

Научная статья

УДК 621.791

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-28-38

ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ЖАРОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В-1213 И 1151

М.Д. Пантелеев¹, А.В. Свиридов¹, А.А. Скупов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Показаны преимущества применения жаропрочных алюминиевых сплавов системы Al–Cu–Mg в элементах фюзеляжа сверхзвуковых самолетов. Проведены всесторонние исследования сварных соединений листовых полуфабрикатов алюминиевых сплавов В-1213 и 1151, полученных лазерной сваркой и сваркой трением с перемешиванием. Выполнены испытания на свариваемость, прочность, пластичность и определена малоцикловая усталость сварных соединений. Представлены результаты испытаний в рамках исследованных диапазонов режимов лазерной сварки и сварки трением с перемешиванием сплавов В-1213 и 1151.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, высокоскоростная сварка трением с перемешиванием, сварные соединения, жаропрочные алюминиевые сплавы, сплав 1151, сплав В-1213

Для цитирования: Пантелеев М.Д., Свиридов А.В., Скупов А.А. Особенности сварки жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151 // Труды ВИАМ. 2022. № 9 (115). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-28-38.

WELDING FEATURES OF HEAT-RESISTANT ALUMINUM ALLOYS V-1213 AND 1151

M.D. Panteleev¹, A.V. Sviridov¹, A.A. Skupov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. It is shown in this work the advantages of using Al–Cu–Mg system heat-resistant aluminum alloys in the fuselage elements of supersonic aircraft. Comprehensive studies of welded joints of aluminum alloys V-1213 and 1151 sheets produced by laser welding and friction stir welding have been carried out. Tests for weldability, strength, plasticity were carried out and low-cycle fatigue of welded joints was determined. The results of tests within the studied ranges of laser welding and friction stir welding modes of alloys V-1213 and 1151 are presented.

Keywords: friction stir welding, high-speed friction stir welding, welded joint, heat-resistant aluminum alloys, alloy 1151, alloy V-1213

For citation: Panteleev M.D., Sviridov A.V., Skupov A.A. Welding features of heat-resistant aluminum alloys, alloy V-1213 and 1151. *Trudy VIAM*, 2022, no. 9 (115), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-28-38.

Введение

Одним из основных приоритетов разработчиков при проектировании сверхзвуковых пассажирских самолетов является обеспечение их надежности и высокой работоспособности. Большинство из существующих жаропрочных сплавов дюралевой группы (Д16, Д16ч., 1163, Д19, АК4, АК4-1 и т. д.) являются трудно свариваемыми

методами сварки плавлением, так как имеют низкую стойкость к образованию горячих трещин, что ограничивает возможности их более широкого применения [1–9].

Алюминиевые сплавы марок В-1213 и 1151 относятся к сплавам нового типа – конструкционным жаропрочным сплавам системы Al–Cu–Mg. Для расширения их внедрения при разработке элементов фюзеляжа сверхзвуковых самолетов возникла необходимость более широкого исследования свариваемости указанных сплавов при сварке трением с перемешиванием (СТП) и лазерной сварке [10–17].

Основными особенностями сверхзвукового пассажирского самолета, влияющими на выбор конструктивной схемы планера, являются повышенная весовая эффективность в сочетании со значительным аэродинамическим температурным нагревом фюзеляжа. В этой связи выбор основного конструкционного материала и сопутствующих технологий его соединения является актуальной задачей при создании нового летательного аппарата. Применение сварки в элементах фюзеляжа сверхзвуковых самолетов из жаропрочных алюминиевых сплавов позволит снизить трудоемкость их изготовления и массу, повысить КИМ, ресурс и надежность, что в итоге заметно повлияет на экономические показатели производства и эксплуатационные расходы изделий новой техники [18–27].

Исследования по определению технических достижений в области технологий сварки жаропрочных алюминиевых сплавов позволили определить основные направления их развития:

- увеличение стойкости к образованию горячих трещин при лазерной или дуговой сварке на высоких скоростях (до 100 м/ч) и импульсном режиме сварки, а также за счет применения присадочного материала, легированного Ag, Sc, Ce, Ti, Zr;
- повышение механических свойств сварных соединений при использовании инструмента с наконечником переменной длины для СТП либо путем импульсного или ультразвукового воздействия;
- управление и контроль теплового режима СТП при предварительном нагреве свариваемых кромок или за счет дополнительного охлаждения сварного шва либо инструмента (газом или жидкостью) с регламентированной скоростью.

