

УДК 621.791.724

А.А. Скупов<sup>1</sup>, М.Д. Пантелеев<sup>1</sup>, Е.Н. Иода<sup>1</sup>**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
СПЛАВОВ В-1579 и В-1481, ВЫПОЛНЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-7-7

*Исследованы особенности формирования структуры и свойств сварных соединений алюминиевого В-1579 (Al–Mg–Sc) и алюминий-литиевого В-1481 (Al–Cu–Li) сплавов, выполненных лазерной сваркой без присадочного материала. Разработаны режимы лазерной сварки, обеспечивающие высокие значения пластичности и ударной вязкости, при этом уровень прочности сварных соединений сплава В-1481 составил 0,6 от прочности основного материала, а для сплава В-1579: 0,9.*

*Установлено, что на сварных соединениях сплава В-1579 с увеличением скорости сварки происходит повышение прочностных характеристик и сопротивления усталости. Сплав В-1481 более чувствителен к воздействию термического цикла сварки – чем выше скорость сварки, тем меньше разупрочнение и выше значения характеристик сопротивления усталости.*

**Ключевые слова:** лазерная сварка, панель фюзеляжа, алюминиевый и алюминий-литиевый сплавы, микроструктура, механические свойства.

*The structure formation special features of new V-1579(Al–Mg–Sc) and V-1481(Al–Cu–Li)-alloys laser welds (without filler material) was investigated. The laser welding parameters were carried out to provide V-1481 welds strength level about 0,6 and about 0,9 for V-1579.*

*It was also investigated that increasing of welding speed can improve V-1579 welds strength value, but low-cycle fatigue value decreased. As for V-1481 alloy, it is more sensitive to welding thermal cycle: increasing of welding speed for can improve loss of strength and low-cycle fatigue value.*

**Keywords:** laser beam welding, aluminum alloy, aluminum-lithium alloy, microstructure, mechanical properties.

<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**

Снижение массы с одновременным снижением стоимости производства – наиболее сложная задача в области разработки конструкций фюзеляжей пассажирских самолетов и без создания новых перспективных материалов совместно с технологиями их соединения решить ее не представляется возможным [1–3].

Одним из самых ранних стратегических решений в этом плане была замена компанией Airbus клепаных конструкций на конструкции, изготовленные лазерной сваркой. В настоящее время лазерная сварка успешно применяется при изготовлении панелей нижней части фюзеляжа самолетов А318, А340-600HGW и А380 (рис. 1, а). В рамках этого проекта стрингер сваривали с обшивкой панелей (рис. 1, б). Данная технология позволила уменьшить массу самолета и повысить топливную эффективность [4].

