

УДК 621.791.724

В.И. Лукин<sup>1</sup>, Е.Н. Иода<sup>1</sup>, М.Д. Пантелеев<sup>1</sup>, А.А. Скупов<sup>1</sup>**ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ  
ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-7-7

*Исследованы особенности формирования структуры и свойства сварных соединений алюминий-литиевых сплавов В-1461 и В-1469, выполненных лазерной сваркой (ЛС). Установлено, что применение присадочных материалов системы Al–Cu (Св-1201 и Св-1217) улучшает формирование сварного шва, повышает механические свойства сварных соединений, снижает вероятность образования дефектов типа пор и рыхлот. Для сварных соединений, выполненных ЛС как без присадочного материала, так и с присадками Св-1201 и Св-1217, отсутствует склонность к РСК и МКК. Последующая термическая обработка по режиму Т1 несколько снижает коррозионную стойкость.*

*Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.8. «Технологии сварки плавлением новых конструкционных материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].*

**Ключевые слова:** лазерная сварка, алюминий-литиевые сплавы, механические свойства, термическая обработка, фрактографические исследования, металлографические исследования.

*The structure formation features and mechanical properties of laser welded joints of Al–Li alloys V-1461, V-1469 are studied. It is found that the use of Al–Cu (Al–6Cu and Al–10Cu) filler materials improves the welded seam formation and mechanical properties of welded joint, reduces probability of defects formation such as porosity and incomplete fusion. For the welding joints done by laser welding with or without filler materials Sv-1201 and Sv-1217 there is no tendency to exfoliation and intergranular corrosion of laser welded joints. Postweld heat treatment slightly reduces the corrosion resistance.*

*The work is executed within the frames of the complex scientific direction 10.8. «Fusion welding technologies of new structural materials» («The strategic direction of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** laser welding, aluminum-lithium alloys welding, mechanical properties, heat treatment, fractographic research, metallographic research.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны высокопрочные алюминий-литиевые сплавы третьего поколения марок В-1461 и В-1469. Сплав В-1469 рекомендован для элементов, работающих на сжатие длительно во всеклиматических условиях до температур 150°С (верхние поверхности крыла, лонжероны, балки, стрингеры и другие детали фюзеляжа). К сплаву В-1461 предъявляются основные требования по высокому уровню ресурсных характеристик и сохранению высокой прочности и пластичности в широком интервале рабочих температур – от -250 до +160°С. Сплав предназначен для применения в виде листов, плит и пресованных профилей для обшивки и внутреннего силового

набора фюзеляжа современных самолетов различного назначения. Применение данных сплавов в сварных конструкциях позволит снизить массу изделий на 10–15% по сравнению с клепаными [1–4].

Все сложности при изготовлении сварных конструкций из высокопрочных сплавов системы Al–Cu–Li связаны с их склонностью к образованию горячих трещин и разупрочнением под воздействием термического цикла сварки. Применение такого высококонцентрированного источника энергии, как лазерный, в сочетании с присадочной проволокой, позволяет получить качественно новые результаты, недоступные при традиционных способах сварки.

Благодаря высокой концентрации энергии лазерного луча образуется малый объем сварочной ванны и тем самым значительно снижаются деформации свариваемых деталей по сравнению с традиционной аргоно-дуговой сваркой. Высокие скорости нагрева и охлаждения позволяют существенно уменьшить зону термического влияния. Тем самым снижается эффект фазовых и структурных превращений в околошовной зоне, приводящих к разупрочнению материала, трещинообразованию и снижению коррозионной стойкости сварных соединений [4–9]. Введение присадочной проволоки в расплав сварочной ванны позволяет повысить технологичность путем повышения стойкости к образованию горячих трещин сварного соединения. При этом достигаются оптимальные характеристики прочности и пластичности сварных соединений [10–14].

### Материалы и методы

В данной работе исследовали свойства, структуру и коррозионную стойкость сварных соединений высокопрочных алюминий-литиевых сплавов В-1461 и В-1469, выполненных лазерной сваркой.

