

УДК 669.018.292

М.Д. Пантелеев¹, А.В. Свиридов¹, А.А. Скупов¹, Н.С. Одинцов¹**ОСВОЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ
ВЫСОКОПРОЧНОГО АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА В-1469
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЭЛЕМЕНТАМ ФЮЗЕЛЯЖА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-35-46

Исследованы особенности перспективных технологий лазерной сварки (ЛС) и сварки трением с перемешиванием (СТП) высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469, а также влияние режимов ЛС и СТП на структуру, механические и ресурсные характеристики его соединений. Установлено, что перспективные способы сварки обеспечивают высокие значения пластичности и ударной вязкости сварных соединений при уровне прочности не менее 0,8 от прочности основного материала, а также показатели малоциклового усталости не менее 110 тыс. циклов. Результаты испытаний позволяют рассматривать технологии ЛС и СТП в качестве возможной альтернативы клепаным соединениям при создании неразъемных соединений высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 применительно к элементам фюзеляжа.

Ключевые слова: лазерная сварка, сварка трением с перемешиванием, панель фюзеляжа, алюминий-литиевый сплав В-1469, механические свойства, сварные соединения.

M.D. Panteleev¹, A.V. Sviridov¹, A.A. Skupov¹, N.S. Odintsov¹**PERSPECTIVE WELDING TECHNOLOGIES
OF ALUMINUM-LITHIUM ALLOY V-1469
APPLIED TO FUSELAGE PANELS**

In this work, we investigated the technological features of promising technologies for laser welding and friction stir welding of high-strength aluminum-lithium alloy V-1469. The modes of laser welding and friction stir welding have been carried out. In this article, we showed the perspective welding methods provide high values of ductility and impact toughness, while the strength of welded joints is not less than 0,8 of the strength of the base material and values of low cycle fatigue is not less than 110·10³ cycles. The results allows to propose laser welding and friction stir welding processes as an alternative to riveted joint for aluminum-lithium alloy V-1469 as applied to the elements of the fuselage.

Keywords: laser welding, friction stir welding, fuselage panel, aluminum-lithium alloy V-1469, mechanical properties, welded joints.

¹Федеральное 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

В настоящее время применение сплавов системы Al–Cu–Li является перспективным направлением в развитии сварных конструкций обшивки фюзеляжа [1].

Сплавы, свойства которых представлены в данной статье, имеют довольно высокие характеристики, позволяющие конкурировать со сплавами систем Al–Cu–Mg, Al–Zn–Mg–Cu и композиционными материалами. Сплавы системы Al–Cu–Li обладают не только низкой плотностью, но и пониженной сопротивляемостью к образованию горячих трещин и выделению газовых пор, пониженной прочностью из-за действия сварочно-термического цикла, а также вероятностью образования микрорыхлот

в структуре сварного шва. Благодаря применению присадочной проволоки с оригинальным (отличным от основного материала) химическим составом улучшается свариваемость и возможно устранить образование перечисленных ранее дефектов [1–4].

Эффект увеличения прочности и жесткости алюминий-магниевых сплавов, легированных литием, при одновременном снижении плотности открыт группой ученых из Всесоюзного института авиационных материалов (ВИАМ) под руководством академика Иосифа Наумовича Фридляндера. Так, запатентован сплав 1420, благодаря которому появилась возможность создать сварной планер самолета МиГ-29М и тем самым уменьшить массу конструкции на 24% [4, 5].

Успешное применение сплава 1420 вызвало значительный интерес к исследованию алюминий-литиевых сплавов во всем мире [6, 7]. Созданы новые материалы на основе сплавов систем Al–Cu–Li (1460, 2090) и Al–Li–Mg–Cu (1441, 8090), а также расширилось их использование в авиационно-космической отрасли.

Развитие сплавов системы Al–Cu–Li велось по пути увеличения вязкости разрушения, которое достигалось термической стабильностью.

Оптимизация содержания легирующих элементов позволила повысить показатели пластичности и улучшила структуру полуфабрикатов при снижении анизотропии свойств [1]. Так, разработаны сплавы 2199, 2060, 2050, 2198 и 2196, обладающие повышенными прочностными характеристиками и характеристиками вязкости разрушения.

Особый научно-практический интерес представляют сплавы системы Al–Cu–Li, обладающие наиболее удачным среди данных сплавов сочетанием удельной прочности и пластичности. Сплав В-1469 производства ФГУП «ВИАМ» (табл. 1) является первым в России сплавом такой системы, легированным серебром, удельная прочность которого при применении значительно выше удельной прочности сплава-аналога В95о.ч. этого же производителя более чем на 20%, а модуля упругости – на 10%. Зарубежными аналогами сплава В-1469 являются сплав 2195 производства компании Alcoa (США), широко используемый в изделиях ракетной техники, а также сплавы 2098 и 2198, применяемые в элементах самолетов компании Airbus [3–5].

Таблица 1

Механические свойства листов алюминий-литиевого сплава В-1469 и сплавов-аналогов

Сплав	Плотность, г/см ³	σ_B , МПа	δ , %
В-1469-Т1	2,67	$\geq 580-600$	≥ 8
В95о.ч.-Т2	2,85	$\geq 500-540$	
2195	2,71	≥ 550	–

Вместе с тем эти сплавы обладают низкой стойкостью к образованию горячих трещин при сварке плавлением. Поэтому для большинства алюминий-литиевых сплавов подобраны или разработаны присадочные материалы, повышающие свариваемость этих сплавов (рис. 1, а).