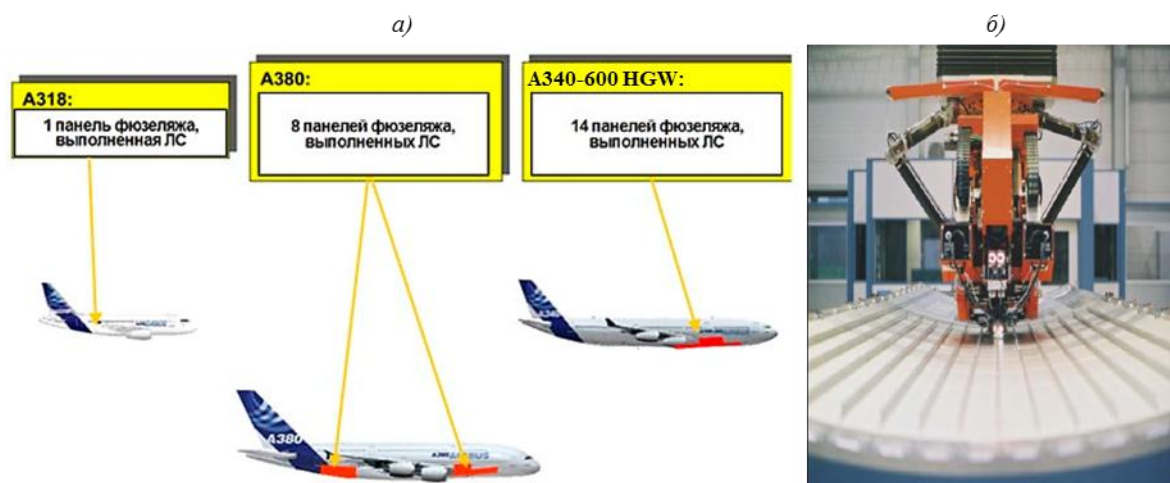


Рис. 1. Применение сварных панелей в современных самолетах компании Airbus (а) и процесс лазерной сварки (ЛС) панели фюзеляжа (б)

В России процессы лазерной сварки не получили широкого применения в производстве. Это связано с отсутствием сертификации этих технологий и нормативно-технологической документации, определяющей их использование в различных отраслях производства.

Однако на протяжении последних лет во ФГУП «ВИАМ» разработаны технологии лазерной сварки алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов, позволяющие применить их в сварных конструкциях элементов фюзеляжа перспективных изделий авиационной техники [5–10].

Жесткий термический цикл, характерный для лазерной сварки, существенно сокращает зону термического влияния, предотвращает фазовые и структурные превращения в околошовной зоне, приводящие к разупрочнению и снижению коррозионной стойкости сварных соединений. Сварные соединения, выполненные лазерным лучом, в ряде случаев превосходят традиционные виды сварки по характеристикам прочности, коррозионной стойкости и остаточным тепловым деформациям, что позволяет рассматривать лазерную сварку как конечную сборочную операцию, не требующую последующей механической обработки и правки [11–15].

Следует отметить, что лазерная сварка алюминиевых, и особенно алюминий-литиевых сплавов имеет свои специфические особенности. Так, расплавление металла начинается только при мощности определенной плотности ( $\sim 1 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>), при меньшей плотности мощности проплавление вообще отсутствует. Этот эффект объясняется сочетанием высоких коэффициента отражения, теплопроводности и теплоемкости алюминия. После начала процесса плавления коэффициент отражения резко снижается и происходит интенсивное проплавление материала с образованием парогазового канала. С момента образования канала уже существует линейная зависимость глубины проплавления от мощности луча. Указанный порог мощности зависит от степени фокусировки, толщины пластины, состояния ее поверхности и скорости сварки.

При лазерной сварке алюминиевых сплавов также возникает проблема, связанная с обратным отражением излучения. Сущность этого явления состоит в том, что часть падающего излучения волоконного лазера отражается металлом и, проходя обратный путь через оптическую систему и транспортировочное волокно, попадает обратно в лазер. Весьма простым и эффективным способом снижения вероятности попадания отраженного излучения в оптический тракт является наклон технологической

головки относительно нормали к обрабатываемой поверхности на величину угла от 10 до 12 град в направлении сварки. При таком наклоне уровень сигнала обратного отражения, воспринятый датчиком лазера, снижается в 3 раза при уменьшении эффективности не более чем на 5% [16].

Важнейшей задачей при изготовлении крупногабаритных конструкций из алюминиевых сплавов является обеспечение качественной сборки с минимальными зазорами и перекосами кромок. Для лазерной сварки допустимый зазор, как правило, не должен превышать 0,1 мм. Обеспечение такой точности сборки в условиях реального технологического процесса затруднительно, поэтому возникает необходимость поиска технологических решений, направленных на снижение требований к точности сборки. Эту задачу можно решить путем применения присадочной проволоки при лазерной сварке.

Одной из причин снижения прочности сварного соединения, выполненного лазерной сваркой, принято считать выгорание легкоиспаряющихся элементов, таких как магний, литий, цинк. Для минимизации такого неблагоприятного процесса применяют либо оптимизацию режимов сварки, либо присадку [17]. Наличие дефектов в сварных швах, наиболее характерным из которых при сварке плавлением алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов является пористость, также может значительно снизить механические свойства. Высокие скорости охлаждения при лазерной сварке приводят к неравновесным условиям кристаллизации, при которых возможно образование микропор, расположенных по границам зерен [18]. Для предотвращения образования таких дефектов рекомендуются режимы лазерной сварки, обеспечивающие наименьшее термическое воздействие на основной материал, тщательную подготовку поверхности под сварку, а также присадочные материалы, улучшающие качество формирования сварного шва и повышающие механические свойства сварных соединений. [19, 20].

