

УДК 621.791

М.Д. Пантелеев<sup>1</sup>, М.М. Бакрадзе<sup>1</sup>, А.А. Скупов<sup>1</sup>,  
А.В. Щербаков<sup>2</sup>, В.Е. Белозор<sup>1</sup>

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В-1579

DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-11-17

*В данной работе исследовались особенности формирования макро- и микроструктуры и механических характеристик сварных соединений алюминиевого сплава В-1579 системы Al–Mg–Sc, выполненных автоматической аргоно-дуговой, лазерной и электронно-лучевой сваркой. Исследовано влияние состава присадочного материала на стойкость к образованию горячих трещин сплава В-1579 и механические свойства при различных видах сварки. Отмечена хорошая свариваемость сплава всеми видами сварки плавлением с обеспечением прочности сварных соединений на уровне не ниже 0,8 от прочности основного металла.*

**Ключевые слова:** алюминиевый сплав В-1579, автоматическая аргоно-дуговая, электронно-лучевая сварка, лазерная сварка, микроструктура, механические свойства.

M.D. Panteleev<sup>1</sup>, M.M. Bakradze<sup>1</sup>, A.A. Skupov<sup>1</sup>,  
A.V. Scherbakov<sup>2</sup>, V.E. Belozor<sup>1</sup>

## TECHNOLOGICAL FEATURES OF FUSION WELDING OF ALUMINUM ALLOY V-1579

*The article explores the features of macro- and microstructure formation and properties of new aluminum alloy V-1579 (Al–Mg–Sc) produced by automatic argon arc, laser beam welding and electron beam welding. The influence of adding material composition on resistance to hot cracking formation of alloy V-1579 and mechanical properties at different types of welding were studied. Good welding capacity of alloy by all types of fuse welding with ensuring strength of welded joints at the level not below than 0,8 from the strength of the base material has been noted.*

**Keywords:** aluminum alloy V-1579, automatic argon-arc, electron beam welding, laser beam welding 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

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» [Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research University «MPEI»]; e-mail: universe@mpei.ac.ru

### Введение

В настоящее время в России известен ряд термически неупрочняемых сплавов системы Al–Mg, обладающих хорошей коррозионной стойкостью, свариваемостью и применяющихся во многих отраслях промышленности, включая судостроение, автомобилестроение и ракетную технику. Основным конструкционным свариваемым сплавом является сплав АМг6, содержащий 6% (по массе) Mg, однако он обладает низкими характеристиками прочности в отожженном состоянии ввиду отсутствия в его структуре упрочняющих фаз, аналогичных термически упрочняемым алюминиевым сплавам других систем легирования [1–3]. Одним из способов повышения комплекса механических характеристик алюминиевых сплавов является легирование их переходными и редкоземельными металлами, позволяющими измель-

чить зеренную структуру и обеспечить дополнительное структурное упрочнение за счет образования ультрамелких частиц-интерметаллидов. Наиболее перспективным легирующим элементом с точки зрения повышения прочностных характеристик сплавов Al–Mg является скандий (Sc) [4–7].

В ВИЛС совместно с ИМЕТ им. Байкова разработана новая группа сплавов на основе системы Al–Mg, содержащих добавку скандия. Скандий, относящийся к группе переходных металлов, взаимодействует с алюминием аналогично другим переходным металлам (типа Mn, Cr, Zr, Ti). При кристаллизации скандий в сплавах системы Al–Mg в пределах 0,4–0,5% (по массе) в основном входит в твердый раствор. При последующей обработке слитка (гомогенизация, горячая деформация, отжиг деформированных заготовок) скандий выделяется из пересыщенного твердого раствора

в виде дисперсной фазы  $Al_3Sc$ . Вторичные частицы дисперсной когерентной фазы, во-первых, непосредственно упрочняют сплавы (эффект дисперсионного твердения), во-вторых, значительно повышая температуры рекристаллизации сплава, обуславливают сохранение в полуфабрикатах после отжига нерекристаллизованной структуры, что обеспечивает дополнительное (структурное) упрочнение [8]. Кроме того, добавка скандия дополнительно увеличивает стойкость к образованию горячих трещин ( $V_{кр}$ ) (рис. 1). Это связано с уменьшением величины температурного интервала хрупкости (ТИХ), а также с повышением пластичности металла в этом интервале в результате модифицирования скандием [9].

