

Научная статья

УДК 669.018.292

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-33-42

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЕ СВАРНЫХ ПАНЕЛЕЙ ФЮЗЕЛЯЖА ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ 1151 И В-1213

В.В. Антипов<sup>1</sup>, М.Д. Пантелеев<sup>1</sup>, А.В. Свиридов<sup>1</sup>, А.А. Скупов<sup>1</sup>, Н.С. Одинцов<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Проведены исследования сварных соединений листов из жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151. Соединения выполняли по отработанным режимам на комплексе лазерной сварки Laser Weld 8R60. Приведены свойства сварных соединений, в том числе после одной и двух подварок. Исследован уровень прочности сварных конструктивно-подобных элементов фюзеляжа с непрерывным и прерывистыми несимметричным и симметричным швами. Приведены результаты испытаний сварных стрингерных панелей с определением несущей способности при сдвиге.

**Ключевые слова:** лазерная сварка, панель фюзеляжа, алюминиевый сплав, микроструктура, механические свойства

**Для цитирования:** Антипов В.В., Пантелеев М.Д., Свиридов А.В., Скупов А.А., Одинцов Н.С. Изготовление и испытание сварных панелей фюзеляжа из жаропрочных алюминиевых сплавов 1151 и В-1213 // Труды ВИАМ. 2023. № 5 (123). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-33-42.

Scientific article

## HEAT-RESISTANT ALUMINUM ALLOYS 1151 AND В-1213 WELDED FUSELAGE PANELS FABRICATION AND TESTING

V.V. Antipov<sup>1</sup>, M.D. Pantelev<sup>1</sup>, A.V. Sviridov<sup>1</sup>, A.A. Skupov<sup>1</sup>, N.S. Odintsov<sup>1</sup>

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

**Abstract.** The welded joints heat-resistant aluminum alloys V-1213 and 1151 were researched. The welded joints were performed according to the tested modes on the Laser Weld 8R60 laser welding complex. The properties joints, provided within ones and twice welding were given. The strength level of welded fuselage elements with an intermittent asymmetrical seam; with an intermittent symmetrical seam, with a continuous seam is investigated. The tests results of welded stringer panels with the bearing capacity determination during shear are presented.

**Keywords:** laser welding, heat-resistant, aluminum alloy, microstructure, mechanical properties

**For citation:** Antipov V.V., Pantelev M.D., Sviridov A.V., Skupov A.A., Odintsov N.S. Heat-resistant aluminum alloys 1151 and В-1213 welded fuselage panels fabrication and testing. *Trudy VIAM*, 2023, no. 5 (123), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-33-42.

### Введение

Выбор конструкционного материала при создании нового самолета является наиболее приоритетной задачей. С начала 1960-х гг. в авиастроении широко использовали

алюминиевый сплав типа Д16 и дальнейшие его модификации марок Д16ч. и 1163 с более жесткими ограничениями по содержанию примесей, скорректированным соотношением легирующих компонентов (Cu, Mg, Mn) и, соответственно, более высокой выносливостью и трещиностойкостью.

Однако уже на самых ранних этапах работы над проектом сверхзвуковых самолетов стало ясно, что создавать высокоресурсные конструкции, надежно работающие при повышенных температурах, можно только при переходе на другие конструкционные материалы, обеспечивающие длительную прочность при одновременном воздействии механических и температурных напряжений [1–4].

Основные особенности сверхзвукового пассажирского самолета, предопределяющие конструктивно-силовую схему планера, состоят в следующем:

- необычная аэродинамическая схема самолета – тонкое треугольное крыло и длинный, относительно тонкий фюзеляж;
- наличие аэродинамического температурного нагрева фюзеляжа;
- повышенные требования по весовой эффективности самолета;
- конструкция должна обеспечивать эксплуатацию самолета при достаточно больших проектных ресурсах.