До недавнего времени для сварки алюминиевых сплавов в основном использовали CO<sub>2</sub>-лазеры, благодаря высокой степени их теоретической и технологической проработки. Однако наиболее перспективным является применение оптоволоконных иттербиевых лазеров. Это обусловлено их высоким КПД, более чем в 2 раза превышающим данный показатель CO<sub>2</sub>-лазеров, а также возможностью доставки лазерного излучения к месту сварки по оптоволокну, а не с помощью оптических зеркал, которые требуют создания специальных конструктивных систем, препятствующих более гибкому использованию лазерного излучения [21].

Использование современного универсального оборудования для проведения процесса лазерной сварки позволяет снизить вероятность структурных превращений в околошовной зоне и уровень сварочных деформаций, повысить механические характеристики сварных соединений.

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») [22].

### **Материалы и методы**

Алюминий-литиевые сплавы, созданные на базе системы Al–Cu–Li, характеризуются пониженной плотностью, повышенными жесткостью, прочностью и ресурсными характеристиками. Среди алюминий-литиевых сплавов третьего поколения на основе системы Al–Cu–Li известны высокопрочные российские и зарубежные сплавы марок В-1461, В-1469, 2199 и 2196. Они являются альтернативой основному конструкционному алюминиевому сплаву марок В95п.ч.-Т2.

В алюминий-литиевом высокоресурсном сплаве марки В-1481 в результате снижения содержания Li, дополнительного легирования Zn, Ag и Mg, применения термомеханической обработки и ступенчатых режимов старения обеспечено повышение значений вязкости разрушения при сохранении высоких прочностных характеристик [23, 24].

Сплав марки В-1579 – свариваемый термически неупрочняемый алюминиевый деформируемый сплав системы Al–Mg–Sc. Сплав легирован микродобавками редкоземельных материалов, что обеспечило повышение механических свойств по сравнению с базовыми термически неупрочняемыми алюминиевыми сплавами благодаря эффекту структурного упрочнения и образованию мелкодисперсных нерастворимых фаз с алюминием. Сплав может применяться в конструкциях изделий ракетно-космической техники, судостроения, авиационной техники и машиностроения [25].

Лазерная сварка листовых полуфабрикатов из сплава марки В-1481 в состоянии Т1 (закалка+искусственное старение, толщина 3,0 мм) и сплава марки В-1579 (отожженное состояние, толщина 2,0 мм) проводилась с использованием роботизированного комплекса лазерной гибридной сварки LaserWeld 8R60, в состав которого входит иттербиевый волоконный лазерный источник ЛС-8 мощностью 8 кВт (рис. 2). Фокусировка лазерного излучения, передаваемого к месту обработки по волокну, осуществлялась фокусирующей головкой Precitec YW50 (фокусное расстояние 500 мм). Стыковые сварные соединения выполнялись без использования присадочного материала.



Рис. 2. Роботизированный технологический комплекс лазерной гибридной сварки Laser Weld 8R60

В качестве эффективных мер предотвращения пористости и наличия оксидных включений для подготовки поверхности под сварку использовалось химическое фрезерование листовых заготовок сплава марки В-1481 на глубину 0,15 мм с последующим шабрением непосредственно перед сваркой соединяемых торцов и поверхностей на ширину 8–10 мм. Для сплава марки В-1579 использовалось травление под сварку с последующим шабрением непосредственно перед сваркой. Для защиты сварочной ванны от окисления применялся инертный газ аргон.

Наиболее эффективной схемой защиты шва сверху является схема с трубчатым соплом с ламинарной подачей газа в зону шва под углом 45 град. Такая конструкция сопла обеспечивает качественную защиту зоны шва, высокое значение теплового КПД и оптимальную форму шва (рис. 3). С целью защиты от обратного отражения лазерную головку наклоняли под углом 10 град к нормали.