За счет легирования Zr, Sc и Ag сплав В-1469 обладает улучшенными характеристиками удельной прочности и стойкости к коррозии [4]. По прочностным характеристикам он, при наименьшей анизотропии свойств и более высоких показателях вязкости, не уступает своему зарубежному аналогу – сплаву 2195. Сплав В-1469 рекомендован для использования при изготовлении элементов фюзеляжа, работающих в условиях длительного сжатия до температур 150 °С. Использование данного сплава взамен сплава В95о.ч.-Т2 позволило уменьшить массу клепаных конструкций до ~10%, а сварных – до 20% [4, 5].

Сварка плавлением без присадочной проволоки приводит к трещинообразованию без приложения растягивающей деформации ($A_{кр}=0$ мм/мин). Именно по этой причине для каждого исследуемого сплава подобраны свои присадочные материалы различных систем легирования, позволяющие получить высокие показатели сопротивления образованию горячих трещин $A_{кр}$ (рис. 1, б).

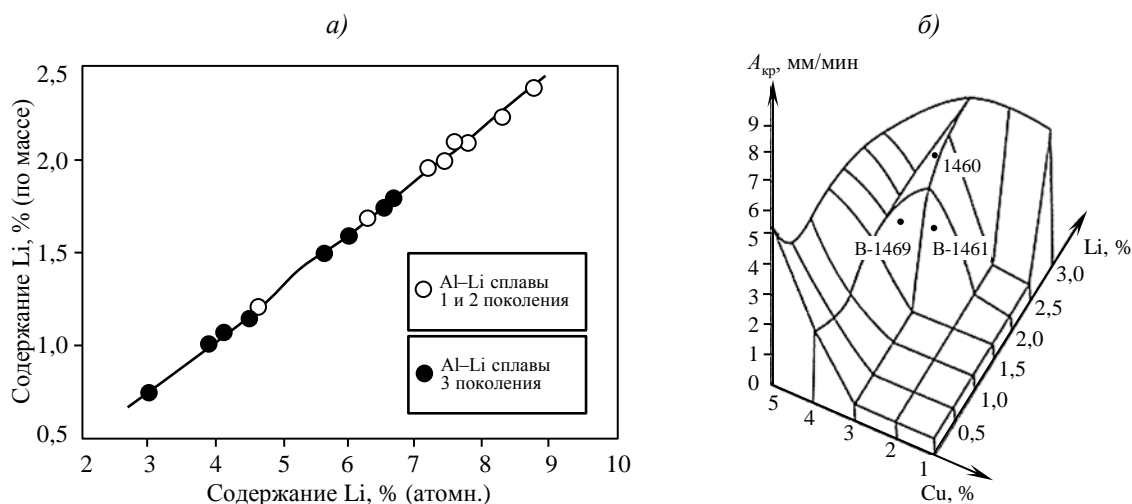


Рис. 1. Содержание лития в промышленных сплавах системы Al–Cu–Li (а) и диаграмма трещиностойкости при сварке таких сплавов в зависимости от состава (б) [8]

Вместе с тем использование лазерных источников излучения для сварки сплавов системы Al–Cu–Li является перспективным, поскольку большая концентрация энергии лазерного излучения дает возможность осуществлять сварочный процесс на повышенных скоростях, что снижает продолжительность высокотемпературного нагрева. Однако большая плотность мощности излучения приводит к интенсивному выгоранию элементов в сварочной ванне, из-за чего в свою очередь происходит потеря прочности сварного соединения [8]. Совершенствование технологии сварки минимизирует воздействие этого фактора [9].

Особенностью термоупрочненных алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов при сварке плавлением является образование зоны разупрочнения. Ее размер зависит от природы сплава, его химического состава и чувствительности к термическому циклу, под воздействием которого металл в зоне термического влияния (ЗТВ) подвергается нагреву с 18–20 °С до температуры ликвидус в зоне сплавления, при этом имеют место растворение упрочняющих фаз и изменение структуры, что сопряжено с распадом твердого раствора и повторным его образованием. Уровень свойств по отношению к исходному состоянию полностью зависит от степени термического воздействия на ЗТВ. Так, при сварке плавлением сплавов системы Al–Cu–Li под действием высоких температур нагрева в ЗТВ происходит растворение упрочняющих фаз, что влияет на снижение механических свойств сварных соединений до уровня прочности 60–70% от основного металла [10].

В настоящее время лазерная сварка (ЛС) широко применяется в авиастроении при изготовлении элементов планера. Вместе с тем встречаются отдельные публикации, патенты и информационные сообщения, описывающие возможность использования ЛС при изготовлении других авиационных деталей.

В начале 1990-х гг. в Европе проведены первые научные работы по применению ЛС для авиационных конструкций. Тогда пытались заменить процесс клепки обшивки с силовым набором сваркой, но ввиду использования в конструкциях самолетов преимущественно сплава 2024 видимых преимуществ от применения сварки, по сравнению с традиционной клепкой, обнаружено не было.