Определены следующие технические показатели жаропрочных алюминиевых сплавов: предел прочности, ударная вязкость, пластичность (угол изгиба α). При использовании технологий СТП и лазерной сварки применительно к элементам фюзеляжа из жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151 уровень их свойств следующий: предел прочности $\sigma_b = 410$ МПа; пластичность – угол изгиба $\alpha = 30$ градусов; ударная вязкость 60–80 кДж/м², что соответствует мировому уровню технических показателей.

Материалы и методы

В практике лабораторных экспериментальных исследований для количественной оценки свариваемости применяют методику испытаний по определению горячих трещин при воздействии термического цикла сварки и растягивающей деформации.

Оценку трещиностойкости жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151 проводили по ГОСТ 26389–84 на установке ЛТП1-6 с использованием образцов размером 50×50×2 мм как с присадочным материалом, так и без него. При этом последовательно осуществляли сварку серии образцов с различной скоростью растяжения. Скорость деформации повышали до появления горячих трещин, определяемых визуально, и таким образом определяли критические скорости растяжения ($V_{кр}$, мм/мин).

Работу проводили на листовых полуфабрикатах из алюминиевых сплавов В-1213 и 1151 толщиной 3 и 2 мм соответственно в состоянии Т1. В качестве подготовки поверхности применяли химическое травление, а непосредственно перед сваркой проводили шабрение.

Исследовано влияние параметров режима СТП (скорость вращения инструмента ω , скорость сварки $V_{св}$) на образование стыковых сварных соединений жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151. Параметры режима СТП меняли в следующих пределах: скорость сварки – от 100 до 500 мм/мин; скорость вращения инструмента – от 400 до 1000 об/мин. Результаты исследований показали, что основным дефектом сварного соединения является «тоннельный» дефект, возникающий при значительном увеличении числа оборотов и малых значениях скорости сварки ($\omega \geq 1500$ об/мин, $V_{св} \leq 100$ мм/мин), а также при низких скоростях вращения инструмента и высокой скорости сварки ($\omega \leq 400$ об/мин, $V_{св} \geq 500$ мм/мин).

Кратковременную прочность, статический угол изгиба и ударную вязкость определяли по ГОСТ 6996–66 и ГОСТ 1497–84. Испытания на малоцикловую усталость (МЦУ) проводили на установке Walter Bai LFV-100 по ГОСТ 25.502–79.

В качестве подготовки поверхности под СТП применяли ее химическое травление. Сварку проводили на современной установке FSW-LM-AF25-AB (рис. 1) с использованием серийного инструмента с диаметром заплечика 10 мм. Сварку вели на стальной подкладке без формирующей канавки.



Рис. 1. Установка для сварки трением с перемешиванием FSW-LM-AF25-AB

Лазерную сварку проводили на установке Laser Weld 8R60 (рис. 2) в специальном кондукторе, на медной подкладке с канавкой и отверстиями для подачи защитного газа к обратной стороне шва. Защиту зоны сварки от окисления реализовывали локальной подачей аргона через трубчатое сопло.



Рис. 2. Проведение лазерной сварки листовых заготовок жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151 на роботизированном комплексе Laser Weld 8R60

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

При исследовании технологической свариваемости жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151 установлено, что сплав 1151 менее склонен к образованию дефектов типа пор, трещин и подрезов, а при сварке сплава В-1213 качественный сварной шов невозможно получить без применения присадочных материалов. Так, для сплава 1151 при сварке без присадки значения $V_{кр}$ не превышают 2,7 мм/мин. Применение присадок марок Св-1201 и Св-1177 повышает значения $V_{кр}$ до 4,8 и 5,75 мм/мин соответственно (табл. 1).