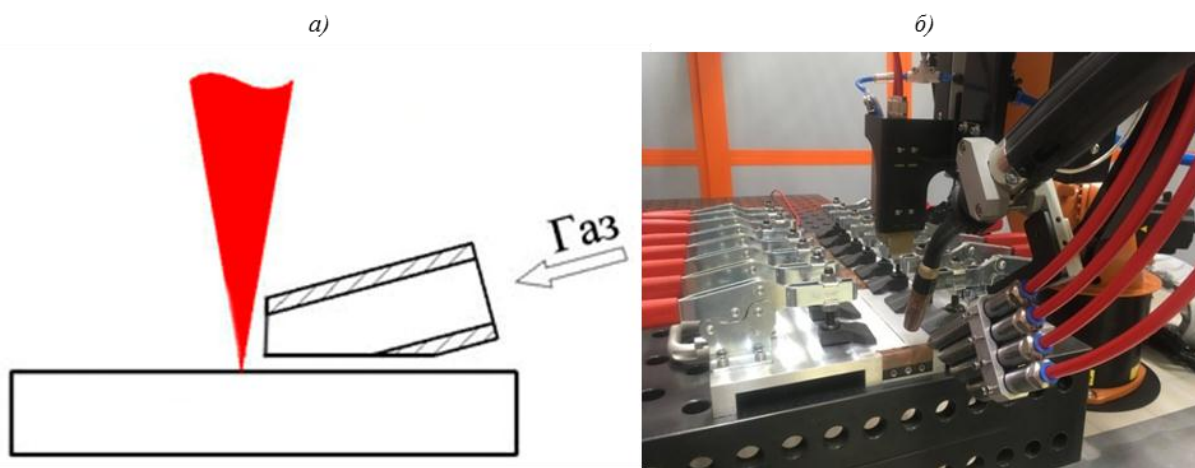


Рис. 3. Схема защитного газового сопла (а) и набор газовых сопел лазерного комплекса (б)

Лазерную сварку проводили в специальном кондукторе на медной подкладке с канавкой размерами 10×5 мм. Размер канавок на подкладных планках должен исключать соприкосновение расплавленного металла корня сварного шва и корневого плазменного факела с поверхностями канавок. По дну канавки были просверлены отверстия, по которым подавался аргон для защиты корня шва.

Методы исследования и геометрические размеры образцов для определения механических характеристик ( $\sigma_b$ ,  $\alpha$ , KCU) сварных соединений соответствовали ГОСТ 6996–66 и ГОСТ 1497–84. Исследования микроструктуры сварных соединений проводили на инвертированном оптическом микроскопе Leica DM IRM с программно-аппаратным комплексом обработки изображения Image Expert Pro3x. Исследования нетравленных шлифов проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-6490LV.

В данной работе исследовались особенности формирования структуры и свойств сварных соединений алюминиевых сплавов марок В-1579 и В-1481, выполненных лазерной сваркой.

### Результаты и обсуждение

Как правило, сварные соединения, выполненные лазерной сваркой, характеризуются некоторым занижением шва, вызванным провисанием сварочной ванны в связи с малой вязкостью расплава. Анализ внешнего вида сварных соединений алюминиевых сплавов показывает, что на всех режимах сварки наблюдается так называемая «чешуйчатость» (рис. 4). Это связано с тем, что лазерная сварка – это крайне нестационарный процесс, сопровождающийся кипением, испарением и резким волнообразным охлаждением материала в сварочной ванне.

Сварка проводилась с фиксированной мощностью лазерного излучения на различных скоростях ( $v_{св}$ ): 60, 90 и 120 м/ч, т. е. с различной погонной энергией. Для оптимальных размеров сварного шва, выполненного лазерной сваркой, соотношение ширины усиления к ширине проплава должно быть близко к 1, что обеспечивает минимальные деформации и коробления сварной конструкции. Такое соотношение размеров обеспечивается при сварке на скоростях 120 (для сплава В-1481) и 60 м/ч (для сплава В-1579).