Уменьшение массы конструкции самолета путем использования новых перспективных материалов и внедрения передовых технологий их соединения – одна из главных задач современной авиационной промышленности. Компании Airbus и Boeing

испытали различные методы соединения конструкций фюзеляжа, позволяющие заменить традиционную клепку [10–13].

Исследования в области создания сварных панелей фюзеляжа [14] показали, что наиболее целесообразно применение таких современных технологий соединения, как ЛС и сварка трением с перемешиванием (СТП), – небольшое тепловложение минимизирует остаточные напряжения и деформации. Компанией Alcoa проведены работы по оценке возможности использования панелей из сплава 2099 с применением этих технологий (рис. 2).

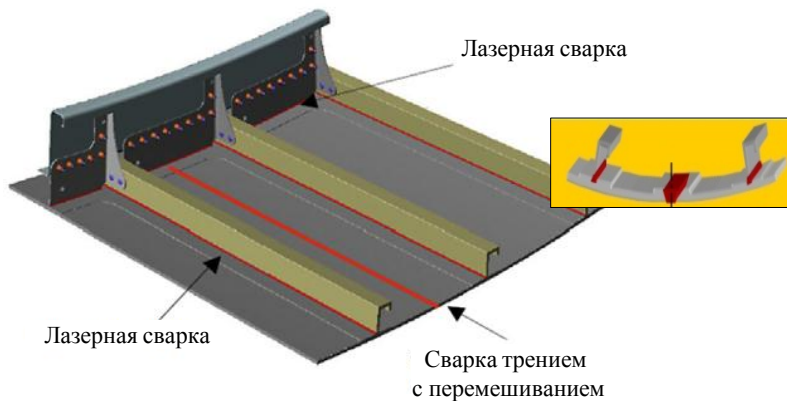


Рис. 2. Вариант изготовления сварной панели фюзеляжа

По результатам испытаний этих панелей можно увидеть существенную разницу в снижении массы, а также увеличение несущей способности за счет реализации концепции сварной панели [3].

Следует отметить, что единственным европейским авиапроизводителем, применяющим ЛС, является компания Airbus (в то время как другие только планируют ее использовать).

К началу 2000-х гг. после разработки и внедрения новых алюминиевых сплавов серий 6xxx (6013, 6110A и 6056) и 7xxx, а также алюминий-литиевых сплавов компания Airbus внедрила технологию ЛС панелей фюзеляжа для самолетов A318, A340 и A380 [15].

В 2004 г. компания Airbus в сотрудничестве с концерном EADS Innovation Works разработала серийную технологию сварки панелей фюзеляжа для узкофюзеляжного самолета A318 (рис. 3), а уже через год аналогичная технология внедрена при производстве и других самолетов компании (рис. 4).



Рис. 3. Нижняя сварная панель фюзеляжа самолета A318 (секция 17) компании Airbus в сварочном цеху компании Premium AEROTEC



Рис. 4. Применение панелей, выполненных лазерной сваркой, в конструкциях современных самолетов компании Airbus

Оборудование дает возможность производить сварку лазерным лучом (два лазера CO_2) панелей размером до $11 \times 2,5$ м и глубиной до 1 м (рис. 5). К тому же ЛС используется только в элементах фюзеляжа (и только в нижних панелях). Согласно исследованиям фирмы EADS, применение сварных конструкций в боковых и верхних панелях, а также в хвостовом оперении и крыльях не удовлетворяет требованиям по прочности при растяжении и сдвиге, что в конечном счете влияет на эксплуатационную безопасность самолета.

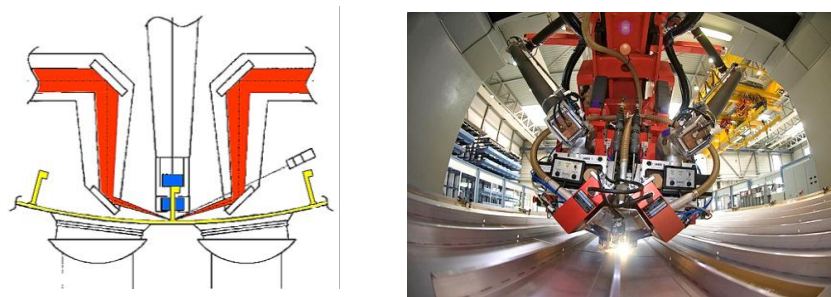


Рис. 5. Технологическая схема и процесс лазерной сварки панелей фюзеляжа

В работе [16] отмечено, что сварка обшивочно-стрингерных конструкций отличается жесткими требованиями к рабочему пространству и точности позиционирования – традиционные роботизированные системы малых и средних размеров не подходят для этой цели. Требования к техническим характеристикам и компоновке комплекса ЛС могут быть различны для разных видов деталей. Для изготовления панелей рекомендуется применение двухлучевой лазерной установки с 10 осями позиционирования, идеально подходящей для производственных целей (рис. 6). Данная установка оснащена промышленным компьютером, обеспечивающим реализацию технологии компенсации отклонений в процессе сварки. Преимуществами двухлучевой сварки являются сокращение ее продолжительности и минимизация сварочных деформаций.