Таблица 1

Результаты испытаний на стойкость к образованию горячих трещин сплавов В-1213 и 1151

Сплав	Присадка	$V_{кр}$, мм/мин
В-1213	Без присадки	0,64
	АМг6	1,92
	Св-1177	2,55
	Св-1201	3,4
1151	Без присадки	2,7
	АМг6	3,1
	Св-1177	5,75
	Св-1201	4,8

Испытания сплава В-1213 показали, что критическая скорость деформации при сварке без присадочного материала практически равна нулю. В этой связи данный сплав можно отнести к группе ограниченно свариваемых методами сварки плавлением из-за высокой склонности к образованию горячих трещин. Применение присадочных материалов позволяет повысить значение $V_{кр}$ до 1,92 мм/мин – для присадки марки АМг6 и до 3,4 мм/мин – для присадки марки Св-1201.

В связи со склонностью сплава В-1213 к образованию горячих трещин целесообразно при лазерной сварке применять режимы, обеспечивающие меньшее тепловложение.

Отработаны параметры режимов лазерной сварки (мощность лазерного луча $W_{л}$, скорость сварки $V_{св}$, расфокусировка лазерного луча Δf) стыковых соединений. Установлено, что при мощности излучения менее 1700–2000 Вт и расфокусировке лазерного луча >10 мм наблюдается неполное проплавление свариваемого стыка жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151. Увеличение мощности (>3000 Вт) и расфокусировки лазерного луча (<5 мм) приводит к образованию прожогов и пористости в сварных соединениях. При скорости сварки $<0,02$ м/с наблюдается нестабильное образование сварного соединения, вызванное эффектом накопления тепла в свариваемой заготовке. На высоких скоростях сварки – более 0,05–0,06 м/с – возможно образование пор вследствие высокой скорости кристаллизации сварного шва.

Проведенный по ГОСТ EN 4678–2016 рентгенографический контроль полученных сварных соединений жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151 показал, что дефекты типа пор, трещин и непроваров отсутствуют.

Исследование технологических параметров лазерной сварки осуществляли по режимам, представленным в табл. 2. Проведенный далее визуальный контроль при полном проплавлении свариваемых заготовок показал отсутствие сварочных дефектов (рис. 3).

Таблица 2

**Режимы лазерной сварки листов
из жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151**

Сплав	$W_{л}$, Вт	$V_{св}$, м/с	Δf , мм
В-1213	1700–2800	0,02–0,05	5–10
1151	2000–3000	0,03–0,06	



Рис. 3. Внешний вид сварных соединений из сплавов В-1213 (а) и 1151 (б), выполненных лазерной сваркой

В связи с тем, что сплавы В-1213 и 1151 относятся к одной системе легирования (Al–Cu–Mg) и обладают близкими значениями теплофизических характеристик, диапазоны режимов лазерной сварки также сопоставимы между собой.

В соответствии с отработанными режимами лазерной сварки сплавов В-1213 и 1151 скорректировано значение расфокусировки лазерного луча Δf до 15 мм, что обеспечило более равномерное образование сварного соединения при применении присадочных проволок марок Св-1201 и Св-1177. Лазерную сварку проводили в импульсном режиме при скорости $>0,035$ м/с, пропорционально увеличив при этом мощность луча.

Установлено, что при лазерной сварке сплавов 1151 и В-1213 с присадкой Св-1177 требуется увеличение средней мощности импульсного режима лазерного луча на 5–10 % (при расфокусировке $\Delta f = 15$ мм) по сравнению с использованием присадки Св-1201.

Проведены исследования образцов сварных соединений жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151 на прочность, пластичность и МЦУ. Установлено, что применение для сплава 1151 присадочной проволоки марки Св-1177 (при средней мощности импульсной лазерной сварки $W_{л} \approx 3500$ Вт), в сравнении с присадочной проволокой марки Св-1201 (при $W_{л} \approx 3200$ Вт), позволяет повысить коэффициент разупрочнения с 0,78 до 0,83. При этом значения МЦУ сварных соединений сплава 1151 увеличиваются в 2 раза при сопоставимом уровне пластичности (~30 градусов для сварных соединений, выполненных как с присадкой Св-1177, так и с присадкой Св-1201).