Металлографические исследования сварных соединений алюминиевого и алюминий-литиевого сплавов показали, что при всех выбранных режимах сварки в сварных соединениях отсутствуют дефекты типа пор и трещин, однако на шлифах сварных соединений, выполненных лазерной сваркой на большой скорости, возникают подрезы (рис. 4).



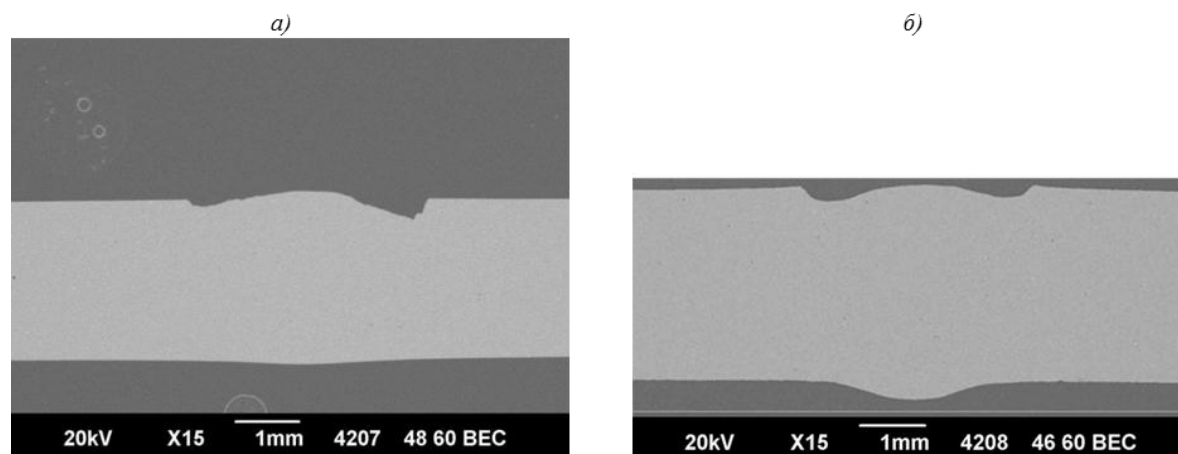


Рис. 4. Сварной шов образцов из сплавов марок В-1579 (а) и В-1481 (б) при скорости сварки 120 м/ч

Для всех вариантов сварки не наблюдается изменений в зоне термического влияния. Происходит резкий переход от литого металла шва к основному металлу. Такой результат особенно важен для сварки термоупрочненных сплавов. Структура сварного шва при лазерной сварке сплава В-1481 характеризуется чередованием мелкой и крупной субдендритной структуры с размером зерна от 10 до 120 мкм (рис. 5, а). Для сплава В-1579 зона структурных изменений в основном металле также составляет не более 100 мкм (рис. 5, б).