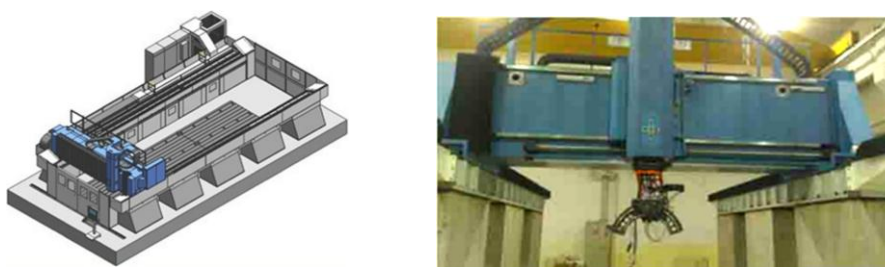


Рис. 6. Система двусторонней лазерной сварки [17]

Технические характеристики такой установки представлены в работах [18–22]. Приводятся также последние результаты исследования структуры и свойств алюминий-литиевых сплавов (2060-T8 и 2099-T83) для обшивочных панелей, полученных при двусторонней сварке и с использованием разных присадочных проволок.

На рис. 7 показаны общий вид и схема такого процесса. При этом использование сварных конструкций в нижних панелях обшивки позволяет разгрузить ее верхние панели на 20% с одновременным увеличением эффективности работы нижних панелей до 15%. Кроме того, благодаря использованию монолитного листа значительно повышаются коррозионная стойкость и стойкость к образованию трещин.

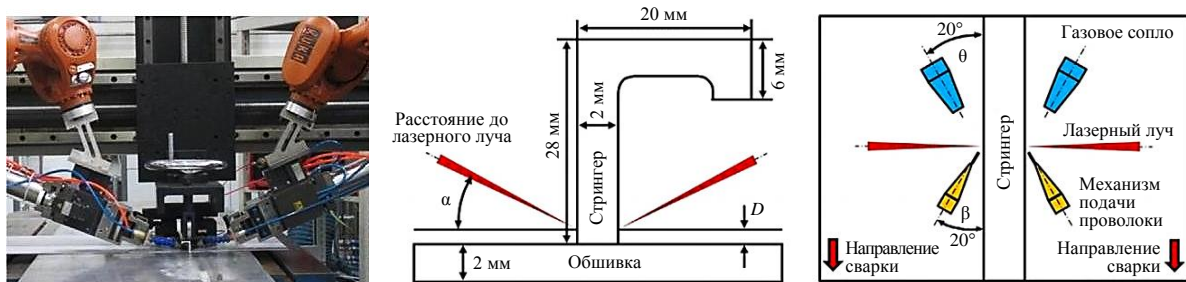


Рис. 7. Общий вид и схема процесса двусторонней лазерной сварки [23]

Изготовление сварных элементов фюзеляжа с использованием современных технологий сварки позволяет улучшить весовую эффективность на 10% за счет исключения нахлесточных соединений и заклепок. Поэтому разработка технологических процессов ЛС и СТП алюминий-литиевого сплава В-1469 является весьма актуальной задачей [15].

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.8. «Технологии сварки плавлением новых конструкционных материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [24].

Материалы и методы

Исследование проводили на листовом полуфабрикате алюминий-литиевого сплава В-1469 толщиной 1,8 мм. В качестве исходной термической обработки перед сваркой применяли закалку с искусственным старением по таким режимам, которые обеспечивают большие вязкость материала и, соответственно, ресурс, что целесообразно для сварных конструкций, предназначенных для эксплуатации в элементах фюзеляжа гражданских самолетов.

Одна из задач при разработке технологий – получение максимальных прочности и ресурса сварного шва, а также остаточной прочности основного металла. Такой подход позволяет исключить трудоемкую и зачастую нереализуемую операцию термической обработки, что связано не столько с большими габаритами элементов фюзеляжа, сколько с ухудшением структуры основного материала как после повторной закалки, так и после повторного старения.

При подготовке к процессу ЛС поверхность образцов подвергали размерному химическому травлению с удалением поверхностного слоя на глубину 0,1 мм с каждой стороны образца и осветлению в 30%-ном растворе HNO_3 . Перед началом сварки торцевую поверхность свариваемых кромок, лицевую поверхность и поверхность со стороны проплава на расстоянии 5–10 мм от кромки зачищали шабером до металлического блеска. Такая методика подготовки поверхности позволяет избежать дефектов при сварке, в первую очередь пористости.

Лазерную сварку проводили на установке LaserWeld 8R60 с местной защитой зоны шва аргоном. Сварку трением с перемешиванием осуществляли на модифицированном вертикально-фрезерном станке. В качестве инструмента для СТП применяли серийный инструмент производства АО «ВНИИАЛМАЗ» с диаметром заплечика 12 мм и длиной наконечника 1,6 мм. Данную операцию проводили по контролируемому заглублению инструмента в материал заготовок на 0,5 мм на титановой подкладке с формирующей канавкой. При подготовке поверхности перед СТП применяли химическое травление, а для нахлесточных соединений – шабрение места нахлеста.