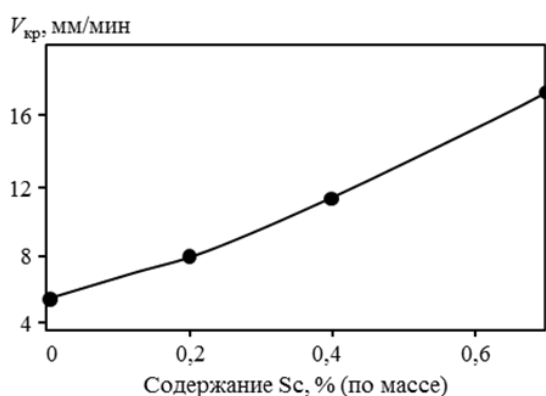


Рис. 1. Зависимость стойкости к образованию горячих трещин ( $V_{кр}$ ) при сварке сплава системы Al-6,3% (по массе) Mg от содержания Sc

Во ФГУП «ВИАМ» разработан термически неупрочняемый сплав системы Al-Mg-Sc марки В-1579, который имеет повышенные на 30–70% значения механических свойств при сохранении уровня свариваемости в сравнении с базовым сплавом АМг6 [10]. Химический состав сплава В-1579 представлен в табл. 1 [11].

Благодаря добавке скандия сплав отличается мелкозернистой структурой и повышенным комплексом механических характеристик в сравнении с традиционными сплавами системы Al-Mg, при этом характеристики коррозионной стойкости остаются на том же уровне.

Изготовление высокоэффективных интегрированных сварных конструкций из алюминиевых сплавов предполагает обязательную взаимосвязь двух направлений исследований: создание новых высокотехнологичных сплавов и разработка раз-

личных технологических процессов их соединения методами сварки [12]. Так, для сплава В-1579 проведены сравнительные исследования методов автоматической аргоно-дуговой (ААрДЭС), лазерной и электронно-лучевой сварки (ЭЛС).

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») [13].

### Материалы и методы

Все работы по исследованию свариваемости сплава В-1579 проводили на листовых полуфабрикатах толщиной 2,0 мм.

В данной работе использовалась методика оценки трещиностойкости МГТУ им. Н.Э. Баумана, критерием которой является величина критической скорости деформации растяжения ( $V_{кр}$ ) металла шва в процессе кристаллизации, при которой в нем не образуется трещин. Оценка трещиностойкости проводили на установке ЛТП1-6 с использованием образцов размером 50×50 мм (рис. 2).

В качестве присадочных материалов для исследования стойкости к образованию горячих трещин и для сварки алюминиевого сплава В-1579 использовали сварочные проволоки системы Al-Mg различных составов – Св-АМг5, Св-АМг6, Св-АМг61, Св-1597 – по ГОСТ 7871–75.

Автоматическую аргоно-дуговую сварку (ААрДЭС) проводили на установке КДС-29, оснащенной источником питания сварочной дуги с максимальным током 450 А (рис. 3, а).

Лазерную сварку проводили на роботизированном лазерном комплексе Laser Weld 8R60 производства ООО «НТО «ИРЭ-Полюс». В состав комплекса входит иттербиевый волоконный лазер мощностью до 8 кВт (длина волны излучения: 1070 нм), манипулятор KUKA KR 60 HA с точностью позиционирования 0,05 мм (рис. 3, б). Управляющая программа комплекса позволяет задавать траекторию перемещения лазерной головки и положение фокуса лазерного луча, а также технологические параметры процесса лазерной сварки: скорость сварки ( $V_{св}$ ), мощность лазерного луча ( $W_{л}$ ), скорость подачи присадочной проволоки ( $V_{прис}$ ).