Для сверхзвукового пассажирского самолета, эксплуатируемого длительно (в течение 30000 летных часов) при температурах нагрева конструкции до 120–160 °С, с учетом обеспечения его высокой весовой эффективности, вопрос выбора материала конструкции является самым важным. При создании самолета Ту-144 генеральный конструктор А.Н. Туполев лично занимался этой проблемой, уделяя много внимания конструкционным материалам, применяемым на этом самолете [5]. После интенсивных научно-исследовательских работ было принято решение сосредоточить усилия материаловедов на модификации алюминиевых теплостойких сплавов, которые применялись в двигателестроении для изготовления штампованных деталей [6].

При полете летательных аппаратов со сверхзвуковой скоростью повышается температура вблизи поверхности конструкции, а аэродинамический нагрев приводит к повышению температуры обшивки и всей конструкции (рис. 1). При этом температура внешнего слоя воздуха у обшивки является функцией от высоты и скорости полета самолета.

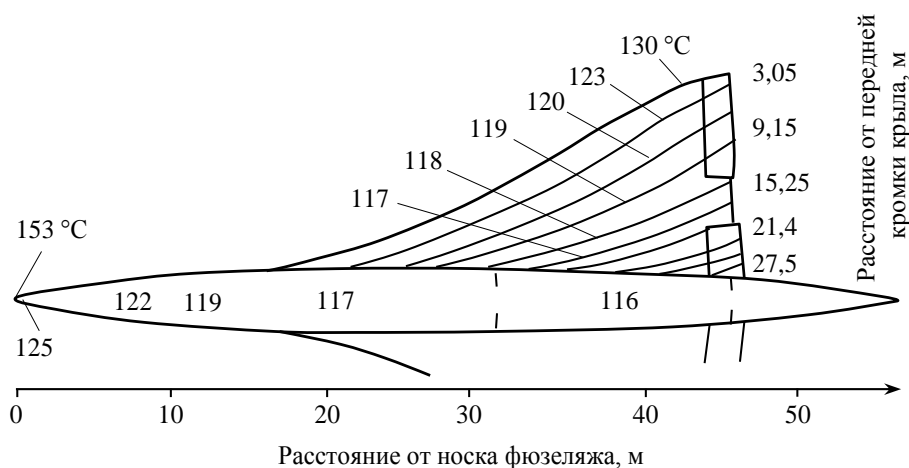


Рис. 1. Распределение температуры на верхней поверхности самолета «Конкорд» при скорости полета 2,2 Маха на высоте 18,25 км

Первыми сверхзвуковыми пассажирскими летательными аппаратами являются самолеты «Конкорд» и отличающийся от них оптимизированной конструктивно-силовой схемой самолет Ту-144, дальнейшим развитием которых может стать перспективный сверхзвуковой пассажирский самолет. Для достижения максимальных показателей по весовой эффективности для такого самолета помимо перспективных материалов требуются современные технологии создания неразъемных соединений из этих материалов. Известно, что сварка является наиболее эффективным способом соединения заготовок и элементов конструкций [7–9].

Конструкционные алюминиевые сплавы системы Al–Cu–Mg, являющейся базисной композицией жаропрочных алюминиевых сплавов успешно применяются в узлах и деталях, работающих при повышенных температурах и нагрузках, и обладают комплексом свойств, выгодно отличающих их от других сплавов дюралевой группы. К таким материалам относится сплав марки 1151, разработанный специалистами НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (далее – ВИАМ), композиция которого основана на эквивалентном содержании меди и магния, обеспечивающих выделение диффузно-подвижной упрочняющей фазы S (Al<sub>2</sub>CuMg). Особенность легирования сплава 1151 препятствует образованию внутренних напряжений в конструкциях при эксплуатации в связи с отсутствием процессов естественного старения. В ВИАМ разработан также сплав марки В-1213, легированный серебром, в котором при искусственном старении образуются выделения Ω'-фазы, повышающей прочностные характеристики и способствующей увеличению жаропрочности, вязкости разрушения и др. [10–16]. В то же время низкая стойкость к образованию горячих трещин сплавов этой системы обуславливает их ограниченную применяемость в сварных конструкциях.

Опыт специалистов ВИАМ в области технологий сварки показал, что повышенные эксплуатационные характеристики соединений, изготовленных сваркой плавлением, возможно благодаря использованию наиболее энергоэффективных лучевых методов сварки, таких как лазерная. Высокая концентрация энергии и небольшое пятно нагрева, а также значительно меньшая зона термического влияния дают возможность улучшить свойства соединений [17, 18].