При режиме лазерной сварки сплава В-1213 с присадочной проволокой Св-1177 достигается коэффициент разупрочнения 0,75 при уровне пластичности ~50 градусов и значениях МЦУ: 46200 циклов. Применение присадочной проволоки Св-1201 позволяет повысить не только коэффициент разупрочнения с 0,75 до 0,81, но и пластичность до 54 градусов и МЦУ в 1,8 раза – до 83440 циклов.

Установлено также, что использование присадочной проволоки Св-1177 при режиме лазерной сварки сплава 1151 способствует повышению значений МЦУ сварных соединений в 2 раза по сравнению с показателями данной характеристики при применении присадки Св-1201. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 3.

Таблица 3

Свойства образцов сварных соединений жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151 в поперечном направлении, выполненных лазерной сваркой

Сплав	Присадка	σ_B , МПа*	$\sigma_{B,св}/\sigma_B$	α , градусов*	МЦУ, циклов
1151-T1	Св-1177	$\frac{325-345}{335}$	0,83	$\frac{29-32}{31}$	17750
	Св-1201	$\frac{305-330}{320}$	0,78	$\frac{31-33}{32}$	8820
В-1213-T1	Св-1177	$\frac{345-375}{355}$	0,75	$\frac{46-53}{50}$	46200
	Св-1201	$\frac{340-470}{385}$	0,81	$\frac{51-57}{54}$	83440

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Проведено исследование влияния режимов СТП на механические характеристики сварных соединений жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151. Исследованы следующие режимы:

– для сплава 1151: скорость сварки $V_{св}$ – до 500 мм/мин; скорость вращения инструмента ω – до 1000 об/мин;

– для сплава В-1213: $V_{св}$ – до 400 мм/мин; ω – до 700 об/мин.

Для оценки режимов по степени тепловложения в свариваемый металл применен коэффициент тепловложения (K_T), равный отношению скорости вращения инструмента к скорости сварки.

При СТП листов из жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151 отработаны диапазоны режимов (табл. 4), обеспечивающие полный провар свариваемых заготовок при отсутствии сварочных дефектов как при визуальном контроле изломов сварных швов (рис. 4), так и при рентгенографическом контроле.

Таблица 4

Режимы сварки трением с перемешиванием листов из жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151

Сплав	ω , об/мин	$V_{св}$, мм/мин
В-1213	До 800	До 400
1151	До 1000	До 500

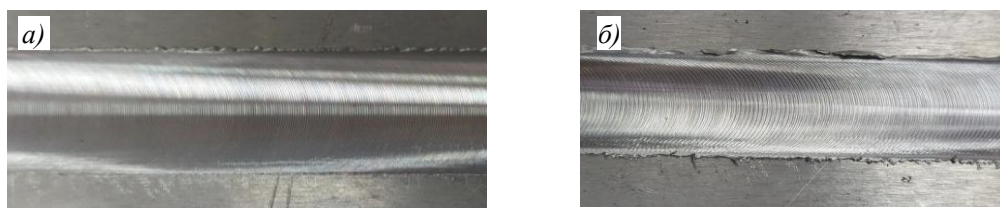


Рис. 4. Внешний вид сварных соединений из сплавов В-1213 (а) и 1151 (б), выполненных сваркой трением с перемешиванием

Проведены также исследования образцов на прочность, пластичность (по статическому углу изгиба) и определена МЦУ сварных соединений жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151, выполненных по режимам СТП. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 5.

Свойства образцов сварных соединений жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151 в поперечном направлении, выполненных сваркой трением с перемешиванием

Сплав	Коэффициент тепловложения K_T , об/мм	σ_B , МПа*	$\sigma_{B.св}/\sigma_B$	α , градусов*	МЦУ, циклов
1151-T1	2,6	$\frac{405-410}{410}$	0,99	$\frac{72-78}{76}$	224460
	2,25	$\frac{405-405}{405}$	0,99	$\frac{69-84}{74}$	47710
В-1213-T1	3	$\frac{365-405}{380}$	0,80	$\frac{61-65}{63}$	198050
	2,3	$\frac{375-385}{380}$	0,80	$\frac{62-66}{64}$	134800

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Установлено, что при СТП сплава 1151 удалось достичь равнопрочности сварных соединений и основного металла на режимах с K_T от 2,25 до 2,6 об/мм при сопоставимом уровне пластичности. При этом режим СТП с $K_T = 2,6$ об/мм позволяет повысить значения МЦУ сварных соединений жаропрочного алюминиевого сплава 1151 в 4,7 раза – до 224460 циклов.