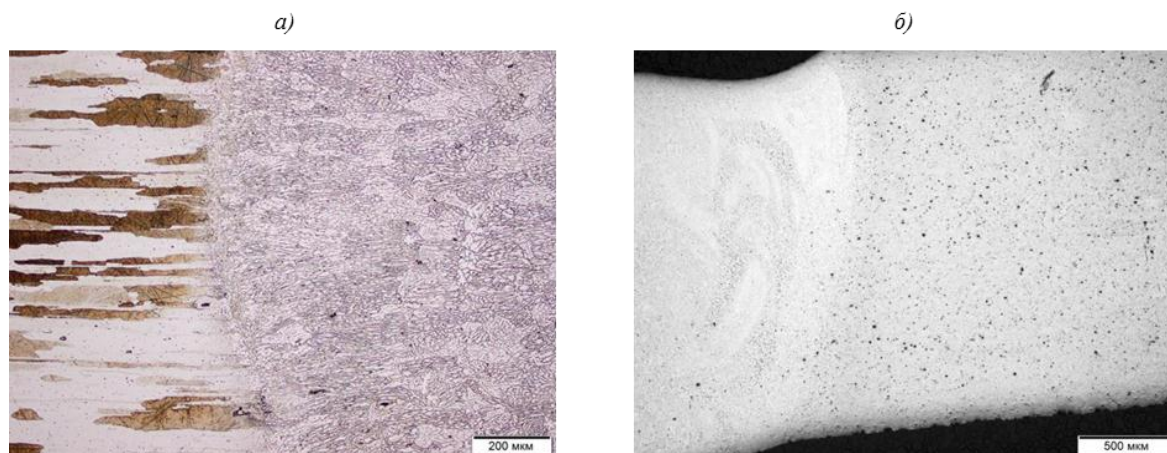


Рис. 5. Микроструктуры сварного шва сплавов В-1481 (а) и В-1579 (б)

Исследовано влияние режимов сварки на механические характеристики сварных соединений сплавов В-1579 и В-1481 (см. таблицу).

Алюминиевый и алюминий-литиевый сплавы по-разному реагируют на воздействие термического цикла сварки. На сварных соединениях сплава В-1579 с увеличением скорости сварки (соответственно с уменьшением погонной энергии) происходит повышение прочностных характеристик и сопротивления усталости.

Сплав В-1481 более чувствителен к воздействию термического цикла сварки – чем выше скорость сварки, тем меньше разупрочнение и выше значения характеристик сопротивления усталости.

Однозначно можно сказать, что для сварки сплава В-1481 необходимо применять жесткие режимы сварки. На рис. 6 представлены зависимости характеристик сопротивления усталости сварных соединений от режима лазерной сварки.

## Исследование влияния скорости сварки на механические свойства сварных соединений

Сплав	Скорость сварки $v_{св}$ , м/ч	$\sigma_{в.св}$ , МПа	$KCU_{ср}$ , кДж/м <sup>2</sup>	Угол изгиба $\alpha_{ср}$ , град	МЦУ: $N_{ср}$ , цикл (при $\sigma_{max}=157$ МПа, $f=50$ Гц)
В-1579 (толщина 2,0 мм)	60	315	200	80	131550–166010
	90	325	205	92	28640–35300
	120	350	190	100	27670–23520
В-1481 (толщина 3,0 мм)	60	270	115	52	62490–75290
	90	280	105	48	116210–289110
	120	310	95	48	318100–375580

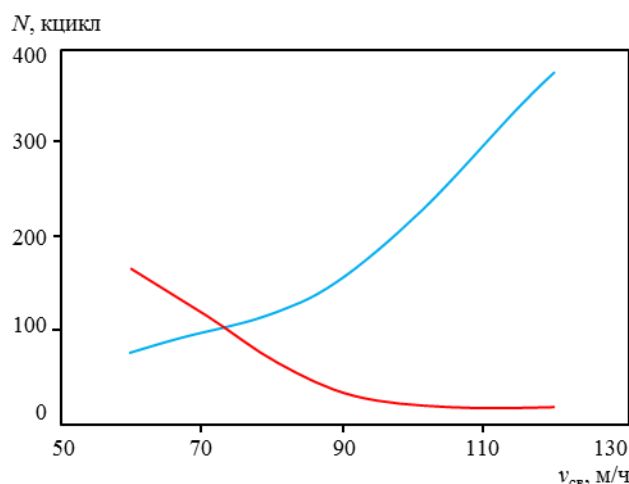


Рис. 6. Зависимость многоциклового усталости от скорости сварки для сплавов В-1579 (—) и В-1481 (—)

Анализ характеристик сопротивления усталости показал, что при лазерной сварке без присадочного материала сварные соединения сплава В-1481 показали максимальные значения МЦУ (>300 кцикл) при скорости сварки  $v_{св}=120$  м/ч, а для сплава В-1579 максимальные значения МЦУ получены для сварных соединений, выполненных со скоростью  $v_{св}=60$  м/ч.

Оба сплава показали высокие значения пластичности и ударной вязкости. При этом уровень прочности сварных соединений сплава В-1481 составил 0,6 от прочности основного материала, а для сплава В-1579: 0,9.

