#### История статьи:

Поступила: 23 января 2018

Рецензирование: 05 марта 2018

Принята к печати: 17 марта 2018

Доступно онлайн: 15 июня 2018

#### Ключевые слова:

Лазерная сварка  
Алюминиево-литиевые сплавы  
Термообработка  
Микроструктура  
Химический состав  
Микротвердость

#### Финансирование:

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект №17-79-20139 «Разработка научно-технических основ по созданию высокопрочных сварных соединений алюминиево-литиевых сплавов – метод лазерной сваркой».

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Развитие авиационной и аэрокосмической промышленности связано с применением в конструкциях и изделиях современных высокопрочных алюминиевых сплавов. При этом предпочтение отдается алюминиево-литиевым сплавам системы Al-Mg-Li, Al-Cu-Mg-Li, Al-Cu-Li, обладающим пониженной плотностью по сравнению с традиционными сплавами за счет применения Li. При создании пассажирских широкофюзеляжных самолетов применяется как технология заклепочного соединения деталей, при которой используется приблизительно миллион заклепок, так и прогрессивная технология лазерной сварки. Стоит отметить, что на данном этапе развития технология заклепочного соединения уступает лазерной сварке, обеспечивающей большую эффективность и производительность процесса, полную автоматизацию, универсальность и экологическую чистоту. Однако прочность сварных соединений, выполненных сваркой плавлением без дополнительной постобработки, остается низкой. **Целью работы** является проведение сравнительных экспериментальных исследований лазерной сварки высокопрочных алюминиево-литиевых сплавов системы Al-Cu-Li, Al-Cu-Mg-Li и Al-Mg-Li с последующей постобработкой (закалка и закалка совместно со старением) для получения высокопрочного сварного соединения. Установить влияние легирующих элементов, входящих в состав алюминиевых сплавов, на микроструктуру и механические характеристики. **Результаты исследований.** Проведен микроструктурный анализ и исследован химический состав сварных соединений алюминиево-литиевых сплавов. Показано существенное изменение свойств сварного шва при добавлении Mg или Cu в сплав. Установлено, что для сплавов 1420 и 1424 (системы Al-Mg-Li) термическая постобработка приводит к появлению четкой дендритной структуры, причем агрегаты присутствуют как внутри дендрита, так и явно выражена их локализация на границах дендритных зерен. Для сплавов 1441 (система Al-Cu-Mg-Li) и 1469 (система Al-Cu-Li), для которых характерно присутствие меди, такой локализации не наблюдается. С помощью электронной микроскопии обнаружены два типа агрегатов, имеющих принципиально различный химический состав. В одних, имеющих относительно малую концентрацию и размеры до 10 мкм, наблюдается существенное превышение количества редкоземельных элементов, прежде всего, Zr и Sc. В других агрегатах, большое количество которых локализуется на границах дендритных зерен, для сплавов 1420 и 1424 химический состав близок к составу твердого раствора, тогда как для сплавов 1441 и 1469 (содержащих Cu) в темных агрегатах наблюдается повышенное содержание меди. Установлено, что применение комплексного метода для получения неразъемных соединений, включающего как лазерную сварку, так и термическую постобработку образцов, позволило впервые выявить принципиальное отличие процессов кристаллизации систем Al-Mg-Li и Al-Cu-Li. Прочность сварных соединений, выполненных лазерной сваркой, после полной термообработки составила по отношению к основному сплаву: 0,91 – для сплава 1420 (Al-Mg-Li); 0,95 – для сплава 1424 (Al-Mg-Li); 0,94 – для сплава 1441 (Al-Cu-Mg-Li); 0,8 – для сплава 1469 (Al-Cu-Li).

**Для цитирования:** Гольшиев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М. Исследование микроструктуры высокопрочных лазерных сварных соединений алюминиево-литиевых сплавов авиационного назначения // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 50–62. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20-2-50-62.

## Введение

#### \*Адрес для переписки

Гольшиев Александр Анатольевич, к.ф.-м.н., н.с.,  
Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН,  
ул. Институтская, 4/1,  
630090, г. Новосибирск, Россия  
Тел.: +7-923-252-00-12, e-mail: alexgol@itam.nsc.ru

К материалам, применяемым в сварных конструкциях авиакосмической техники, предъявляются особые требования в части обеспечения минимального веса, высокой прочности, большого ресурса и экономической эффективности

эксплуатации сварных конструкций. Использование алюминиево-литиевых конструкционных сплавов с низкой плотностью и повышенными прочностными свойствами является приоритетным направлением совершенствования современных летательных аппаратов. Однако при сварке плавлением – этих перспективных для летательной техники алюминиевых сплавов – возникают определенные трудности. Основной причиной снижения прочности сварного соединения принято считать выгорание легкоиспаряющихся легирующих элементов, таких как магний, литий, цинк, марганец, а также образование пористости и горячих трещин в сварном шве. В результате соединения алюминиево-литиевых сплавов, полученных сваркой плавлением, имеют низкие механические свойства.

Решение этой задачи открыло бы перспективу отказаться от очень трудоемкой и неэффективной технологии заклепочного соединения деталей с использованием миллионов заклепок. Применение данной технологии в настоящее время обусловлено высокими прочностными и усталостными характеристиками этих соединений, которые имеют первостепенное значение для авиации.

В настоящее время созданы новые высокопрочные термически упрочняемые, деформируемые сплавы различных систем, например Al-Mg-Li, Al-Cu-Mg-Li, Al-Cu-Li, пониженной плотности [1–5]. Высокие показатели статической прочности этих систем обусловлены уникальным фазовым составом, который формируется в процессе термической обработки [2, 4–12].

Активно исследуются перспективы применения различных типов сварки, таких как лазерная сварка, сварка трением с перемешиванием, аргонодуговая сварка [13–20]. На сегодняшний момент прочность сварного соединения сплавов системы Al-Li с различными легирующими элементами составляет  $k = 0,7 \dots 0,85$  от прочности основного материала [13, 18–19] без дополнительной обработки сварного шва.

В то же время можно считать установленным, что для увеличения прочности сварного шва современных алюминиевых сплавов систем типа Al-Cu-Li и Al-Mg-Li важно осуществлять дополнительную механическую и термическую обработку шва. Так, исследование изменения

прочности сварного соединения в зависимости от различных видов деформирования описано в работе [14]. В ней показано, что после деформационной обработки для сплава 1424 (Al-Mg-Li) прочность сварного соединения составила 0,95 прочности основного сплава. Оказалось, что для системы типа Al-Cu-Li в отличие от системы Al-Mg-Li улучшение механических свойств может быть достигнуто применением комплексного подхода, включающего в себя лазерную сварку в оптимальном режиме и термическую обработку сваренного образца. Кроме того, показано, что различные легирующие элементы могут существенным образом изменять микроструктуру сварного шва. Эти обстоятельства стимулировали продолжение работ по проведению сравнительных исследований влияния лазерной сварки и термической обработки на микроструктуру сварных швов систем Al-Mg-Li и Al-Cu-Li.

В настоящей работе впервые с использованием оптической и электронной микроскопии проведено комплексное сравнительное исследование влияния термической обработки и вида легирующих элементов на микроструктуру сварных швов сплавов 1420 (Al-Mg-Li), 1424 (Al-Mg-Li), 1441 (Al-Cu-Mg-Li), 1469 (Al-Cu-Li).