Характеристики кратковременной прочности, статического угла изгиба и ударной вязкости определяли по ГОСТ 6996–66 и ГОСТ 1497–84. Исследование микроструктуры выполняли на микроскопе Leica DM-IRM. Испытания на малоцикловую усталость (МЦУ) проводили на установке LFV-100 фирмы Walter + Bai AG по ГОСТ 25.502–79 ($\sigma_{\max}=157$ МПа, коэффициент асимметрии $R_{\sigma}=0,1$).

Результаты и обсуждение

При сварке важным является процесс формирования шва однородного состава, что обеспечивает высокое качество сварных соединений, требуемые механические свойства и минимизацию остаточных напряжений. Для обеспечения соответствия характеристик свариваемого материала и металла шва чаще всего рекомендуют использовать присадочный материал того же состава, что и основной, или близкий к нему. Однако в случае со сплавами системы Al–Cu–Li такой подход не является целесообразным из-за низкого сопротивления образованию горячих трещин. Поэтому для данного класса сплавов во ФГУП «ВИАМ» разработаны присадочные материалы на основе сплава системы Al–Cu с добавками эффективных модификаторов, в том числе с редкоземельными металлами (РЗМ) [25, 26].

Проводились работы по изучению влияния режимов подварки стыковых сварных соединений сплава В-1469, выполненных ЛС, на структуру, а также механические и усталостные характеристики.

Лазерную сварку листов выполняли в импульсном режиме, что позволило уменьшить тепловложение и стабилизировать процесс. В качестве присадочного материала выбрали проволоку марки Св-1221 диаметром 1,2 мм. Качество сварных соединений оценивали при визуальном осмотре формирования сварного шва, а также при проведении металлографического контроля.

Проведены отработка и выбор диапазонов технологических параметров для ЛС (максимальной и минимальной мощности лазерного луча в импульсном режиме, скорости сварки, фокусировки луча) стыковых соединений, обеспечивающих отсутствие сварочных дефектов и допустимое формирование шва по ГОСТ EN 4678–2016: мощность лазерного излучения $W=1500–2500$ Вт; скорость сварки $V_{св}=0,02–0,06$ м/с; расфокусировка лазерного луча $\Delta F=0–40$ мм.

По результатам варьирования значений технологических параметров одного и двух проходов ЛС в указанных диапазонах выбрано два режима, обеспечивающих оптимальное формирование сварного шва (рис. 8, а и б) и отличающихся погонной энергией ($q_{п}$) (табл. 2).

Таблица 2

Режимы лазерной сварки листов алюминий-литиевого сплава В-1469

$q_{п}$, кДж/м	$V_{св}$, м/с	$V_{пр}^*$, м/мин	ΔF , мм
60	0,03	2,0	+20
40	0,05	3,3	
* $V_{пр}$ – скорость подачи присадки.			

Отработанные режимы применяли и для подварки сварных соединений сплава В-1469, т. е. для ремонтного варианта, когда второй проход лазерного луча проводится по уже выполненному шву. Второй проход осуществляли после полного остывания заготовки (рис. 8, в и з).

Формируется характерная структура с резкой переходной зоной от литого сварного шва к ЗТВ. Результаты металлографического контроля показали, что в сварном шве поры, микротрещины и непровары отсутствуют (рис. 8, а и б).

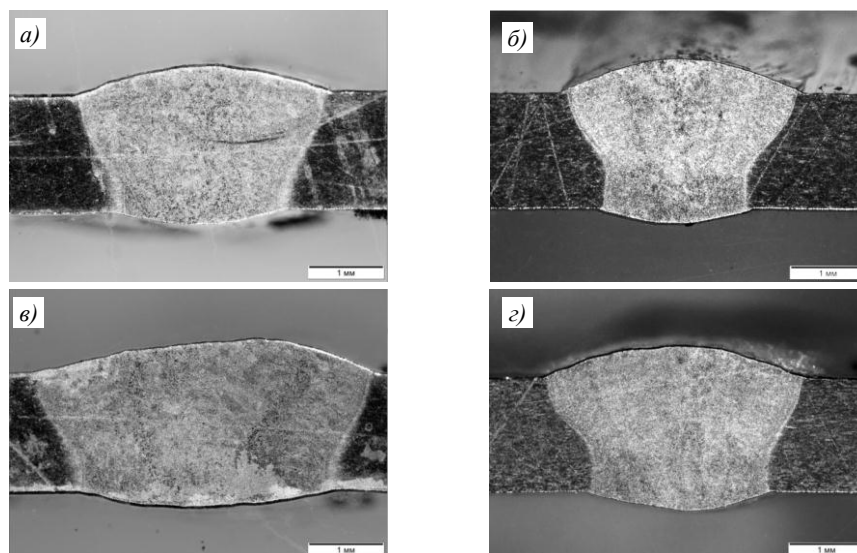


Рис. 8. Макроструктура ($\times 25$) сварных соединений образцов, выполненных одним (а, б) и двумя (в, з) проходами лазерной сварки на скоростях 0,03 (а, в) и 0,05 м/с (б, з)

Проведенные механические испытания сварных образцов, изготовленных на выбранных режимах, показали, что прочность сварных соединений сплава В-1469 составила 310–335 МПа – в зависимости от режима сварки. Разрушение сварных соединений проходило по линии сплавления, что характерно для сплавов с низкой стойкостью к образованию горячих трещин.