Электронно-лучевую сварку (ЭЛС) проводили на комплексе электронно-лучевой сварки АЭЛТК-11-486, оснащенный системой ЧПУ и энергоблоком

Таблица 1

Состав сплава марки В-1579

Содержание элементов, % (по массе)										Примеси, % (по массе), не более		
Al	Mg	Sc	Mn	Zr	Zn	Ni	Cr	Ti	Fe	Cu	Si	In
Основа	5,2–5,7	0,18–0,22	0,5–0,8	0,09–0,13	0,5–0,8	0,10–0,15	0,05–0,1	0,01–0,05	0,1–0,15	0,1	0,1	0,005

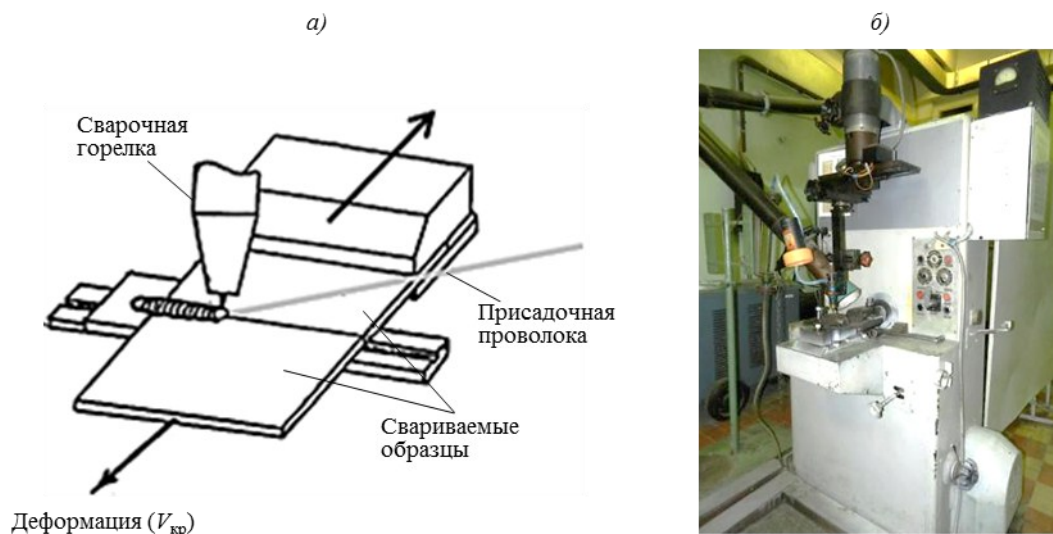


Рис. 2. Процесс испытаний на стойкость к образованию горячих трещин (а) и установка для испытаний ЛТП-6 (б)

ЭЛА 40/60 мощностью 40 кВт с ускоряющим напряжением 60 кВ, позволяющим в процессе сварки с помощью программы задавать координаты перемещения электронно-лучевой пушки, технологические параметры процесса ЭЛС, такие как скорость сварки, ток луча, ток фокусировки, ускоряющее напряжение и рабочее расстояние (рис. 3, в). В качестве катода использовали таблетку из гексаборида лантана ( $LaB_6$ ) с диаметром активной зоны 6 мм.

Для основного и присадочных материалов в качестве подготовки поверхности применяется химическое травление непосредственно перед сваркой по ПИ 1.4.890–2004 «Подготовка поверхности металлов и сплавов под контактную и дуговую сварку».

### Результаты и обсуждение

При изготовлении сварных конструкций из алюминиевых сплавов методами сварки плавлением одним из основных дефектов является пористость швов. Основной причиной образования

пор при сварке алюминиевых сплавов является наличие водорода в расплаве металла. Вероятными источниками поступления водорода в сварочную ванну могут быть: водород, находящийся в основном металле; водород, содержащийся в защитном газе, и водород, образующийся в результате диссоциации в дуге паров воды, присутствующих в нем или попадающих в зону дуги из атмосферы, а также водород, образующийся в результате взаимодействия основного и присадочного металлов и влаги, входящей в состав гидратированных оксидов. Наиболее опасным является последний источник водорода, именно поэтому следует обратить внимание на вопрос подготовки поверхности под сварку [14].