При режиме СТП сплава В-1213 с K_T от 2,3 до 3 об/мм достигается коэффициент разупрочнения 0,8 при пластичности >60 градусов. Режим СТП с $K_T = 3$ об/мм способствует повышению значений МЦУ сварных соединений жаропрочного алюминиевого сплава В-1213 в 1,4 раза – до 198050 циклов.

При определении МЦУ установлено, что применение присадочной проволоки марки Св-1201 при лазерной сварке сплава В-1213 позволяет повысить значения МЦУ в 1,8 раза. Использование присадочной проволоки марки Св-1177 при лазерной сварке сплава 1151 также повышает МЦУ (в 2 раза). Этот результат коррелирует с результатами, полученными при исследовании свариваемости, и связан с более высокой стойкостью к образованию горячих трещин сварных соединений сплава 1151 с присадкой Св-1177, а сплава В-1213 – с присадкой Св-1201, когда кристаллизационные трещины более эффективно подавляются за счет металлургического влияния присадочного материала.

Установлено также, что сварные соединения жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151, выполненные СТП, значительно превосходят по значениям МЦУ сварные соединения, выполненные лазерной сваркой (наиболее высокое значение МЦУ сварных соединений сплава 1151, выполненных лазерной сваркой, составляет 17750 циклов, выполненных СТП: 224460 циклов), что обусловлено отсутствием характерных для сварки плавлением микрорыхлот (оплавлений по границам зерен – зародышей кристаллизационных трещин), а также более чистой поверхностью сварных соединений. Поэтому для повышения ресурса конструкций целесообразно применение зачистки сварных соединений, выполненных такой сваркой, от таких концентраторов напряжений, как проплавы, усиление сварного шва и «чешуйчатость» лицевой поверхности.

Заключения

Проведены исследования технологической свариваемости жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151, влияющей на качество образования сварных соединений, выполненных без присадочного материала (ГОСТ 14806–80), и их дефектность (ГОСТ 30242–97). Установлено, что сплав 1151 менее склонен к поро- и трещинообразованию. В случае же сварки сплава В-1213 качественное образование сварных соединений невозможно без применения присадочной проволоки.

Оценена стойкость жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151 к образованию горячих трещин. Установлено, что из-за высокой склонности к их образованию сплав В-1213 относится к группе ограниченно свариваемых сплавов. Применение присадочных проволок позволяет повысить $V_{кр}$ до 1,92 мм/мин – для присадки марки АМг6 и до 3,4 мм/мин – для присадки марки Св-1201. Сплав 1151 имеет удовлетворительную стойкость к образованию горячих трещин при сварке без присадки, значения $V_{кр}$ не превышают 2,7 мм/мин. Применение присадочных проволок марок Св-1201 и Св-1177 увеличивает значения $V_{кр}$ до 4,8 и 5,75 мм/мин соответственно.

Исследование влияния режимов лазерной сварки на формирование сварных соединений жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151 показало, что при мощности излучения менее 1700–2000 Вт и расфокусировке лазерного луча >10 мм наблюдается неполное проплавление свариваемого стыка. Увеличение мощности (>3000 Вт) и расфокусировки лазерного луча (<5 мм) приводит к формированию прожогов и пористости в сварных соединениях. При скорости сварки $<0,02$ м/с наблюдается нестабильное образование сварного соединения, вызванное эффектом накопления тепла в свариваемой заготовке. При скорости сварки более 0,05–0,06 м/с возможно образование пор из-за высокой скорости кристаллизации сварного шва.

Результаты исследования влияния параметров режима СТП на образование сварных соединений жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151 свидетельствуют о том, что «тоннельный» дефект возникает при скорости вращения инструмента ≥ 1500 и ≤ 400 об/мин соответственно. При $V_{св}$ от 100 до 500 мм/мин и ω от 400 до 1000 об/мин достигается образование сварного шва без дефектов.

По результатам выполненных исследований отработаны диапазоны режимов лазерной сварки и СТП, обеспечивающие допустимое образование шва при полном проплавлении свариваемых заготовок.