### Методика исследований

Лазерная сварка производилась на АЛТК «Сибирь-1», который включает в себя непрерывный  $\text{CO}_2$ -лазер мощностью до 8 кВт и длиной волны излучения 10,6 мкм. Данная установка разработана в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН. Фокусировка лазерного излучения проводилась с помощью ZnSe-линзы с фокусным расстоянием 254 мм. Для защиты сварного шва использовался гелий. Оксидная пленка на поверхности устранялась на толщину 0,15...0,20 мм с помощью химического фрезерования. Непосредственно перед сваркой кромки образцов зачищались до блеска с помощью металлического шабера.

Измерения прочности сварных соединений при статическом растяжении проводились на электромеханической испытательной машине Zwick/Roell Z100. Образцы для испытаний на прочность по схеме «рыбий скелет» поперек шва

изготавливались согласно ГОСТ Р ИСО 4136–2009. Изучение макро- и микроструктуры сварных швов проводилось с помощью конфокального оптического микроскопа Olympus LEXT OLS3000. Спектральный анализ производился на сканирующем электронном микроскопе LEO 1430 VPI, снабженном энергетическим детектором IPX OXFORD. Термообработка осуществлялась в камерной печи Carbolite. Подготовка шлифов образцов велась на автоматических отрезных и полировальных машинах пробоподготовки (Presi). После полировки образцы подвергались в течение 30 с травлению в химическом реактиве Келлера. Измерение микротвердости производилось на приборе твердомер Micromet 5114 путем вдавливания правильной четырехгранной алмазной пирамиды под нагрузкой 100 г в плоскую поверхность образца.

В качестве алюминиево-литиевых сплавов выбраны следующие: сплав 1420 системы Al-Mg-Li; 1424 системы Al-Mg-Li, 1441 системы Al-Cu-Mg-Li, 1469 системы Al-Cu-Li.

Сплав 1420 является промышленным сплавом авиационного назначения (сварные герметичные отсеки, окантовки иллюминаторов, люки и лючки, компоненты кабины и др.). Использование данного сплава в авиа- и ракетостроении позволяет снизить массу клепаной конструкции до 12 %. Данный сплав был применен в конструкции самолетов Як-36, Як-38, МиГ-29М, Су-27, Як-42, Ту-204.

Сплав 1424 является улучшенной модификацией сплава 1420 за счет дополнительного

легирования цинком и скандием при некотором снижении содержания лития и магния. Данный сплав отличается от сплава 1420 более высокими характеристиками статической прочности, вязкости разрушения, малоциклового усталости и проявлением эффекта сверх пластичности. Сплав 1424 является перспективным сплавом для применения в сварной конструкции фюзеляжа самолетов семейства МС (Россия) и Airbus (EU).

Среднепрочный высокоресурсный промышленный сплав 1441 является перспективным для внедрения в авиапромышленность за счет высокой технологичности при холодной и горячей деформации. Он обладает хорошей коррозионной стойкостью и рекомендуется для обшивки фюзеляжа и внутреннего силового набора самолета. Данный сплав используется в качестве обшивочных листов для самолетов Бе-200, Бе-103.

Сплав 1469 – первый в России алюминиево-литиевый сплав, который по удельной прочности превосходит существующие алюминиевые деформируемые сплавы и обладает при этом высокими характеристиками коррозионной стойкости, трещиностойкости и усталостной долговечности. Этот сплав является наиболее перспективным алюминиевым сплавом для применения в силовых конструкциях ракетно-космической техники.

Типичный химический состав исследуемых сплавов представлен в табл. 1.

Образцы алюминиевых сварных соединений были получены при технологических режимах

Таблица 1

Table 1

### Химический состав алюминиевых сплавов (вес.%)

#### Chemical composition of aluminum alloys (in wt.%)

Химический элемент	Наименование			
	1469	1441	1424	1420
Cu	3,2...4,5	1,6...1,9	–	–
Mn	0,05...0,08	0,01...0,04	–	0,1...0,25
Li	1,0...1,7	1,7...2,0	1,61	1,8...2,2
Zr	0,02...0,26	0,02...0,26	0,09	0,01
Sc	0,02...0,28	–	0,07	–
Mg	0,01...0,5	0,7...1,1	5,4	5,8...6,2
Ag	0,45	–	–	–
Zn	0,2	–	0,7	0,05...0,01
Ti	–	0,07	–	–



после предварительной оптимизации лазерной сварки: мощности излучения 3 кВт, скорости сварки 4 м/мин, заглублении фокуса в глубину материала 3 мм.

После сварки они подвергались термообработке. Режимы термообработки сплавов 1441 и 1469 [2] следующие: закалка в воде после выдержки при температуре 530 °С в течение 30 мин; искусственное старение 24 ч при температуре 160 °С. Скорость нагрева в обоих случаях составляла 5 °С/мин.

Для сплавов 1424 и 1420 (система Al-Mg-Li) были выбраны следующие режимы термообработки [3]: закалка до 450 °С с выдержкой 30 мин и охлаждением на воздухе, скорость нагрева 8 °С/мин; искусственное старение 12 ч при 120 °С (скорость нагрева 5 °С/мин) и охлаждение на воздухе.

## Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показано изменение микроструктуры алюминиевых сплавов без лазерного воздействия под влиянием термической обработки.

Из рисунка видно, что все исходные сплавы имеют типичную рекристаллизованную структуру, а дендритной структуры не наблюдается.

На рис. 2 представлены данные, демонстрирующие влияние термической обработки: закалка и закалка совместно со старением на микроструктуру в области сварного шва алюминиевых сплавов 1424, 1420 системы Al-Mg-Li, 1441 системы Al-Cu-Mg-Li и 1469 системы Al-Cu-Li.

Отметим, что основу всех сплавов составляет  $\alpha$ -твердый раствор с включением легирующих элементов. Микроструктура сварного шва принципиально отличается от основного сплава.