Характеристики пластичности и ударной вязкости выше для сварных соединений, выполненных со скоростью сварки 0,03 м/с. Увеличение скорости сварки до 0,05 м/с снижает пластичность на 33%, а ударную вязкость – на 16%, что связано с ускоренной кристаллизацией металла шва, формированием более выраженной дендритной структуры и состоянием границ зерен. Повторные проходы ЛС уменьшают прочность сварных соединений на 25% за счет вторичного воздействия сварочно-термического цикла на околошовную зону, при этом происходит повышение значений пластичности на 8–17%, а МЦУ – на 21% (табл. 3).

Таблица 3

Механические свойства (средние значения) сварных соединений алюминий-литиевого сплава В-1469, выполненных лазерной сваркой (ЛС)

Скорость сварки, м/с	Технологический вариант	σ_B , МПа	$\sigma_{B,св.}/\sigma_B$	КСУ, кДж/м ²	α , градус	МЦУ, кцикл
0,03	T1*+ЛС	335	0,65	105	64	–
	T1+два прохода ЛС	270	0,53	80	75	–
0,05	T1+ЛС	390	0,8	90	48	110
	T1+два прохода ЛС	250	0,6	80	52	130

*T1 – исходная термическая обработка: закалка+искусственное старение.

Результаты исследований показали, что основным недостатком сварного соединения является «тоннельный дефект», возникающий при значительном увеличении числа оборотов ($\omega \geq 1500$ об/мин). При низких скоростях вращения инструмента ($\omega \leq 400$ об/мин) в сварных соединениях также образуются несплошности.

В процессе эксперимента параметры режима сварки менялись в следующих пределах: скорость сварки – от 60 до 200 мм/мин; скорость вращения инструмента – от 640 до 1050 об/мин. Угол наклона инструмента для всех вариантов составлял 2 градуса.

Оценку качества сварных соединений, выполненных СТП, и выбор оптимального режима проводили по результатам визуального контроля и анализа характера изломов сварных соединений. Изменение режима сварки в указанном диапазоне скоростей не оказывает существенного влияния на структуру центра сварного шва.

По результатам отработки режимов СТП в указанных диапазонах выбрано два режима, обеспечивающих оптимальное формирование сварного шва и отличающихся коэффициентом тепловложения n ($n = \omega / V_{св}$) – рис. 9.

Внешний вид сварных соединений, выполненных двумя проходами СТП, отличается большим занижением в верхней части шва, что обусловлено вытеснением металла шва в «грат» при двукратном воздействии инструмента (рис. 9, *в* и *г*).

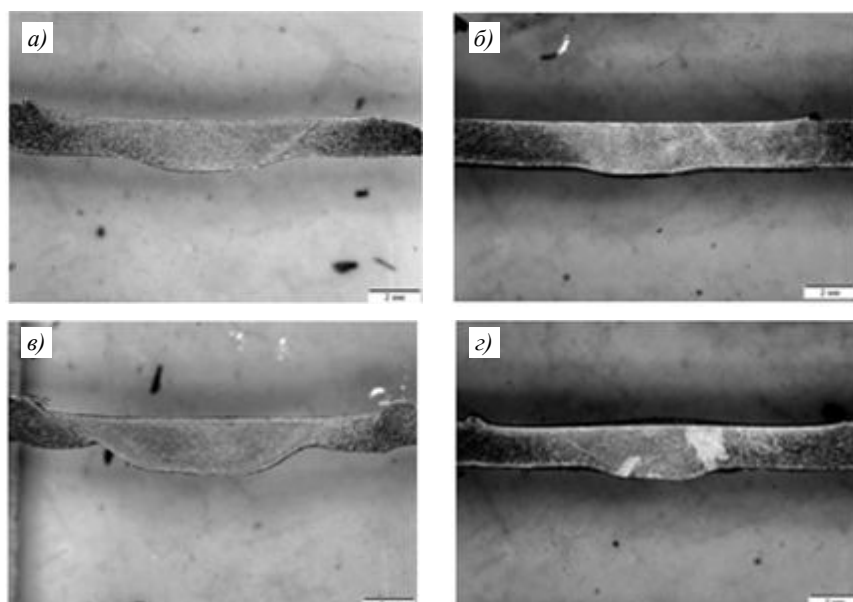


Рис. 9. Макроструктура ($\times 25$) сварных соединений образцов, выполненных одним проходом сваркой трением с перемешиванием (*а*, *б*) и двумя проходами (*в*, *г*) на режимах с коэффициентом тепловложения 6,5 (*а*, *в*) и 6,0 об/мм (*б*, *г*)

Исследование условий проведения подварки показало, что повторный проход СТП (за счет которого устраняется дефект от первого прохода) необходимо проводить с использованием тех же инструмента и режимов, которые применялись при выполнении основного шва. Подобная ремонтная технология обеспечивает исправление основного, наиболее характерного для СТП, «тоннельного дефекта» в сварном шве. Установлено также, что повторные проходы следует выполнять после полного остывания заготовки. При сварке по теплему металлу присутствующий в сварном шве дефект не устраняется, а раскрывается в большей степени.