Исследовали влияние времени выдержки после травления на порообразование при сварке. Оценивали два варианта подготовки – с шабрением и без шабрения кромок. Сварку проводили непосредственно после травления и через 5; 10 и 15 дней после травления. Количество пор определяли по результатам рентгеновского контроля. Установлено,

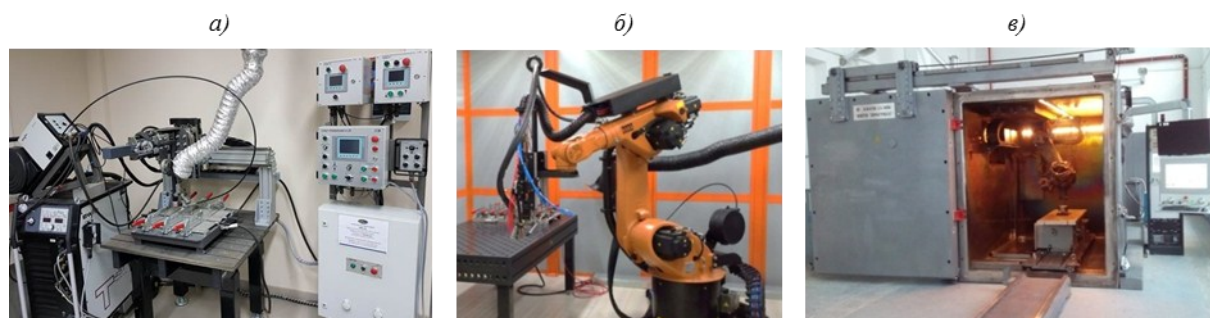


Рис. 3. Комплексы для осуществления сварки:

а – технологический комплекс автоматической аргоно-дуговой сварки КДС-29; б – роботизированный технологический комплекс лазерной гибридной сварки Laser Weld 8R60; в – комплекс электронно-лучевой сварки на базе установки АЭЛТК-11-486

Результаты испытаний на стойкость к образованию горячих трещин у сплава В-1579

Присадочная проволока	Скорость сварки $V_{кр}$ , мм/мин
Без присадки	3,9
Св-АМг5	9,7
Св-АМг6	9,0
Св-АМг61	10,5
Св-1597	12

что пористость в сварных соединениях сплава В-1579 отсутствует, если сварка проводится не позднее чем через 1 сут после химического травления. Применение шабрения кромок непосредственно перед сваркой позволяет увеличить разрыв между операциями травления и сваркой до 5 сут.

Анализ результатов испытаний на стойкость к образованию горячих трещин показал, что применение присадочного материала значительно повышает данный показатель. Наибольшее значение достигается при использовании присадочного материала марки Св-1597, также имеющем в своем составе скандий (табл. 2).

Сплав В-1579 обладает высокой текучестью расплава, что приводит к необходимости использовать при автоматической аргоно-дуговой сварке высокие скорости – более 20 м/ч.

Исследование изменения микроструктуры сварного соединения показало, что применение сварочной проволоки марки Св-1597 обеспечивает получение более мелкозернистой структуры сварного шва. Применение оптимальных режимов сварки обеспечивает формирование узкой зоны термического влияния, представляющей собой рекристаллизованную структуру, которая формируется при воздействии высоких температур при ААрДЭС в процессе образования и кристаллизации сварного соединения. Изменение характера структуры связано с кратковременным локальным повышением температуры по границе шва, что приводит к развитию процессов рекристаллизации. Типичные микроструктуры сварных соединений представлены на рис. 4.

Анализ результатов механических испытаний сварных соединений показал, что применение