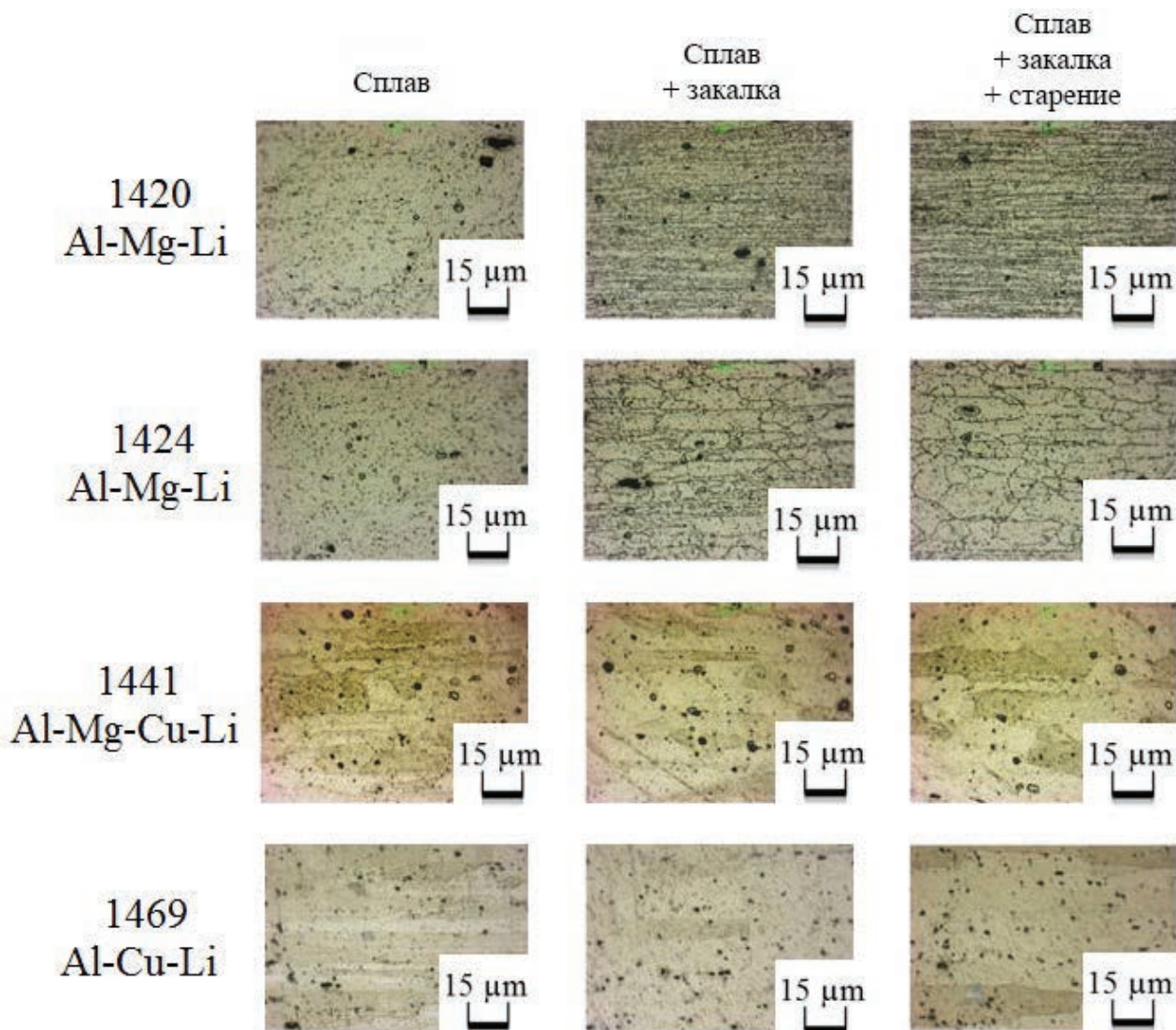


Рис. 1. Микроструктура исходного сплава до и после термической обработки

Fig. 1. The microstructure of the base alloy, after quenching, and after quenching with artificial ageing

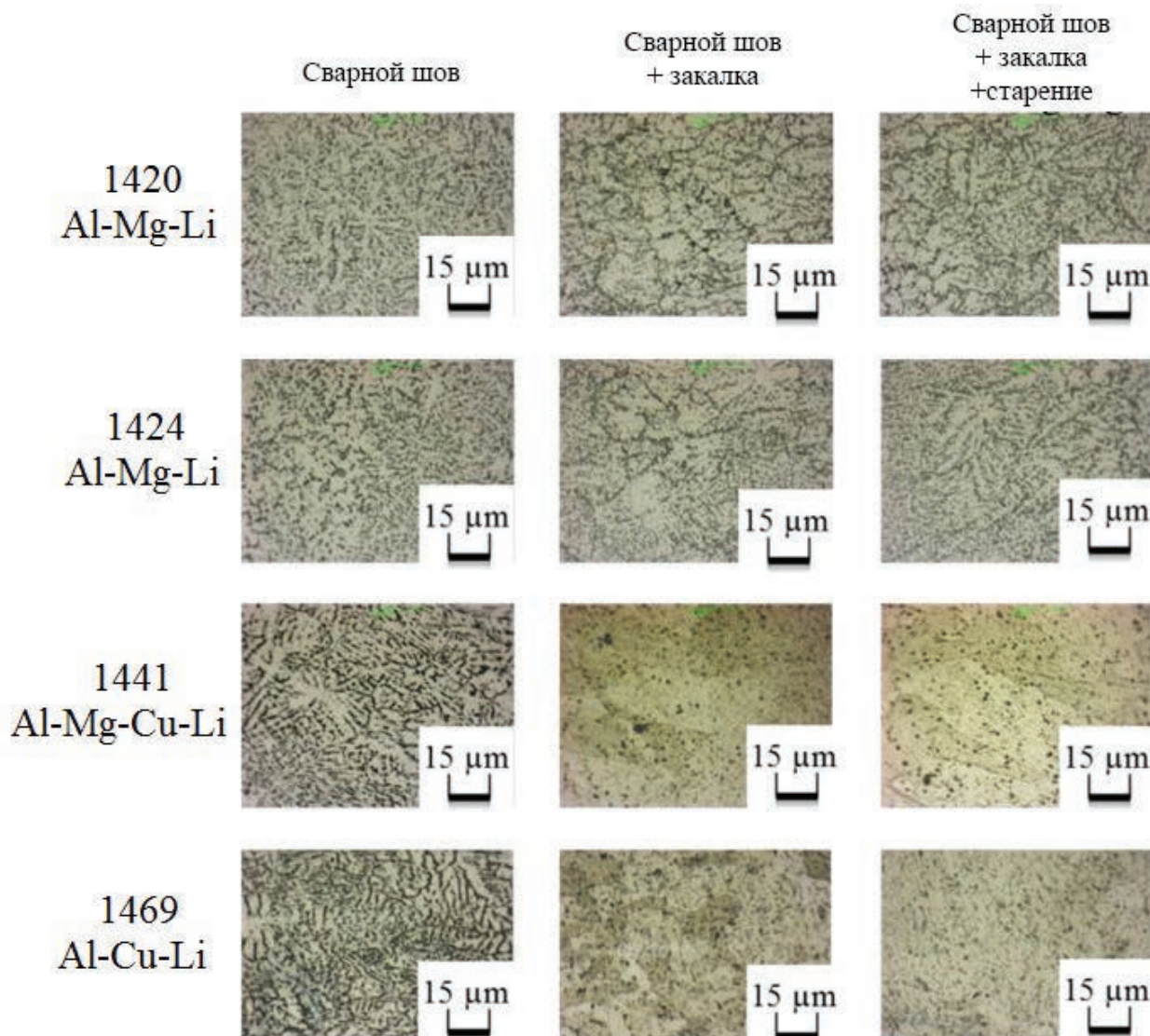


Рис. 2. Микроструктура сварных швов до и после термической обработки

Fig. 2. The microstructure of the welded joint, after quenching, and after quenching with artificial ageing

В процессе лазерной сварки в сварочной ванне происходило полное разрушение исходной структуры материала. Твердый раствор после переплавления находится в двухфазной области. При этом в сварном шве темные агрегаты преимущественно располагались на границах дендритных зерен, делая их очень контрастными. Термообработка существенно изменяла микроструктуру шва для сплава системы Al-Cu-Mg-Li и Al-Cu-Li, происходило дробление структуры темных агрегатов. Для сплавов системы Al-Mg-Li термическая обработка приводила к структурированию темных агрегатов, которые присутствуют как внутри дендрита, так и располагаются на границах дендритных зерен.

На рис. 3 показано изменение микротвердости HV0.1 в зависимости от центра шва для всех исследуемых алюминиевых сплавов. Вертикальные пунктирные линии показывают зону сварного шва. Из рис. 3 видно, что для сплава 1420 значения микротвердости сварного соединения и основного металла близки. В то же время для сплава 1469 микротвердость сварного соединения существенно меньше по сравнению с основным сплавом.

На рис. 4 и 5 представлены фотографии микроструктуры, сделанные с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) в режиме обратнорассеянных электронов.