Проведено также исследование влияния режимов лазерной сварки и СТП на механические свойства сварных соединений жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151. Установлено, что при лазерной сварке данных сплавов с присадкой марки Св-1177 требуется увеличение мощности луча на 5–10 % по сравнению со сваркой с присадкой марки Св-1201. Кроме того, применение режима лазерной сварки сплава 1151 с присадкой Св-1177 позволяет повысить коэффициент разупрочнения до 0,83, а присадка Св-1201 при лазерной сварке сплава В-1213 способствует повышению не только коэффициента разупрочнения с 0,75 до 0,81, но и пластичности до $\alpha = 54$ градусов.

Следует отметить, что при СТП сплава 1151 удалось достичь равнопрочности сварных соединений и основного металла на режимах с K_T от 2,25 до 2,6 об/мм при сопоставимом уровне пластичности. При данной сварке сплава В-1213 на режимах с K_T от 2,3 до 3 об/мм прочность сварных соединений достигает уровня 0,8 от прочности основного металла при значении пластичности >60 градусов.

Установлено также, что сварные соединения жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151, выполненные СТП, значительно превосходят по значениям МЦУ сварные соединения при лазерной сварке. Наиболее высокое значение данной характеристики сварных соединений сплава 1151, выполненных лазерной сваркой, составляет 17750 циклов, выполненных СТП: 224460 циклов. Этот результат коррелирует с результатами, полученными при исследовании свариваемости, и связан с более высокой стойкостью к образованию горячих трещин сварных соединений сплава 1151 с присадкой Св-1177, а сплава В-1213 – с присадкой Св-1201, когда кристаллизационные трещины эффективнее подавляются за счет металлургического влияния присадочного материала. Более высокие значения МЦУ при СТП обусловлены отсутствием характерных для сварки плавлением зародышей кристаллизационных трещин, а также более чистой поверхностью сварных соединений.

Список источников

1. Фридляндер И.Н. Воспоминания о создании авиакосмической и атомной техники из алюминиевых сплавов. М.: Наука, 2005. 277 с.
2. Каблов Е.Н., Кутырев А.Е., Вдовин А.И., Козлов И.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование возможности возникновения контактной коррозии в паяных соединениях, используемых в конструкции двигателей авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 31.05.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
3. Congqing L., Guohong L. Development of friction stir welding technology for aircraft structures in China // *10th International Symposium on Friction Stir Welding*. Beijing. 2014. Vol. 2. P. 892–899.
4. Каблов Е.Н., Белов Е.В., Трапезников А.В., Леонов А.А., Зайцев Д.В. Особенности упрочнения и кинетика старения литейного алюминиевого высокопрочного сплава на основе системы Al–Si–Cu–Mg // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 31.05.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
5. Giummarra C., Yocum L. New Developments in Extruded Integrally Stiffened Panels // *Proceedings of 17th AeroMat Conference & Exposition*. Seattle, 2006. May.
6. 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 выставки «Алюминий-21. Сварка и пайка». СПб.: Алюсил-МВиТ, 2012. Ст. 8.
7. Денисов Б.С., Мейлах А.И. Сварка в самолетостроении. Сварные конструкции МИГов. М.: Русавиа, 2007. 358 с.
8. Курицына В.В., Курицын Д.Н., Косов Д.Е. Автоматизированная система обработки экспертных оценок при принятии технологических решений // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2012. Т. 8. № 4. С. 44–55.
9. Пантелеев М.Д., Свиридов А.В., Скупов А.А., Одинцов Н.С. Освоение перспективных технологий сварки высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 применительно к элементам фюзеляжа // *Труды ВИАМ*. 2020. № 12 (94). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-35-46.
10. Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211.
11. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
12. Бойцов А.Г., Люшинский А.В., Баранов А.А. Сварка трением перемешиванием корпусных деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов // *Авиакосмическое приборостроение*. 2015. № 7. С. 3–11.
13. Бойцов А.Г., Качко В.В., Курицын Д.Н. Сварка трением перемешиванием // *РИТМ (Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация)*. 2013. № 10 (88). С. 40–44.
14. Дуюнова В.А., Волкова Е.Ф., Уридия З.П., Трапезников А.В. Динамика развития магниевых и литейных алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 225–241. DOI: 10.1857/2071-9740-0-S-225-241.
15. Лукин В.И., Иода Е.Н., Базескин А.В., Лавренчук В.П., Котельникова Л.В., Оглодков М.С. Повышение надежности сварных соединений из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1461 // *Сварочное производство*. 2010. № 11. С. 14–17.
16. Prasad N.E., Gokhale A.A., Wanhill R.J.H. *Aluminum-Lithium Alloys. Processing, Properties, and Applications*. Elsevier Inc., 2014. 571 p.
17. 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*. 2017. № 7 (55). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-61-68.
18. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing // *Journal Material Science Engineering*. R. 2005. Vol. 50. P. 1–78.