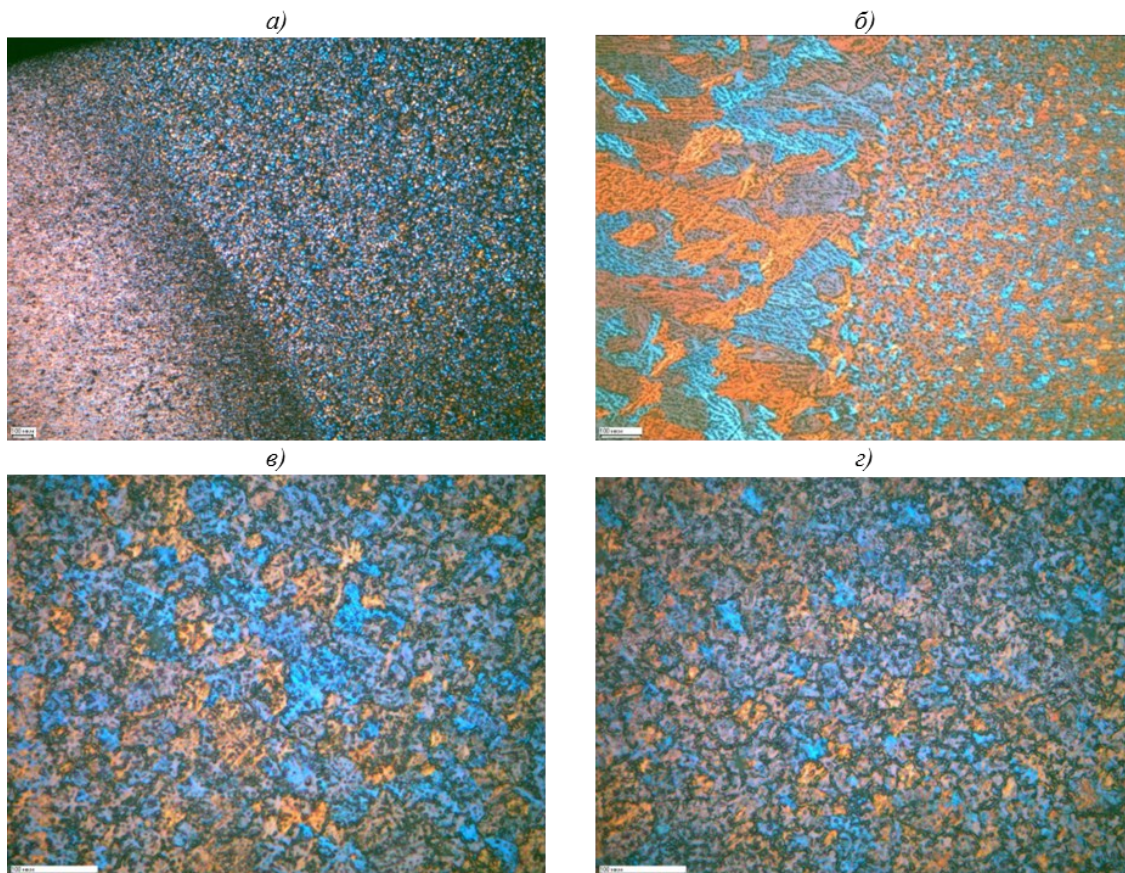


Рис. 4. Микроструктура сварного соединения сплава В-1579 при ААрДЭС: а – околошовная зона ( $\times 50$ ); б – околошовная зона ( $\times 100$ ); в – сварной шов с присадкой Св-АМг6 ( $\times 200$ ); г – сварной шов с присадкой Св-1597 ( $\times 200$ )

Таблица 3

Механические свойства сварных соединений листов из сплава В-1579

Присадочная проволока	$\sigma_{в,св}$ , МПа	$K=\sigma_{в,св}/\sigma_{в}$	$KCU$ , кДж/м <sup>2</sup>	Угол изгиба $\alpha$ , градус
Св-АМг6	345	0,8	272	105
Св-1597	395	0,9	330	115

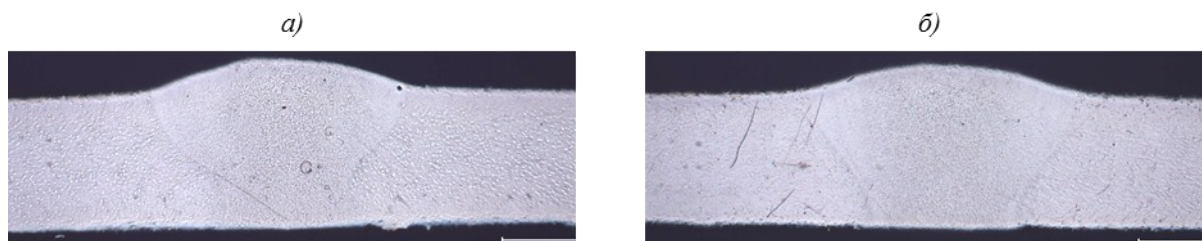


Рис. 5. Макроструктура ( $\times 12,5$ ) сварных соединений сплава В-1579 на скорости сварки 0,04 (а) и 0,02 м/с (б)

проволоки марки Св-1597 позволяет повысить прочность, ударную вязкость и пластичность шва (табл. 3).