Приведенные данные наглядно демонстрируют принципиальное различие процесса кристал-



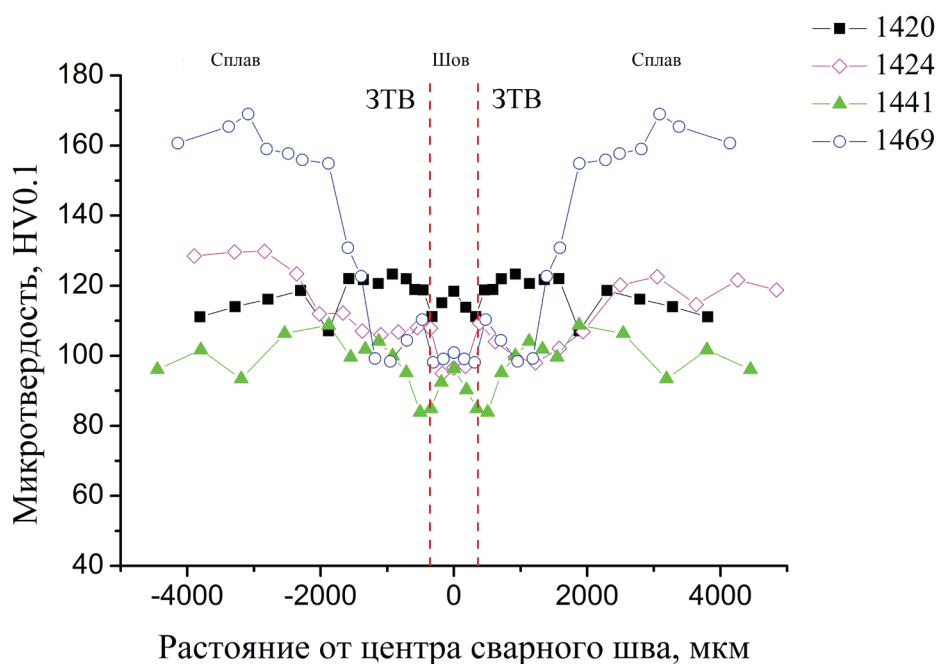


Рис. 3. Изменение микротвердости HV0.1 при разных расстояниях от центра сварного соединения

Fig. 3. Change of microhardness HV0.1 at different distances from the center of the welded joint

лизации используемых сплавов, т.е. влияние наличия Cu или Mg на процесс формирования микроструктуры. Внутри металлической матрицы твердого раствора находятся частицы-агрегаты с широким разбросом по размерам от долей микрона до порядка 10 мкм. При оптических измерениях эти агрегаты имеют темный цвет, тогда как электронный микроскоп для всех исследуемых сплавов позволил выделить два типа агрегатов: темные и светлые. Интересно отметить, что эти агрегаты очень часто объединяются в единый агрегат (см., например, рис. 4, исходный сплав 1420). После закалки количество этих агрегатов увеличивалось для всех сплавов. Закалка и старение приводили к некоторому их уменьшению. Для сплавов 1420 и 1424 (система Al-Mg-Li) термическая обработка приводила к появлению четкой дендритной структуры, причем агрегаты присутствуют как внутри дендрита, так и явно выражена их локализация на границах дендритных зерен, что приводит к контрастному выделению этих зерен как при оптическом (см. рис. 2), так и при электронном (см. рис. 4) методе наблюдения. Для сплавов 1441 и 1469, для которых характерно присутствие меди, такой локализации не наблюдается.

В процессе сварки в сварочной ванне расплава происходило полное разрушение исходной структуры материала, и при кристаллизации формировалась типичная зеренная структура.

В сварном шве для всех исследуемых алюминиевых сплавов количество темных агрегатов резко возрастало, что подтверждают оптические и электронные измерения (см. рис. 2 и 5). Эти агрегаты преимущественно располагаются на границах дендритных зерен, делая их очень контрастными. Характерный размер агрегатов около 1 мкм.

Принципиальным моментом является различие влияния термической обработки на микроструктуру сварного шва (рис. 2 и 5). При легировании Mg (сплавы 1420 и 1424) после закалки и закалки со старением наблюдается уменьшение количества темных агрегатов, однако их оказывается достаточно для четкого выделения дендритных зерен. При сварке сплавов, легированных Cu (сплавы 1441 и 1469), ситуация существенно изменяется. Структуры в виде дендритных зерен, четко присутствующие в сварном шве, исчезают при проведении закалки. Это фиксируется как оптическими, так и электронными наблюдениями. Количество темных агрегатов резко уменьшается.

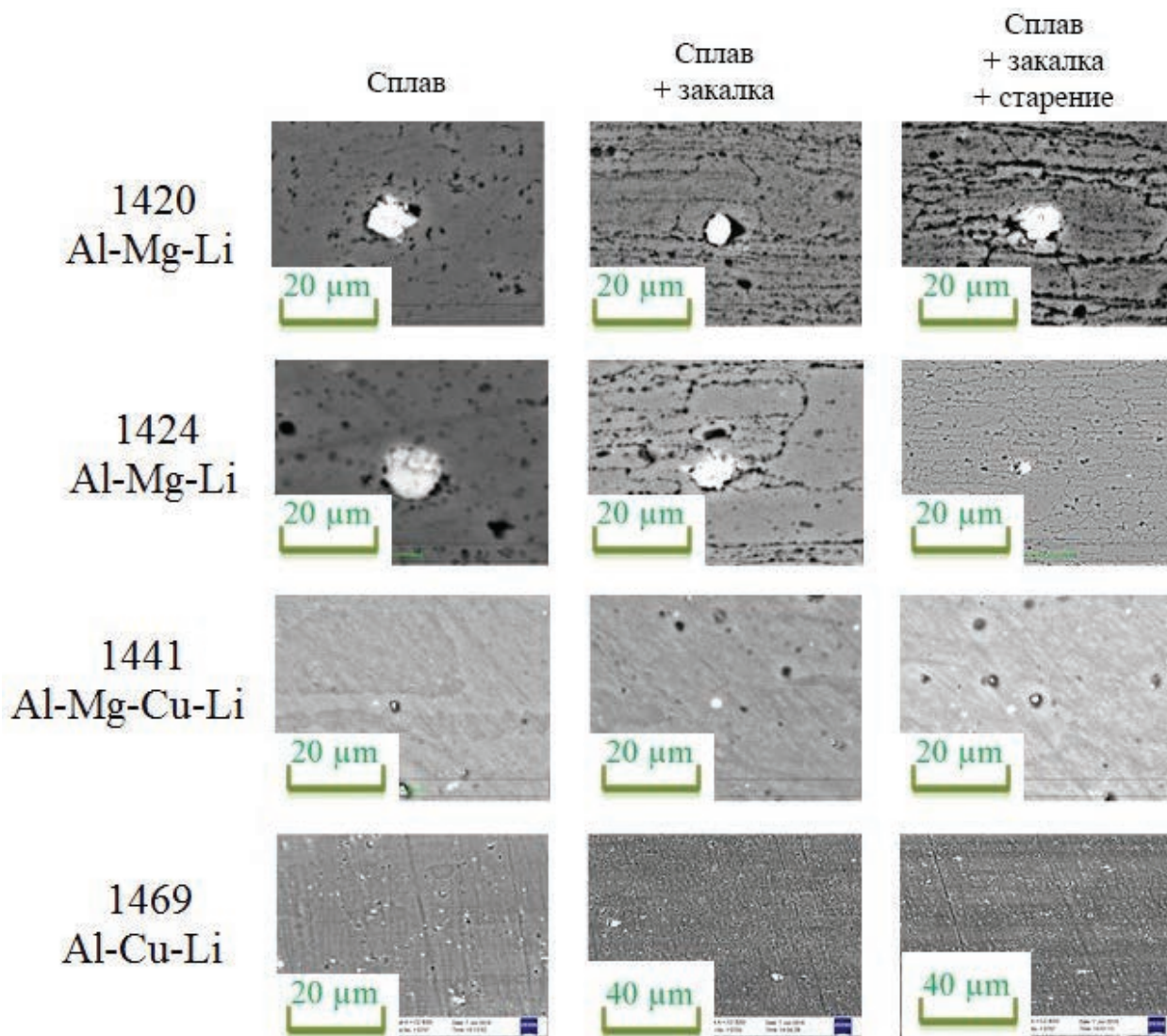


Рис. 4. Изображения микроструктуры исходного сплава при различном термическом воздействии, полученные с помощью РЭМ

Fig. 4. SEM images of the microstructure of the base alloys under different thermal effects

Контроль химического состава показал, что светлые агрегаты как в исходных сплавах, так и в швах значительно обогащены различными легирующими элементами, особенно редкоземельными. Их концентрация возрастает (преимущественно в швах) по сравнению с твердым раствором в 10...1000 раз. Например, в шве сплава 1420 в светлом агрегате концентрация по весу циркония достигала 27 %, магния 1,56 %, в то время как в твердом растворе сварного шва Zr не регистрировался (в исходном сплаве составлял 0,01 %), а концентрация Mg – 5,5 % (рис. 6).