Лазерную сварку (ЛС) листовых полуфабрикатов толщиной 2–3 мм проводили в состоянии Т1 (закалка+искусственное старение) с использованием иттербиевого волоконного лазерного источника фирмы «ИРЭ-Полус» марки ЛС-5 мощностью 5 кВт. Фокусировку лазерного излучения, передаваемого к месту обработки по волокну, осуществляли фокусирующей головкой Precitec YW50.

Стыковые сварные соединения выполняли как с использованием присадочных проволок Св-1201 (система Al–6Cu) и Св-1217 (система Al–10Cu–Sc) диаметром 1,2 мм, так и без присадочного материала.

Методы исследования и геометрические размеры образцов для определения механических характеристик ( $\sigma_b$ ,  $\alpha$ , КСЧ) сварных соединений соответствовали ГОСТ 6996–66 и ГОСТ 1497–84.

Исследования микроструктуры проводили на оптическом комплексе Leica. Фрактографические исследования образцов после испытаний на ударный изгиб проводили на сканирующем электронном микроскопе JSM-6490LV. Определяли стойкость сварных соединений к расслаивающей (РСК) и межкристаллитной коррозии (МКК) в лабораторных условиях в соответствии с ГОСТ 9.904–82 и ГОСТ 9.021–74 соответственно.

Испытания на РСК сварных соединений проводили в рабочих емкостях при полном погружении образцов в раствор 2 в течение 2 сут.

Испытания на МКК сварных соединений проводили в рабочих емкостях при полном погружении образцов в раствор 2 в течение 6 ч при 30°C.

Коррозионную стойкость сварных соединений определяли после ЛС и после полной термической обработки по режиму Т1 (закалка+искусственное старение).

### Результаты

С применением волоконного лазерного источника проводили исследование влияния технологических параметров ( $W_{\text{л}}$ ,  $V_{\text{св}}$ ) лазерной сварки с присадочным материалом на качество формирования сварного соединения (занижение шва, провисание корня шва, размеры верхней и корневой части шва в соответствии с ГОСТ 30242–97) листовых полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов В-1461 и В-1469. При выборе режимов сварки изменяли параметры мощности излучения ( $W_{\text{л}}$ ) и скорости сварки ( $V_{\text{св}}$ ). Мощность излучения выбирали в диапазоне от 1 до 3 кВт в зависимости от толщины свариваемого материала и от характера формирования шва. Скорость сварки изменяли в пределах от 1 до 2,5 м/мин исходя из условий формирования наиболее благоприятной геометрической формы шва. Скорость подачи проволоки ( $V_{\text{п.п}}$ ) и параметры фокусировки ( $f$ ,  $\Delta F$ ) оставались постоянными. Выбран способ защиты сварных соединений и определен расход защитных газов (аргон, гелий). Визуальный контроль показал, что на швах отсутствуют поверхностные дефекты, геометрические параметры сварных швов соответствуют требованиям ГОСТ 28915–91. По результатам рентгеновского контроля установлено, что в швах отсутствуют дефекты типа трещин, пор и оксидных включений. На основании полученных результатов выбраны оптимальные параметры ЛС.

Применение присадочного материала при ЛС улучшает формирование сварного шва и повышает механические свойства сварных соединений (табл. 1). При этом прочность сварных соединений повышается на 7–20%, а ударная вязкость – на 7–30% в зависимости от марки сплава и состава присадочного материала. Оптимальное сочетание прочности и пластичности получено для сварных соединений сплава В-1469 с присадкой Св-1201 и для сварных соединений сплава В-1461 с присадкой Св-1217.

Таблица 1

**Механические характеристики сварных соединений сплавов В-1461 и В-1469**

Сплав	Присадочный материал	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$KCU$ , кДж/м <sup>2</sup>	$\alpha$ , град
В-1461	Св-1201	315	105	35
	Св-1217	335	105	35
	Без присадки	275	80	35
В-1469	Св-1201	340	170	65
	Св-1217	350	140	55
	Без присадки	335	150	55

Для микроструктур сварных швов сплавов системы Al–Cu характерно наличие хрупких интерметаллидных ободков по границам зерен или дендритных ветвей, что обуславливает пониженную пластичность. Особенно это касается высоколегированных высокопрочных сплавов, к которым относятся сплавы В-1461 и В-1469.