При лазерной сварке, в свою очередь, установлено положительное влияние на ресурсные характеристики малых скоростей сварки. Снижение скорости сварки в исследуемом диапазоне не приводит к дополнительному разупрочнению, однако возникают такие негативные особенности, как интенсивное кипение металла сварочной ванны с последующей фиксацией газовых пузырьков в виде пористости. Это связано с выгоранием легкоиспаряющегося легирующего элемента – Mg. Кроме того, сварка на малых скоростях приводит к провисанию сварочной ванны [15].

Для минимизации этих негативных факторов проводилась сварка расфокусированным лучом (с пониженной плотностью мощности) совместно с применением присадочной проволоки. При этом исследование микроструктуры показало, что литая зона сварных швов сплава В-1579, выполненных на скорости сварки  $V_{св}=0,04$  м/с, характеризу-

ется зауживанием в нижней части в отличие от образцов, выполненных на скорости сварки  $V_{св}=0,02$  м/с, на которых проплав более широкий, что положительно сказывается на прочностных и ресурсных характеристиках (рис. 5).

Применение присадок обеих марок при сварке сплава В-1579 позволяет получить мелкозернистую структуру сварного шва с размером зерна 10–20 мкм в зависимости от скорости сварки (рис. 6).

При лазерной сварке сплава В-1579 применение различных технологических вариантов (режимов сварки в заданных диапазонах и состава присадочного материала) незначительно влияет на пластичность, измеренную по углу изгиба (до 15%), и прочность (до 3%) сварных соединений (табл. 4).

Применение сварочной проволоки состава Св-АМг5 вместо состава Св-АМг61 позволяет повысить ударную вязкость сварных соединений до 24%.

Сварной шов, выполненный электронно-лучевой сваркой, характеризуется отсутствием чешуйчатости, параллельными стенками сварочной ванны и

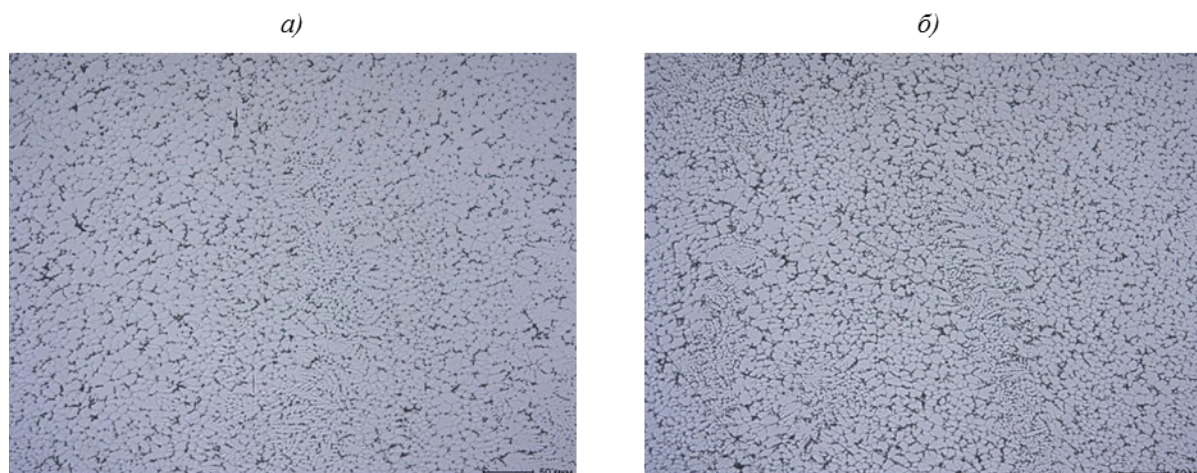


Рис. 6. Микроструктура центра шва сварных соединений сплава В-1579, выполненных на скорости сварки  $V_{св}=0,02$  м/с присадочными проволоками Св-АМг5 (а –  $\times 200$ ) и Св-АМг61 (б –  $\times 2000$ )