В светлом агрегате шва сплава 1469 зарегистрированы: Sc (6,6 %), Zr (21 %) и Cu (1,28 %), тогда как в твердом растворе сварного шва зафиксирована кроме Al только Cu (1,56 %), рис. 7.

Темные агрегаты имеют принципиально другой состав. Для сплавов системы Al-Mg-Li содержание основных легирующих элементов близко к твердому раствору. Так, например, в шве сплава 1420 зарегистрированы только Al и Mg с концентрацией по весу 3,38...4,06 %. Интересно отметить, что регистрируемый состав темных агрегатов и твердого раствора в шве для сплавов 1420 и 1424 близкий. В то же время они по-разному выглядят как при оптических, так и электронных измерениях. Вероятно, это обусловлено различием фазового состава.

Темные агрегаты систем, содержащих Cu, характеризуются повышенным содержанием основных легирующих элементов. Например, в темном агрегате шва сплава 1441 регистри-



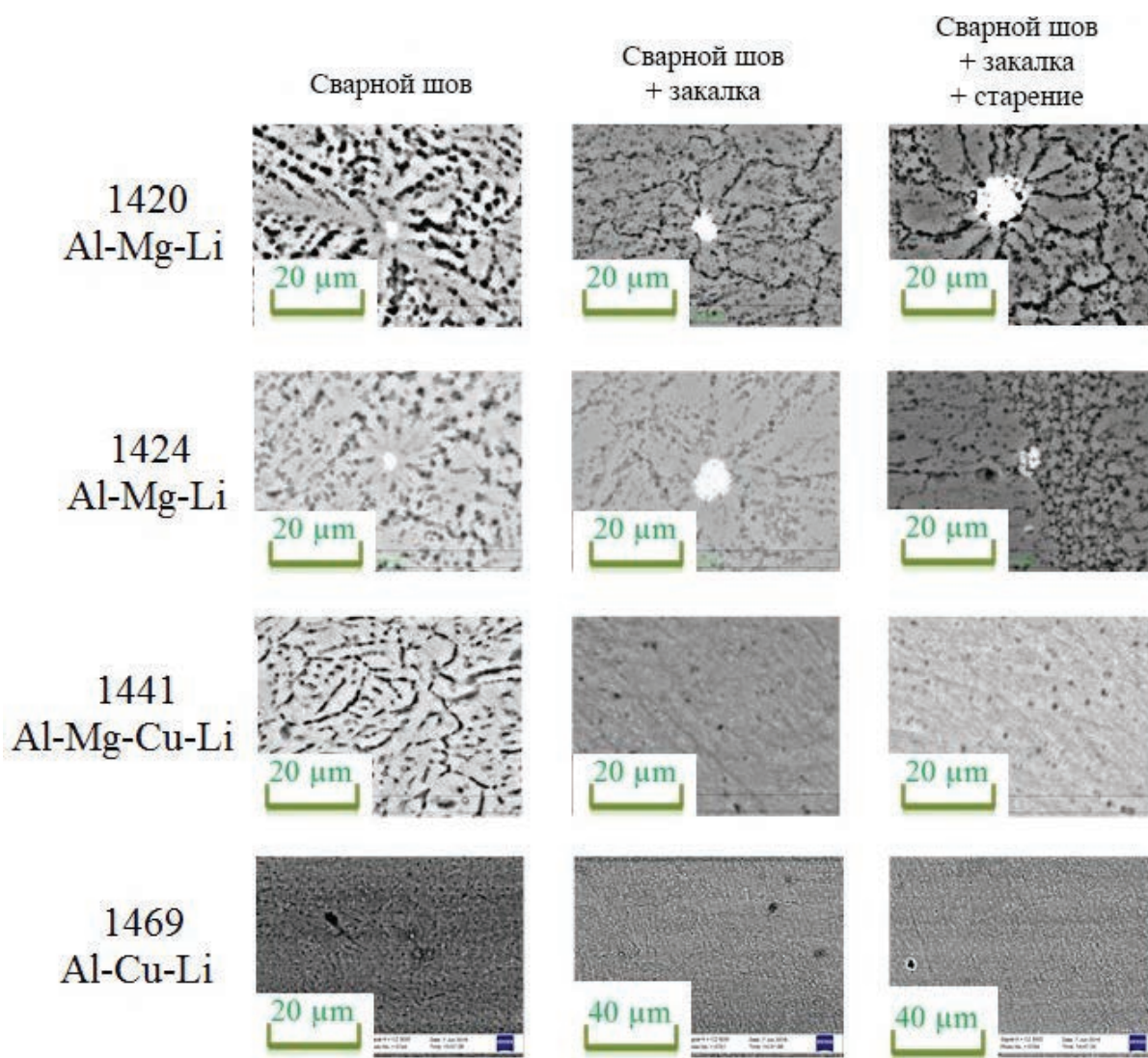


Рис. 5. Изображения микроструктуры сварного шва исследуемых сплавов при различном термическом воздействии, полученные с помощью РЭМ

Fig. 5. SEM images of the microstructure of the welded joint of the investigated alloys under different thermal effects

ровано повышенное содержание Cu (7,2 %), в то же время содержание Mg (0,56 %), а в шве сплава 1469 в темном агрегате зарегистрирована концентрация Cu (57 %). После термической обработки количество темных агрегатов уменьшается, однако и состав в пределах экспериментального разброса не изменяется. Процессы концентрации легирующих элементов в различных агрегатах, количество которых резко возросло в сварном шве, приводило к обеднению этими элементами твердого раствора сплавов системы Al-Cu-Li.

Для систем Al-Mg-Li и Al-Mg-Cu-Li снижение Mg было незначительно, т. е. для сплава 1420 концентрация Mg в твердом растворе шва составляла 5,3 % (исходный сплав – Mg

(5,8...6,2 %) и в сплаве 1424 изменялась в интервале 2,8...4,3 % (исходный сплав – Mg (5,4 %)). Для сплава 1469 (Al-Cu-Li) в твердом растворе сварного шва зарегистрировано снижение концентрации меди в два раза, которое восстанавливалось после проведения термической обработки закалки и старения.

В сплавах системы Al-Mg-Li могут образовываться следующие фазы:  $\delta$  (AlLi); метастабильная фаза  $\delta'$  (Al<sub>3</sub>Li), являющаяся упрочняющей фазой; равновесная S1 фаза (Al<sub>2</sub>MgLi);  $\beta$  (Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>). Исследуются структурные изменения данных фаз от различных видов термообработки. При этом характерные размеры S1 – сотни нанометров, а  $\delta'$  – десятки нанометров.