Полученные значения механических свойств в значительной степени связаны со структурой сварных соединений. В связи с этим исследовано влияние состава присадочного материала на структурные особенности сварных соединений сплавов (рис. 1).

Структура сварного шва при ЛС характеризуется повышенной неоднородностью и резко отличается в центре шва и периферийной зоне (рис. 1, а, в, д). В переходной зоне при кристаллизации формируются последовательно чередующиеся мелкие равноосные и столбчатые кристаллы (рис. 1, б, г, е). Присутствует мелкая и более крупная субдендритная структура с размером зерна от 5 до 180 мкм. Зона структурных изменений основного металла после сварки весьма незначительна и составляет не более 100 мкм. Происходит резкий переход от структуры литой зоны к структуре основного металла.



Следует отметить, что при аргоно-дуговой сварке алюминий-литиевых сплавов подобные дефекты практически полностью отсутствуют, следовательно, их появление связано с наличием больших скоростей кристаллизации, типичных для процесса ЛС.

Влияние подобных дефектов на механические свойства сварных соединений можно проследить по результатам фрактографических исследований образцов после испытаний на ударный изгиб (*KCU*). В изломах образцов, полученных ЛС без присадочного материала, присутствуют вторичные трещины, развивающиеся по участку с рыхлотой (рис. 2 и 3). Разрушение образцов проходило преимущественно внутризеренно с формированием ямочного рельефа с различным размером ямок. В изломах образцов из сплава В-1461 при снижении значений *KCU* со 111 (сварка с присадкой Св-1201) до 74 кДж/м<sup>2</sup> (сварка без присадки) присутствуют мелкие поры и рыхлоты, по которым при испытании развиваются вторичные трещины. При ЛС с присадочным материалом Св-1217 количество таких дефектов значительно меньше, при ЛС с присадкой Св-1201 они практически отсутствуют. Для сварных соединений сплава В-1469 характерны более высокие значения *KCU* как в случае сварки с присадочным материалом (*KCU*=175 кДж/м<sup>2</sup>), так и при сварке без присадки (*KCU*=161 кДж/м<sup>2</sup>). Рыхлоты присутствуют только в сварных швах, выполненных без присадки.

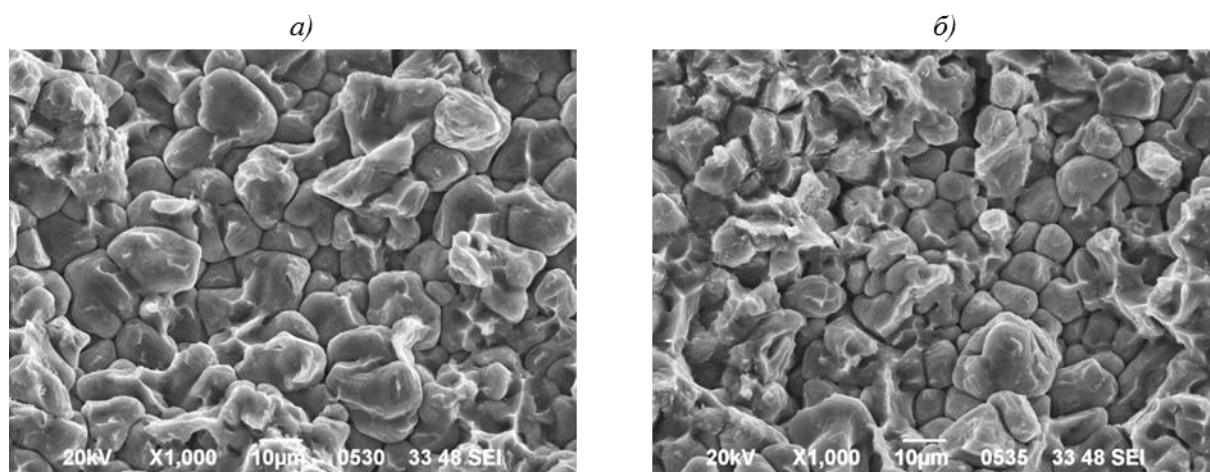


Рис. 2. Рыхлота в изломе образцов из сплавов В-1461 (а) и В-1469 (б) при лазерной сварке без присадки