19. Покляцкий А.Г., Кныш В.В., Ключков И.Н., Мотрунич С.И. Особенности и преимущества процесса сварки трением с перемешиванием стыковых соединений тонколистовых алюминий-литиевых сплавов // Автоматическая сварка. 2016. № 5. С. 93–98. DOI: 10.15407/as2016.06.15.
20. Качко В.В., Курицын Д.Н., Бойцов А.Г. Влияние технологических факторов высокоскоростной перемешивающей сварки трением на качество получаемых соединений // Вестник МАТИ. 2012. Вып. 19 (91). С. 156–162.
21. 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. 2017. № 12 (60). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-2-2.
22. Попович А.А., Панченко О.В., Наумов А.А., Свиридов А.В., Скупов А.А., Сбитнева С.В. Сварка трением с перемешиванием алюминий-литиевого сплава В-1469-Т // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 11–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-11-17.
23. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. М.: Мир, 1972. 408 с.
24. Хейвуд Р.Б. Проектирование с учетом усталости. М.: Машиностроение, 1969. 503 с.
25. Chang B., Allen C., Blackburn J., Hilton P. Thermal and fluid flow characteristics and their relationships with porosity in laser welding of AA5083 // Physics Procedia. 2013. Vol. 41. P. 478–487.
26. Способ лазерной сварки трением с перемешиванием: пат. 2271908 Рос. Федерация; заявл. 19.07.01; опубл. 20.03.06.
27. Близнюк В., Васильев Л., Вуль В. и др. Правда о сверхзвуковых пассажирских самолетах. М.: Московский рабочий, 2000. 335 с.

References

1. Friedlander I.N. *Memories of the creation of aerospace and atomic technique from aluminum alloys*. Moscow: Nauka, 2005, 277 p.
2. Kablov E.N., Kutyrev A.E., Vdovin A.I., Kozlov I.A., Afanasyev-Khodykin A.N. The research of possibility of galvanic corrosion in brazed connections used in aviation engine construction. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 31, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
3. Congqing L., Guohong L. Development of Friction Stir Welding Technology for Aircraft Structures in China. *10th International Symposium on Friction Stir Welding*. Beijing, 2014, vol. 2, pp. 892–899.
4. Kablov E.N., Belov E.V., Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Zaitsev D.V. Strengthening features and aging kinetics of high-strength cast aluminum alloy AL4MS based on Al–Si–Cu–Mg system. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 31, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
5. Giummarra C., Yocum L. New Developments in Extruded Integrally Stiffened Panels. *Proceedings of 17th AeroMat Conference & Exposition*. Seattle, 2006. May.
6. Kablov E.N., Lukin V.I., Ospennikova O.G. Promising aluminum alloys and technologies for their compounds for products of aerospace technology. *Reports of 2nd Intern. conf. and exhibitions "Aluminum-21. Welding and soldering"*. St. Petersburg: Alusil-MVIt, 2012, art. 8.
7. Denisov B.S., Meilah A.I. *Welding in aircraft construction. Welded structures of MIGs*. Moscow: Rusavia, 2007. 358 p.
8. Kuritsyna V.V., Kuritsyn D.N., Kosov D.E. Automated system for processing expert assessments when making technological solutions. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*, 2012, vol. 8, no. 4, pp. 44–55.
9. Panteleev M.D., Sviridov A.V., Skupov A.A., Odintsov N.S. Perspective welding technologies of aluminum-lithium alloy V-1469 applied to fuselage panels. *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 5, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-35-46.
10. Antipov V.V., Klochkova Yu.Yu., Romanenko V.A. Modern aluminum and aluminum-lithium alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 195–211. DOI: 10.18577/2107-9140-2017-0-S-195-211.
11. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of materials of the new generation. *Reports of XXI Mendeleev Congress for General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, pp. 24.