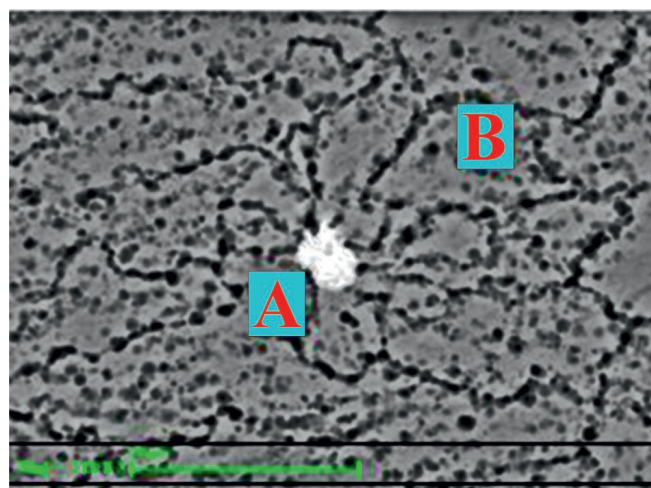


Рис. 6. Изображение, полученное с помощью РЭМ: светлый агрегат (А), твердый раствор сварного шва (В) сплава 1420

Fig. 6. SEM image: light aggregate (A), weld joint solid solution (B) of the alloy 1420

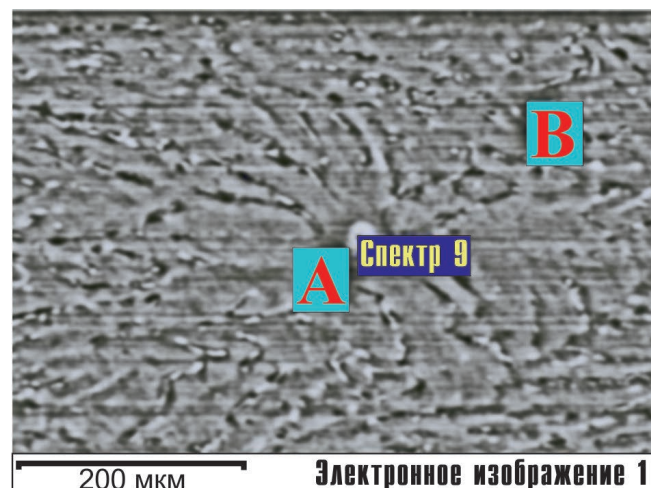


Рис. 7. Изображение, полученное с помощью РЭМ: светлый агрегат (А); твердый раствор сварного шва (В) сплава 1469

Fig. 7. SEM image: light aggregate (A), weld joint solid solution (B) of the alloy 1469

В сплавах системы Al-Cu-Li: основные фазы  $\theta$  ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ), T1 ( $\text{Al}_2\text{CuLi}$ ),  $\delta'$ -фаза ( $\text{Al}_3\text{Li}$ ), но при содержании меди более 3,5 % в сплаве  $\delta'$ -фаза ( $\text{Al}_3\text{Li}$ ) едва образуется. Добавление в алюминиевые сплавы редкоземельных элементов (Sc, Zr, Ag) приводит к образованию других фаз, в частности,  $\beta'$ -фазы ( $\text{Al}_3\text{Zr}$ ); W-фазы (сформированную элементами Al, Cu и Sc);  $\Omega$ -фазы (сформированную элементами Mg и Ag);  $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$  фазы; фазы  $\text{Al}_3\text{Sc}$ . Причем стоит заметить, что данные фазы влияют на прочностные свойства, твердость алюминиевых сплавов и меняют свою структуру в зависимости от различных видов термообработки.

В сварных швах сплавов системы Al-Mg-Li и Al-Cu-Mg-Li отсутствует диффузионная агломерация магния по границам дендритных зерен.

В то же время наблюдается диффузионная агломерация меди по границам дендритных зерен для сплавов системы Al-Cu-Mg-Li и особенно для сплава Al-Cu-Li с повышенным содержанием Cu, где зарегистрировано снижение концентрации меди в два раза в твердом растворе.

Это, возможно, объясняет, что прочность сварного соединения для алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Li составляет 0,8 от прочности основного сплава, а для системы Al-Cu-Li – 0,55 без постобработки сварного шва (табл. 2).

В табл. 2 приведены механические характеристики для всех исследуемых сплавов, сварных швов и сварных швов после полной термообработки, где  $\sigma_b$  – прочность на разрыв;  $\delta$  – относительное удлинение. Для каждой серии испытывалось минимум пять образцов.

Таблица 2

Table 2

**Механические характеристики исследуемых сплавов**  
**Mechanical characteristics of the investigated alloys**

Зона измерения	Сплав 1420 (Al-Mg-Li)		Сплав 1424 (Al-Mg-Li)		Сплав 1441 (Al-Cu-Mg-Li)		Сплав 1469 (Al-Cu-Li)	
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
Основной сплав	450	9,0	463	8,6	435	11,0	557	10,2
Сварной шов	342	2,5	376	2,4	303	1,0	306	3,1
Сварной шов после ТО	410	4	438	13,3	410	8,2	440	11,7

Однако максимальные прочностные свойства сплавов системы Al-Mg-Li и Al-Cu-Li зависят от концентрации различных фаз, имеющих характерные размеры от 2...30 до 100 нм. Вероятно, для восстановления концентрации данных фаз для сварного шва и тем самым повышения прочностных свойств по сравнению с исходными сплавами необходима оптимизация времени и режимов термообработки. Контроль данных фаз следует осуществлять методами просвечивающей микроскопии и рентгеновской дифракцией.

### Выводы

Таким образом, проведено комплексное исследование микроструктуры и спектрального анализа сварного шва современных высокопрочных Al-Li сплавов с различными легирующими элементами. Показано существенное изменение их свойств при добавлении Mg или Cu в сплав. В частности, сплавы 1420 и 1424 (системы Al-Mg-Li) сохраняют дендритную структуру после термической обработки (заковки и старения). Для системы Al-Cu-Li в сварном шве характерно формирование мощной дендритной структуры, на границе зерен которой скапливается большое количество темных частиц – агрегатов. Термическая обработка образцов коренным образом изменяет микроструктуру. Четкая дендритная структура, возникающая в сварном шве при затвердевании расплава, после последующей заковки и старения становится слабо выраженной с размытыми границами. Происходит существенное уменьшение количества частиц, которые преимущественно располагались на границе зерен и делали их более контрастными.

С помощью электронной микроскопии обнаружены два типа агрегатов, имеющих принципиально различный химический состав. В одних – с относительно малой концентрацией и размерами до 10 мкм – наблюдается существенное превышение количества редкоземельных элементов, прежде всего Zr и Sc. В других агрегатах, большинство из которых локализуется на границах дендритных зерен, для сплавов 1420 и 1424 химический состав близок к составу твердого раствора, тогда как для сплавов 1441 и 1469 (содержащих Cu) в темных агрегатах наблюдается повышенное содержание меди.

Прочность сварных соединений после полной термообработки составила по отношению к основному сплаву: 0,91 – для сплава 1420 (Al-Mg-Li), 0,95 – для сплава 1424 (Al-Mg-Li), 0,94 – для сплава 1441 (Al-Cu-Mg-Li), 0,8 – для сплава 1469 (Al-Cu-Li).

Таким образом, применение комплексного метода получения неразъемных соединений, включающего как лазерную сварку, так и термическую обработку образцов, позволило впервые выявить их принципиальные особенности и отличие процессов кристаллизации систем Al-Mg-Li и Al-Cu-Li.