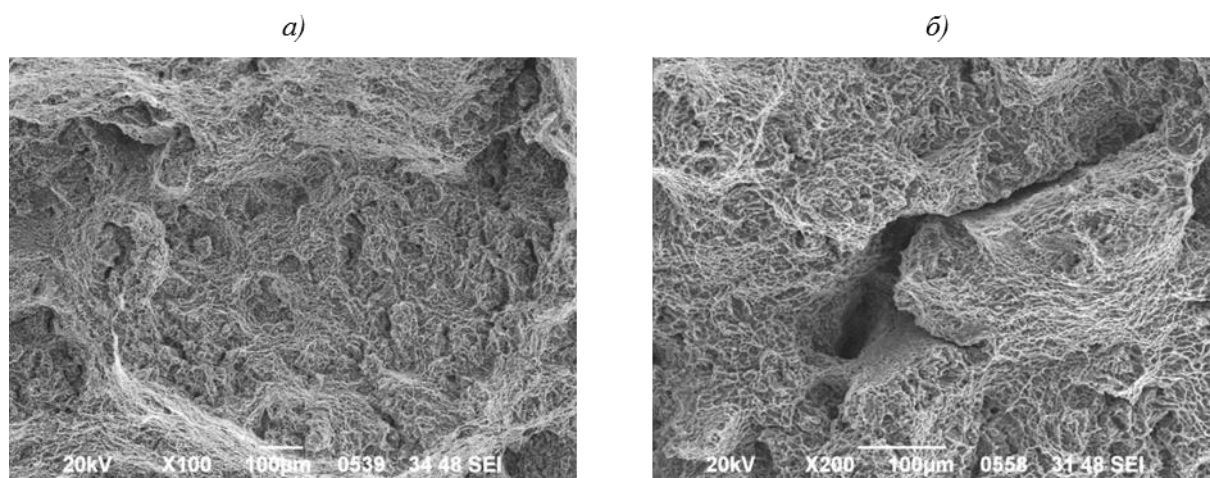


Рис. 3. Вторичные трещины в изломе образца из сплава В-1461

Таким образом, использование при ЛС присадочных материалов приводит к снижению вероятности образования вторичных трещин, хотя рыхлоты в отдельных образцах присутствуют. Наиболее вязкое строение изломов в образцах наблюдается при использовании присадочной проволоки марки Св-1201.

Проведены испытания сварных соединений на стойкость к расслаивающей и межкристаллитной коррозии (табл. 2).

Таблица 2

**Результаты испытаний сварных соединений на стойкость к расслаивающей (РСК) и межкристаллитной коррозии (МКК)**

Присадочный материал	Технологический вариант	Склонность к РСК, балл			Склонность к МКК, мм		
		основной металл	околошовная зона	сварной шов	основной металл	околошовная зона	сварной шов
Сплав В-1461-Т1							
Св-1201	ЛС	4	3	3	Нет	Нет	0,06
	ЛС+Т1	8	8	6	0,12	0,18	Нет
Св-1217	ЛС	4	3	3	Нет	Нет	0,06
	ЛС+Т1	8	8	6	0,06	0,09	Нет
Без присадки	ЛС	4	3	3	Нет	Нет	Нет
Сплав В-1469-Т1							
Св-1201	ЛС	5	4	3	0,12	Нет	Нет
	ЛС+Т1	6	6	3	0,06	0,09	0,12
Св-1217	ЛС	5	4	3	0,06	Нет	Нет
	ЛС+Т1	7	7	4	0,12	0,12	0,09
Без присадки	ЛС	5	3	3	0,06	Нет	Нет

Анализ результатов показал, что для сварных соединений, выполненных ЛС без присадочного материала и с присадками Св-1201 и Св-1217, отсутствует склонность к РСК и МКК. Для сварных соединений, прошедших термическую обработку по режиму Т1, коррозионная стойкость несколько снижается.