Таблица 4

Механические характеристики сварных соединений сплава В-1579, выполненных лазерной сваркой с присадками

Присадочная проволока	$\sigma_{в.св}$ , МПа	$V_{св}$ , м/с	$K=\sigma_{в.св}/\sigma_{в}$	$KCU$ , кДж/м <sup>2</sup>	Угол изгиба $\alpha$ , градус
Св-АМг5	370	0,04	0,93	235	94
	375	0,02	0,94	220	102
Св-АМг61	380	0,04	0,95	220	108
	375	0,02	0,94	190	96

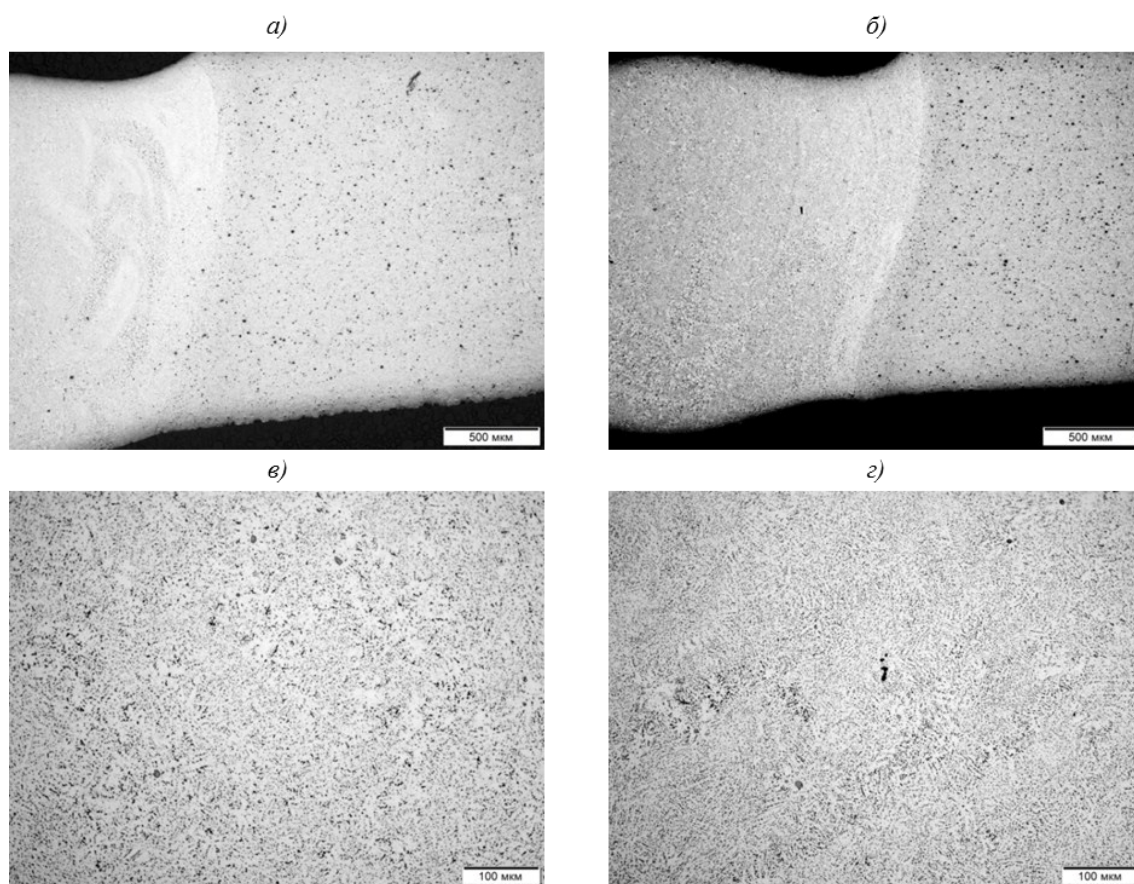


Рис. 7. Микроструктура сварных соединений сплава В-1579, выполненных электронно-лучевой сваркой при скорости сварки 0,025 (а, в) и 0,03 м/с (б, з), переходной зоны (а, б) и центра шва (в, з)

незначительным провисанием расплава. Дендритная структура литой зоны шва более равномерная по сравнению со структурой, полученной при лазерной сварке (рис. 7).