### Список литературы

1. Prasad N., Gokhale A., Wanhill R. Aluminum–lithium alloys: processing, properties, and applications. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. – 608 p.
2. Структура и свойства листов из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 / Ю.Ю. Ключкова, Г.Г. Ключков, В.А. Романенко, В.И. Попов // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 4. – С. 3–8. – doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-3-8.
3. Thermally stable aluminum-lithium alloy 1424 for application in welded fuselage / I. Fridlyander, L. Khokhlatova, L. Khokhlatova, N. Kolobnev, K. Rendiks, G. Tempus // Metal Science and Heat Treatment. – 2002. – Vol. 44. – P. 3–8. – doi: 10.1023/A:1015359900319.
4. Rioja R.J., Liu J. The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2012. – Vol. 43. – P. 3325–3337. – doi: 10.1007/s11661-012-1155-z.
5. Dursun T., Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys // Materials and Design. – 2014. – Vol. 56. – P. 862–871. – doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.002.
6. Ber L.B., Teleshov V.V., Ukolova O.G. Phase composition and mechanical properties of wrought aluminum alloys of the system Al-Cu-Mg-Ag-Xi // Metal Science and Heat Treatment. – 2008. – Vol. 50. – P. 220–227. – doi: 10.1007/s11041-008-9055-y.
7. Gazizov M., Kaibyshev R. Effect of over-aging on the microstructural evolution in an Al-Cu-Mg-Ag alloy during ECAP at 300°C // Journal of Alloys and Compounds. – 2012. – Vol. 527. – P. 163–175. – doi: 10.1016/j.jallcom.2012.02.144.
8. Solidification behaviour and the effects of homogenisation on the structure of an Al-Cu-Mg-Ag-Sc alloy / M. Gazizov, V. Teleshov, V. Zakharov, R. Kaibyshev // Journal of Alloys and Compounds. – 2011. – Vol. 509. – P. 9497–9507. – doi: 10.1016/j.jallcom.2011.07.050.

9. *Gazizov M., Kaibyshev R.* Kinetics and fracture behavior under cycle loading of an Al–Cu–Mg–Ag alloy // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2016. – Vol. 117. – P. 725–734. – doi: 10.1134/S0031918X16050069.
10. Double-sided laser beam welded T-joints for aluminum-lithium alloy aircraft fuselage panels: effects of filler elements on microstructure and mechanical properties / B. Han, W. Tao, Y. Chen, H. Li // *Optics and Laser Technology*. – 2017. – Vol. 93. – P. 99–108. – doi: 10.1016/j.optlastec.2017.02.004.
11. *Zhang X., Yang W., Xiao R.* Microstructure and mechanical properties of laser beam welded Al–Li alloy 2060 with Al–Mg filler wire // *Materials and Design*. – 2015. – Vol. 88. – P. 446–450. – doi: 10.1016/j.matdes.2015.08.144.
12. Effect of heat treatment of the mechanical properties and corrosion resistance of welded joints in high-strength aluminium–lithium alloys / V.I. Lukin, E.N. Ioda, M.D. Panteleev, A.A. Skupov, M.A. Fomina, V.V. Ovchinnikov // *Welding International*. – 2017. – Vol. 31. – P. 477–480. – doi: 10.1080/09507116.2016.1268767.
13. *Rongshi X., Xinyi Z.* Problems and issues in laser beam welding of aluminum-lithium alloys // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2014. – Vol. 16. – P. 166–175. – doi: 10.1016/j.jmapro.2013.10.005.
14. Laser beam welding of hard to weld al alloys for a regional aircraft fuselage design – first results / D. Dittrich, J. Standfuss, J. Liebscher, B. Brenner, E. Beyer // *Physics Procedia*. – 2011. – Vol. 12. – P. 113–122. – doi: 10.1016/j.phpro.2011.03.015.
15. *Drits A.M., Ovchinnikov V.V.* Weldability and properties of welds of high-strength aluminum alloys of the Al–Cu–Li system // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2012. – Vol. 53. – P. 445–449. – doi: 10.1007/s11041-012-9413-7.
16. *Harpreet S., Rajiv S.M.* Aging kinetics of friction stir welded Al–Cu–Li–Mg–Ag and Al–Cu–Li–Mg alloys // *Materials and Design*. – 2016. – Vol. 110. – P. 60–71. – doi: 10.1016/j.matdes.2016.07.126.
17. A weldability study of Al–Cu–Li 2198 alloy / V. Calogero, G. Costanza, S. Missori, A. Sili, M.E. Tata // *Metallurgist*. – 2014. – Vol. 57. – P. 1134–1141. – doi: 10.1007/s11015-014-9858-6.
18. Investigation of the technology of laser welding of aluminum alloy 1424 / B.D. Annin, V.M. Fomin, V.V. Antipov, E.N. Ioda, E.V. Karpov, A.G. Malikov, A.M. Orishich, A.N. Cherepanov // *Doklady Physics*. – 2015. – Vol. 60. – P. 533–538. – doi: 10.1134/S1028335815120010.
19. Комплексное исследование лазерной сварки высокопрочного сплава В-1469 / Б.Д. Аннин, В.М. Фомин, Е.В. Карпов, А.Г. Маликов, А.М. Оришич // *Авиационные материалы и технологии*. – 2016. – № 3. – С. 9–16. – doi: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-9-16.
20. Laser welding of high-strength aluminium–lithium alloys with a filler wire / I.N. Shiganov, A.A. Kholopov, A.V. Trushnikov, E.N. Ioda, M.D. Panteleev, A.A. Skupov // *Welding International*. – 2017. – Vol. 31. – P. 481–486. – doi: 10.1080/09507116.2016.1268768.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)





## Obrabotka metallov -

## Metal Working and Material Science







Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Investigation of the Microstructure of High-Strength Laser Welded Joints of Aluminum-Lithium Aeronautical Alloys

Alexander Golyshev<sup>a,\*</sup>, Alexander Malikov<sup>b</sup>, Anatoly Orishich<sup>c</sup>

Khrstianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-4243-0602>,  [alexgol@itam.nsc.ru](mailto:alexgol@itam.nsc.ru), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-1268-8546>,  [smalik@ngs.ru](mailto:smalik@ngs.ru),  
<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-0551-0213>,  [laser@itam.nsc.ru](mailto:laser@itam.nsc.ru)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 23 January 2018

Revised: 05 March 2018

Accepted: 17 March 2018

Available online: 15 June 2018

##### Keywords:

Laser welding

Aluminum-lithium alloys

Heat treatment

Microstructure

Chemical composition

Microhardness

##### Funding:

This work is supported by the Russian Science Foundation No.17-79-20139 «Development of R&D bases to create high-strength welded joints of aluminum-lithium alloys by the laser welding method».