### Заключение

Применение при ЛС высокопрочных алюминий-литиевых сплавов В-1461 и В-1469 присадочных материалов на основе системы Al-Cu (Св-1201 и Св-1217) позволяет менять склонность к горячеломкости, структуру металла шва и переходной зоны, а также снижает вероятность образования дефектов типа рыхлоты по границам зерен, что в конечном итоге повышает комплекс механических свойств сварных соединений. Для сварных соединений, выполненных лазерной сваркой без присадочного материала и с присадками Св-1201 и Св-1217, склонность к РСК и МКК отсутствует.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33
2. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Перспективные алюминиевые сплавы и технологии их соединения для изделий авиакосмической техники // Тез. докл. 2-й Междунар. конф. и выст. «Алюминий–21. Сварка и пайка». 2012. С. 8.
3. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 157–167.

4. Грушко О.Е., Овсянников Б.В., Овчинников В.В. *Алюминиево-литиевые сплавы: металлургия, сварка, металловедение*. М.: Наука, 2014. 296 с.
5. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Жегина И.П. и др. Особенности и перспективы сварки алюминий-литиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. М.: ВИАМ, 2002. Вып.: Технология производства авиационных металлических материалов. С. 3–12.
6. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // *Сварка и безопасность: Матер. Всерос. науч.-практич. конф.* 2012. Т. 1. С. 21–30.
7. Лукин В.И., Оспенникова О.Г., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д. Сварка алюминиевых сплавов в авиакосмической промышленности // *Сварка и диагностика*. 2013. №2. С. 47–52.
8. Шиганов И.Н., Холопов А.А., Трушников А.В. и др. Лазерная сварка высокопрочных алюминий-литиевых сплавов с присадочной проволокой // *Сварочное производство*. 2016. №6. С. 44–50.
9. Lukin V.I., Shalin R.E., Efremov I.S., Yarovinskii Yu.U. Design and fabrication of large structures of aluminium-lithium alloys for aerospace technology // *Welding International*. 1997. V. 11. №5. P. 387–392.
10. Шиганов И.Н., Шахов С.В., Холопов А.А. Лазерная сварка алюминиевых сплавов авиационного назначения // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. Сер.: Машиностроение. 2012. №5. С. 34–50.
11. Хохлатова Л.Б., Блинков В.В., Кондратюк Д.И., Рябова Е.Н., Колесенкова О.К. Структура и свойства сварных соединений листов из сплавов 1424 и В-1461, изготовленных лазерной сваркой // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №4 (37). С. 9–13. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-9-13.
12. Milewski J.O., Lewis O.K., Wittig J.E. Microstructural Evaluation of Low and High Duty Cycle Nd:YAG Laser Beam Welds in 2024-T3 aluminum // *Welding Journal*. 1993. V. 72. №7. P. 341–346.
13. Лукин В.И., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д., Скупов А.А. Влияние термической обработки на характеристики сварных соединений высокопрочных алюминий-литиевых сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-6-6.
14. Аннин Б.Д., Фомин В.М., Антипов В.В., Иода Е.Н., Карпов Е.В., Маликов А.Г., Оришич А.М., Черепанов А.Н. Исследование технологии лазерной сварки алюминиевого сплава 1424 // *Доклады Академии наук*, 2015. Т. 465. №4. С. 1–6.
15. Морозова Л.В., Исходжанова И.В. Исследование закономерностей изменения рельефа поверхности образцов из алюминий-литиевых сплавов методом лазерной микроскопии // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №10. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-8-8.