12. Boytsov A.G., Lushinsky A.V., Baranov A.A. Welding with friction mixing of hull parts from high-strength aluminum alloys. *Aviakosmicheskoe priborostroyenie*, 2015, no. 7, pp. 3–11.
13. Boytsov A.G., Kachko V.V., Kuritsyn D.N. Welding with friction mixing. *RITM (Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya)*, 2013, no. 10 (88), pp. 40–44.
14. Duyunova V.A., Volkova E.F., Uridiya Z.P., Trapeznikov A.V. Dynamics of the development of magnesium and cast aluminum alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 225–241. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-225-241.
15. Lukin V.I., Ioda E.N., Bazeskin A.V., Lavrenchuk V.P., Kotelnikova L.V., Oglodkov M.S. Improving the reliability of welded joints from high-strength aluminum-foilage alloy V-1461. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2010, no. 11, pp. 14–17.
16. Prasad N.E., Gokhale A.A., Wanhill R.J.H. *Aluminum-Lithium Alloys. Processing, Properties, and Applications*. Elsevier Inc., 2014, 571 p.
17. Skupov A.A., Pantelev M.D., Ioda E.N. Microstructure and mechanical properties of V-1579 and V-1481 laser welds. *Trudy VIAM*, 2017, no. 7 (55), paper no. 7. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 21, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-7-7.
18. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction Stir Welding and Processing. *Journal Material Science Engineering, R*, 2005, vol. 50, pp. 1–78.
19. Loklyatsky A.G., Knysh V.V., Klochkov I.N., Motorunich S.I. Features and advantages of the process of welding with friction with mixing the butt joints of thin-leaf aluminum-lithium alloys. *Avtomaticheskaya svarka*, 2016, no. 5, pp. 93–98. DOI: 10.15407/AS2016.06.15.
20. Kachko V.V., Kuritsyn D.N., Boytsov A.G. The influence of technological factors of high-speed mixing welding with friction on the quality of the received compounds. *Vestnik MATI*, 2012, is. 19 (91), pp. 156–162.
21. Lukin V.I., Kulik V.I., Betsofen S.Ya., Lukina E.A., Sharov A.V., Panteleyev M.D., Samorukov M.L. Friction stir welding of high-strength aluminum-lithium V-1469 alloy semiproducts. *Trudy VIAM*, 2017, no. 12 (60), paper no. 2. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 20, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-2-2.
22. Popovich A.A., Panchenko O.V., Naumov A.A., Sviridov A.V., Skupov A.A., Sbitneva S.V. Friction stir welding of aluminum-lithium alloy V-1469-T. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 11–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-11-17.
23. Honyb R. *Plastic deformation of metals*. Moscow: Mir, 1972, 408 p.
24. Haywood R.B. *Design taking into account fatigue*. Moscow: Mashinostroyenie, 1969, 503 p.
25. Chang B., Allen C., Blackburn J., Hilton P. Thermal and Fluid Flow Characteristics and Their Relationships with Porosity in Laser Welding of AA5083. *Physics Procedia*, 2013, vol. 41, pp. 478–487.
26. *Method of laser welding with friction with mixing*: pat. 2271908 Rus. Federation; filed 19.07.01; publ. 20.03.06.
27. Bliznyuk V., Vasiliev L., Vul V. et al. *The truth is about supersonic passenger aircraft*. Moscow: Moskovskiy rabochiy, 2000, 335 p.

Информация об авторах

Пантелеев Михаил Дмитриевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Скупов Алексей Алексеевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Свиридов Александр Владимирович, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Mikhail D. Pantelev, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey A. Skupov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander V. Sviridov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 30.06.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.08.2022.

The article was submitted 30.06.2022; approved and accepted for publication after reviewing 10.08.2022.