#### ABSTRACT

**Introduction.** The development of the aeronautical and aerospace industry is associated with up-to-date high-strength aluminum alloys used in constructions and parts. Aluminum-lithium alloys of the Al-Mg-Li, Al-Cu-Mg-Li, Al-Cu-Li systems are preferable due to its low density in response to the lithium addition. Civil wide-body aircrafts are made with the aid of two technologies: part riveting that includes about a million of rivets, and the progressive laser welding technology. It should be noted that today, the riveting technology is worse than the laser one, because the latter provides higher efficiency and performance, full automation, multi-purpose character and environmental friendliness. However the strength of the weld joints without post-processing is still low. **The aim of the work** is to perform the experimental comparison of the laser welding of high-strength aluminum-lithium alloys (the Al-Cu-Li and Al-Mg-Li systems) followed by the postheat treatment (quenching and quenching with ageing), in order to get the high-strength weld joint. The performance of the effect of alloying elements in the aluminum alloys on the microstructure and mechanical characteristics is also the aim of the work. **Results And Discussion.** The microstructural analysis is carried out, the chemical composition of the weld joints in the aluminum-lithium alloys is determined. It is shown that the properties of the weld joint change essentially when Mg or Cu are added into the alloy. For the alloys 1420 and 1424 (the Al-Mg-Li system), heat treatment results in the well-defined dendritic structure, and the aggregates exist both inside the dendrite, and on the borders of dendritic grains (localized evidently). For the alloys 1441 and 1469, which feature is copper, such localization is not observed. Two types of aggregates with fundamentally different chemical compositions are found by means of the electronic microscopy. The first type, with relatively low concentration and size below 10 μm, is characterized by the presence of essentially excessive rare-earth elements, Zr and Sc above all. The chemical composition of the second type of aggregates, most part of which is localized on the dendrite grain boundaries (alloys 1420 and 1424), is close to the solid solution composition, whereas in the alloys 1441 and 1469 (with Cu), there are dark aggregates with increased amount of copper. It is found that utilization of the complex method of fixed joining which includes both laser welding and postheat treatment of samples, made it possible to reveal for the first time a fundamental difference in the processes of crystallization of the Al-Mg-Li and Al-Cu-Li systems. The strength of the laser-welded joints after the full heat treatment reaches 0.91 of the basic alloy 1420 (Al-Mg-Li) strength (the alloy, 0.95 for 1424 (Al-Mg-Li), 0.94 for 1441 (Al-Cu-Mg-Li), 0.8 for 1469 (Al-Cu-Li).

**For citation:** Golyshev A.A., Malikov A.G., Orishich A.M. Investigation of the microstructure of high-strength laser welded joints of aluminum-lithium aeronautical alloys. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 50–62. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-50-62. (In Russian).

#### References

1. Prasad N., Gokhale A., Wanhil R. *Aluminum–lithium alloys: processing, properties, and applications*. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2013. 608 p.
2. Klochkova Y.Y., Klochkov G.G., Romanenko V.A., Popov V.I. Struktura i svoistva listov iz vysokoprochnogo aluminii-litievogo splava V-1469 [Structure and properties of sheets from high-strength aluminum-lithium

##### \* Corresponding author

Golyshev Alexander A., Ph.D. (Physics and Mathematics), Researcher  
 Khrstianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS,  
 4/1 Institutskaya str.,  
 630090, Novosibirsk, Russian Federation  
 Tel.: +7-923-252-00-12, e-mail: [alexgol@itam.nsc.ru](mailto:alexgol@itam.nsc.ru)

- alloy V-1469]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*, 2015, no. 4, pp. 3–8. doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-3-8.
3. Fridlyander I., Khokhlatova L., Khokhlatova L., Kolobnev N., Rendiks K., Tempus G. Thermally stable aluminum-lithium alloy 1424 for application in welded fuselage. *Metal Science and Heat Treatment*, 2002, vol. 44, pp. 3–8. doi: 10.1023/A:1015359900319.
4. Rioja R.J., Liu J. The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, vol. 43, pp. 3325–3337. doi: 10.1007/s11661-012-1155-z.
5. Dursun T., Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Materials and Design*, 2014, vol. 56, pp. 862–871. doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.002.
6. Ber L.B., Teleshov V.V., Ukolova O.G. Phase composition and mechanical properties of wrought aluminum alloys of the system Al-Cu-Mg-Ag-Xi. *Metal Science and Heat Treatment*, 2008, vol. 50, pp. 220–227. doi: 10.1007/s11041-008-9055-y.
7. Gazizov M., Kaibyshev R. Effect of over-aging on the microstructural evolution in an Al-Cu-Mg-Ag alloy during ECAP at 300 °C. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, vol. 527, pp. 163–175. doi: 10.1016/j.jallcom.2012.02.144.
8. Gazizov M., Teleshov V., Zakharov V., Kaibyshev R. Solidification behaviour and the effects of homogenisation on the structure of an Al-Cu-Mg-Ag-Sc alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, vol. 509, pp. 9497–9507. doi: 10.1016/j.jallcom.2011.07.050.
9. Gazizov M., Kaibyshev R. Kinetics and fracture behavior under cycle loading of an Al-Cu-Mg-Ag alloy. *The Physics of Metals and Metallography*, 2016, vol. 117, pp. 725–734. doi: 10.1134/S0031918X16050069.
10. Han B., Tao W., Chen Y., Li H. Double-sided laser beam welded T-joints for aluminum-lithium alloy aircraft fuselage panels: effects of filler elements on microstructure and mechanical properties. *Optics and Laser Technology*, 2017, vol. 93, pp. 99–108. doi: 10.1016/j.optlastec.2017.02.004.
11. Zhang X., Yang W., Xiao R. Microstructure and mechanical properties of laser beam welded Al-Li alloy 2060 with Al-Mg filler wire. *Materials and Design*, 2015, vol. 88, pp. 446–450. doi: 10.1016/j.matdes.2015.08.144.
12. Lukin V.I., Ioda E.N., Panteleev M.D., Skupov A.A., Fomina M.A., Ovchinnikov V.V. Effect of heat treatment of the mechanical properties and corrosion resistance of welded joints in high-strength aluminium–lithium alloys. *Welding International*, 2017, vol. 31, pp. 477–480. doi: 10.1080/09507116.2016.1268767.
13. Rongshi X., Xinyi Z. Problems and issues in laser beam welding of aluminum-lithium alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, vol. 16, pp. 166–175. doi: 10.1016/j.jmapro.2013.10.005.
14. Dittrich D., Standfuss J., Liebscher J., Brenner B., Beyer E. Laser beam welding of hard to weld al alloys for a regional aircraft fuselage design – first results. *Physics Procedia*, 2011, vol. 12, pp. 113–122. doi: 10.1016/j.phpro.2011.03.015.
15. Drits A.M., Ovchinnikov V.V. Weldability and properties of welds of high-strength aluminum alloys of the Al-Cu-Li system. *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, vol. 53, pp. 445–449. doi: 10.1007/s11041-012-9413-7.
16. Harpreet S., Rajiv S.M. Aging kinetics of friction stir welded Al-Cu-Li-Mg-Ag and Al-Cu-Li-Mg alloys. *Materials and Design*, 2016, vol. 110, pp. 60–71. doi: 10.1016/j.matdes.2016.07.126.
17. Calogero V., Costanza G., Missori S., Sili A., Tata M.E. A weldability study of Al-Cu-Li 2198 alloy. *Metallurgist*, 2014, vol. 57, pp. 1134–1141. doi: 10.1007/s11015-014-9858-6.
18. Annin B.D., Fomin V.M., Antipov V.V., Ioda E.N., Karpov E.V., Malikov A.G., Orishich A.M., Cherepanov A.N. Investigation of the technology of laser welding of aluminum alloy 1424. *Doklady Physics*, 2015, vol. 60, pp. 533–538. doi: 10.1134/S1028335815120010.
19. Annin B.D., Fomin V.M., Karpov E.V., Malikov A.G., Orishich A.M. Kompleksnoe issledovanie lazernoi svarki vysokoprochnogo splava V-1469 [Complex research of laser welding of high-strength alloy V-1469]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*, 2016, no. 3, pp. 9–16. doi: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-9-16.
20. Shiganov I.N., Kholopov A.A., Trushnikov A.V., Ioda E.N., Panteleev M.D., Skupov A.A. Laser welding of high-strength aluminium–lithium alloys with a filler wire. *Welding International*, 2017, vol. 31, pp. 481–486. doi: 10.1080/09507116.2016.1268768.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.