Выбранные режимы СТП обеспечивают прочность сварных соединений на уровне 390–405 МПа. Показатель пластичности сварных соединений, выполненных данным видом сварки, значительно больше по сравнению с показателем при ЛС и составляет 89–153 градуса, ударная вязкость > 185 кДж/м² (табл. 4).

**Механические свойства (средние значения) сварных соединений
алюминий-литиевого сплава В-1469, выполненных
сваркой трением с перемешиванием (СТП)**

Коэффициент тепло- вложения n , об/мм	Технологический вариант	σ_b , МПа	$\sigma_{b.св}/\sigma_b$	KCU , кДж/м ²	α , градус	МЦУ, кцикл
6,0	T1*+СТП	390	0,78	185	153	112,1
	T1+два прохода СТП	415	0,83	205	159	73,1
6,5	T1+СТП	405	0,81	215	89	139,4
	T1+два прохода СТП	415	0,83	220	98	182,7

*T1 – исходная термическая обработка: закалка+искусственное старение.

Эффект незначительного повышения прочности и малоциклового усталости сварного соединения при повторном проходе связан с тем фактом, что зона разрушения (при одном проходе) смещается из ЗТВ на зону перемешивания (при втором проходе). Поскольку второй проход приводит к значительному утонению металла шва и смещению разрушения в эту зону сварного соединения, полученные значения также характеризуют именно эту зону.

Следует отметить, что именно значение занижения верхней части сварного шва относительно основного металла определяет допустимое количество подварок, которое в свою очередь определяется фактическим утонением места сварки.

Проведены испытания на влияние технологических режимов СТП нахлесточных соединений сплава В-1469 на его структуру, а также механические и ресурсные характеристики. Установлено, что образование надежного соединения происходит при погружении наконечника инструмента на глубину не менее половины толщины второго листа соединения. После отработки технологических вариантов подготовки поверхности и глубины погружения наконечника проведено варьирование технологических параметров режимов СТП (скорости сварки и скорости вращения инструмента) в допустимом диапазоне. Бездефектное формирование нахлесточных сварных соединений (рис. 10) достигается на идентичных режимах, выбранных для стыковых соединений (табл. 4).

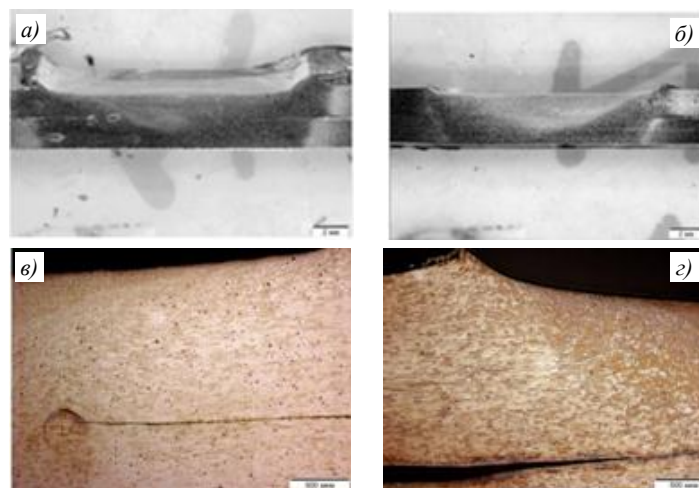


Рис. 10. Макроструктура ($\times 25$; $a, б$) и микроструктура ($\times 50$; $в, г$) нахлесточных сварных соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием на режимах с коэффициентом теплового вложения 6,5 ($a, в$) и 6,0 об/мм ($б, г$)

Результаты механических испытаний на статический срез и МЦУ сварных образцов, полученных СТП на листовом материале сплава В-1469, приведены в табл. 5.

Циклические испытания сварных образцов показали, что нахлесточный тип соединения характеризуется низкими значениями характеристик сопротивления

усталости. Это обусловлено тем, что образующиеся в результате нахлесточного соединения концентраторы напряжений (рис. 10, *в* и *г*) приводят к значительному снижению значений малоциклового усталости.

Таблица 5

**Механические свойства нахлесточных сварных соединений
алюминий-литиевого сплава В-1469, выполненных сваркой трением с перемешиванием**

Коэффициент тепловложения, об/мм	$\tau_{\text{среза}}$, МПа	МЦУ, кцикл
6,5	215	≤5
6,0	260	

Кроме того, по результатам статических испытаний сварных образцов на срез выявлено, что значения прочности при срезе для высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 находятся на уровне 215–260 МПа, т. е. сопоставимы с результатами, получаемыми при использовании метода контактной шовной сварки.

Следует отметить, что при работе соединения на чистый срез сопротивление разрушению оказывает только зона перемешивания (ядро) сварного соединения. Применение для нахлесточного соединения «жестких» режимов сварки, обеспечивающих уменьшение ЗТВ, т. е. ведение процесса с максимально возможной скоростью, не приводит к повышению прочности соединения.

Заключения

По результатам исследований структуры, механических характеристик, а также малоциклового усталости стыковых и нахлесточных сварных соединений алюминий-литиевого сплава В-1469 проведен выбор режимов ЛС, СТП и подварки для ремонта стыковых соединений применительно к элементам фюзеляжа. Показано, что перспективные способы сварки обеспечивают повышенные значения пластичности и ударной вязкости сварных соединений при уровне прочности не менее 0,8 от прочности основного материала. Достигнутые результаты позволяют рассматривать данные технологии в качестве возможной альтернативы клепаным соединениям при создании неразъемных соединений сплава В-1469 применительно к элементам фюзеляжа.