Необходимо отметить, что для сварных соединений сплава В-1579, полученных лазерной сваркой, удалось получить высокие значения механических характеристик без использования присадочного материала.

### Заключения

Анализ проведенных исследований показал, что для сплавов различных систем легирования принципиально важен подход к подбору режимов сварки.

Разработаны режимы лазерной сварки, обеспечивающие наиболее высокие прочностные свойства сварных соединений алюминиевого сплава В-1579: 0,9 от прочности основного материала, для алюминий-литиевого сплава В-1481: 0,6. Установлено, что при увеличении скорости сварки повышается МЦУ сварных соединений сплава В-1481, для сплава В-1579 характерна обратная зависимость.

Перспективным направлением дальнейших исследований технологии лазерной сварки является применение присадочных материалов, что позволит улучшить свариваемость, снизить требования к точности сборки и повысить механические характеристики сварных соединений новых сплавов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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». М., 2012. Ст. 8.
2. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 157–167.
3. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
4. Welding and joining of aerospace materials / ed. by M.C. Chaturvedi. Woodhead publishing limited, 2012. 430 p.
5. Грушко О.Е., Овсянников Б.В., Овчинников В.В. Алюминиево-литиевые сплавы: металлургия, сварка, металловедение. М.: Наука, 2014. 296 с.
6. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Жегина И.П., Иода Е.Н., Лоскутов В.М. Особенности и перспективы сварки алюминийлитиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2002. №4. С. 3–12.
7. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // Матер. Всерос. науч.-практич. конф. «Сварка и безопасность». М., 2012. Т. 1. С. 21–30.
8. 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.
9. Шиганов И.Н., Холопов А.А., Трушников А.В., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д., Скупов А.А. Лазерная сварка высокопрочных алюминий-литиевых сплавов с присадочной проволокой // Сварочное производство. 2016. №6. С. 44–50.
10. Скупов А.А., Пантелеев М.Д., Иода Е.Н., Мовенко Д.А. Эффективность применения редкоземельных металлов для легирования присадочных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №3 (в печати).
11. Григорьянц А.Г. Лазерная сварка металлов. М.: Высшая школа, 1988. 207 с.
12. Справочник по лазерной сварке / под ред. С. Катаяма. М.: Техносфера, 2015. 704 с.
13. Flemming Ove Olsen. Hybrid laser-arc welding. Woodhead Publishing Limited, 2009. 323 p.
14. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
15. 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.
16. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 650 с.
17. Шиганов И.Н., Холопов А.А. Лазерная сварка алюминиевых сплавов // Фотоника. 2010. №3. С. 6–10.
18. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Антипов В.В., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д., Скупов А.А. Эффективность применения присадочных материалов при лазерной сварке высокопрочных алюминий-литиевых сплавов // Сварочное производство. 2016. №10. С. 17–21.
19. Martukanitz R.P. A critical review of laser beam welding // Proc. SPIE 5706. Critical Review: Industrial Lasers and Applications. 2005. P. 11–24.
20. Matsunawa A., Mizutani M., Katayama S. and Seto N. Porosity formation mechanism and its prevention in laser welding // Welding International. 2003. Vol.17 (6). P. 431–437.
21. Григорьянц А.Г., Грезев В.А. Отличительные особенности лазерной сварки с применением оптоволоконных и CO<sub>2</sub>-лазеров // Сварочное производство. 2014. №12. С. 17–23.
22. 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.
23. Колобнев Н.И. История развития, фазовый состав и свойства сплавов системы Al–Cu–Li // Технология легких сплавов. 2015. №2. С. 46–52.
24. Рябова Е.Н., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Оглодков М.С. Особенности структуры и свойств листов из сплавов системы Al–Cu–Li–Mg // Металлургия машиностроения. 2015. №1. С. 17–19.
25. Рябов Д.К., Вахромов Р.О., Иванова А.О. Влияние малых добавок элементов с высокой растворимостью в алюминии на микроструктуру слитков и холоднокатаных листов из сплава системы Al–Mg–Sc // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №9. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-5-5.