Исследование влияния скорости ЭЛС сплава В-1579 на механические характеристики показало, что с увеличением скорости сварки повышается прочность

и пластичность сварных соединений, при этом показатели ударной вязкости снижаются (табл. 5).

Отличительной особенностью сварных соединений сплава В-1579, выполненных ЭЛС, является более высокий уровень ударной вязкости по сравнению с лазерной сваркой, связанный с вакуумным переплавом металла шва.

Таблица 5

Влияние скорости сварки на механические свойства сварных соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой

Скорость сварки $V_{св}$ , м/с	$\sigma_{в.св}$ , МПа	$KCU$ , кДж/м <sup>2</sup>	Угол изгиба $\alpha$ , градус
0,016	315	321	103
0,025	325	323	118
0,033	350	305	127

### Заключения

Проведенные исследования показали.

1. Наиболее высокой стойкостью к образованию горячих трещин обладают сварные соединения сплава В-1579, выполненные с присадками Св-АМг5, Св-АМг61 и Св-1597.

2. Формирование сварных соединений сплава В-1579 происходит без дефектов, если сварку проводили не позднее чем через 1 сут после химического травления. Применение шабрения кромок непосредственно перед сваркой позволяет увеличить промежуток между операциями травления и сварки до 5 сут.

3. Использование проволоки Св-1597 при ААРДЭС обеспечивает получение более мелко-

зернистой структуры сварного шва и повышение прочности сварного соединения (до  $0,9\sigma_B$ ) по сравнению с присадкой Св-АМг6.

4. Применение присадочных материалов при лазерной сварке сплава В-1579 позволяет исключить подрезы и получать швы с большей величиной проплава и усиления и повысить уровень прочности до  $0,95\sigma_B$ . Применение присадки Св-АМг5 вместо присадки Св-АМг61 позволяет повысить ударную вязкость сварных соединений сплава В-1579 до 24%.

5. Электронно-лучевая сварка позволяет получать сварные соединения с прочностью  $(0,7-0,8)\sigma_B$  в сочетании с высокими показателями ударной вязкости и пластичности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 157–167.
2. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе // *Цветные металлы*. 2016. №8 (884). С. 86–91.
3. Клочков Г.Г., Овчинников В.В., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Структура и свойства листов из высокотехнологичного сплава В-1341 системы Al–Mg–Si // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2017. №12 (60). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-3-3.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №S2. С. 3–10.
5. Скупов А.А., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д. Новые присадочные материалы для сварки высокопрочных алюминий-литиевых сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2016. №9. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-4-4.
6. Kablov E.N., Lukin V.I., Antipov V.V., Ioda E.N., Panteleev M.D., Skupov A.A. Efficiency of using filler materials in laser welding of high-strength aluminium-lithium alloys // *Welding International*. 2017. Vol. 31. No. 9. P. 717–721.
7. Захаров В.В., Елагин В.И., Филатов Ю.А., Ростова Т.Д. и др. Перспективы применения алюминиевых сплавов со скандием в промышленности // *Технология легких сплавов*. 2006. №4. С. 20–27.
8. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов* / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. М.: МИСИС, 1999. 416 с.
9. Лукин В.И., Филатов Ю.А., Панасюгина Л.И. Особенности сварки алюминиевых сплавов со скандием // *Технология легких сплавов*. 1997. №5. С. 10–13.
10. 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: 30.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-5-5.
11. Сплав на основе алюминия: пат. 2576286 Рос. Федерация. №2014119988/02; заявл. 19.05.2014; опубл. 27.02.16, Бюл. №6. 7 с.
12. Лукин В.И., Братухин А.Г., Редчиц В.В. Проблема создания сварных конструкций летательных аппаратов // *Сварочное производство*. 1994. №10. С. 2–5.
13. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 7–17.
14. *Пористость при сварке цветных металлов* / В.В. Редчиц, В.А. Фролов, В.А. Казаков, В.И. Лукин. М.: Технология машиностроения, 2002. 448 с.
15. 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.-технич. журн*. 2017. №7. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-7-7.