Установлены следующие технологические особенности ЛС и СТП:

- повторный проход, имитирующий ремонтную технологию, при ЛС приводит к значительному снижению механических характеристик, определяемых при статических испытаниях, и повышению показателей МЦУ;
- устранение дефектов сварных швов, выполненных СТП, за счет повторного прохода не приводит к снижению механических свойств;
- нахлесточные соединения, выполненные СТП, характеризуются низкими значениями характеристик сопротивления усталости.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. С. 7–27.
2. Фридляндер И.Н., Дриц А.М., Крымова Т.В. Возможность создания свариваемых сплавов на основе системы Al–Cu–Li // Металловедение и термическая обработка металлов. 1991. №9. С. 30–32.
3. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе // Цветные металлы. 2016. №8 (884). С. 86–91. DOI: 10.17580/tsm.2016.08.13.
4. Скупов А.А. Повышение свариваемости сплавов системы Al–Cu–Li методами сварки плавлением: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2019. 21 с.
5. Грушко О.Е., Овсянников Б.В., Овчинников В.В. Алюминиево-литиевые сплавы: металлургия, сварка, металлловедение. М.: Наука, 2014. 296 с.
6. Ключкова Ю.Ю. Формирование структуры и свойств холоднокатаных листов из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2014. 17 с.

7. Хохлатова Л.Б., Лукин В.И., Колобнев Н.И. и др. Перспективный алюминиево-литиевый сплав 1424 для сварных конструкций изделий авиакосмической техники // Сварочное производство. 2009. №3. С. 7–10.
8. Фридляндер И.Н. Воспоминания о создании авиакосмической и атомной техники из алюминиевых сплавов. М.: Наука, 2006. 287 с.
9. Елагин В.И., Захаров В.В. Современные Al–Li сплавы и перспективы их развития // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. №4. С. 17–23.
10. Денисов Б.С., Мейлах А.И. Сварка в самолетостроении. Сварные конструкции МиГов. М.: Русавиа, 2007. 360 с.
11. Пантелеев М.Д. Особенности формирования структуры сварных соединений при сварке трением с перемешиванием высокопрочных алюминий-литиевых сплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2019. 23 с.
12. Шалин Р.Е., Ефремов И.С., Яровинский Ю.Л., Лукин В.И. Опыт проектирования и изготовления крупногабаритных конструкций из алюминиево-литиевых сплавов изделий ракетно-космической техники // Сварочное производство. 1996. №11. С. 14–18.
13. Shalin R.E., Efremov I.S., Yarovinskii Yu.U., Lukin V.I. Design and fabrication of large structures of aluminium-lithium alloys for aerospace technology // Welding International. 1997. Vol. 11. No. 5. P. 387–392.
14. Лукин В.И., Кулик В.И., Бецофен С.Я., Лукина Е.А., Шаров А.В., Пантелеев М.Д., Саморуков М.Л. Сварка трением с перемешиванием полуфабрикатов высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №12 (60). Ст. 02. URL: www.viam-works.ru (дата обращения: 14.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-2-2.
15. Фридляндер И.Н., Федорович А.П., Арчакова З.Н. и др. Свариваемые алюминиевые сплавы // Металлургия. 1969. Вып. 6. С. 91–94.
16. Prasad N.E., Gokhale A.A., Wanhill R.J.H. Aluminum-Lithium Alloys. Processing, Properties, and Applications. Elsevier Inc., 2014. С. 555–558.
17. Huang Y. A novel dual-channel weld seam tracking system for aircraft T-joint welds // The International journal of advanced manufacturing technology. 2017. No. 91. С. 751–761.
18. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 650 с.
19. Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ерасов В.С., Каширин В.В. Гибридные слоистые материалы на базе алюминий-литиевых сплавов применительно к панелям крыла самолета // Авиационные материалы и технологии. 2016. №3 (42). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-3-8.
20. Han B. Double-sided laser beam welded T-joints for aluminum-lithium alloy aircraft fuselage panels: Effects of filler elements on microstructure and mechanical properties // Optics & Laser Technology. 2017. No. 93. С. 99–108.
21. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Шестов В.В., Сидельников В.В. Слоистые гибридные материалы на основе листов из алюминий-литиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 212–224. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-212-224.
22. 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.
23. Шиганов И.Н., Холопов А.А. Лазерная сварка алюминиевых сплавов // Фотоника. 2010. №3. С. 6–10.
24. 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.
25. Скупов А.А., Пантелеев М.Д., Иода Е.Н. Структура и свойства сварных соединений сплавов В-1579 и В-1481, выполненных лазерной сваркой // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №7 (55). Ст. 07. URL: www.viam-works.ru (дата обращения: 14.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-7-7.
26. Лукин В.И., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д., Скупов А.А. Особенности лазерной сварки высокопрочных алюминий-литиевых сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. №10 (46). Ст. 07. URL: www.viam-works.ru (дата обращения: 14.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-7-7.