Таким образом, при разработке элементов фюзеляжа новых сверхзвуковых самолетов изучение особенностей лазерной сварки сплавов марок 1151 и В-1213 представляется актуальной задачей.

### Материалы и методы

В данной работе проведены исследования стыковых и тавровых сварных соединений листов из сплавов 1151 и В-1213 с применением присадочных проволок марок Св-1201 (Al–Cu) и Св-1177 (Al–Cu–Mg). Соединения выполняли на роботизированном комплексе лазерной сварки Laser Weld 8R60.

Повторные проходы лазерной сварки выполняли по уже выполненному шву с дефектом типа непровара, при этом увеличивали среднюю мощность излучения на 10 % для компенсации увеличившейся толщины шва. Повторные проходы лазерной сварки также проводили после полного остывания заготовки.

Совместно с конструкторами ПАО «Туполев» с учетом существующей конструкции фюзеляжа самолета Ту-144 разработаны чертежи сварных конструктивно-подобных образцов (КПО) элементов фюзеляжа, предназначенных для статических и усталостных испытаний. Анализ конструкции показал, что клепаное соединение потенциально возможно заменить лазерной сваркой в месте крепления стрингера к обшивке на панелях фюзеляжа. Исследование влияния конфигурации приварки стрингера к обшивке из жаропрочных алюминиевых сплавов 1151 и В-1213 проводили на сварных КПО размером 100×340 мм (табл. 1).

Эскизы конструктивно-подобных образцов (КПО), выполненных лазерной сваркой

Эскиз КПО	Наименование КПО
<i>Сварные плоские КПО со стрингером</i>	
	КПО со стрингером, приваренным прерывистым несимметричным швом
	КПО со стрингером, приваренным прерывистым симметричным швом
	КПО со стрингером, приваренным непрерывным швом
<i>Сварные КПО стрингерных панелей</i>	
	КПО стрингерной панели, выполненный прерывистым несимметричным швом
	КПО стрингерной панели, выполненный прерывистым симметричным швом
	КПО стрингерной панели, выполненный непрерывным швом

При лазерной сварке для обеспечения зазора в стыке не более 0,1 мм торец ножки стрингера подвергали фрезеровке. Сборку КПО проводили с помощью универсальной оснастки и прихваток, выполненных лазерной сваркой (рис. 2) на установке Laser Weld 8R60. Соединение усиливающих рамок выполняли контактной точечной сваркой.

Подготовка поверхности свариваемых деталей (стрингеров и основания панели) заключалась в проведении химического травления по ПИ 1.2.616–2003.

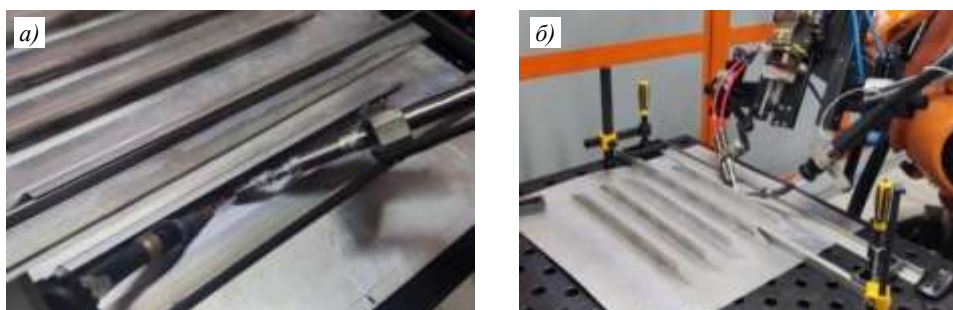


Рис. 2. Расстановка прихваток (а) и общий вид конструктивно-подобных образцов стрингерных панелей на роботизированном комплексе Laser Weld 8R60 (б)

Проведен визуальный и рентгенографический контроль сварных соединений, показавший отсутствие недопустимых дефектов сварных соединений при лазерной сварке по ГОСТ ISO 13919-2–2017. После осуществления рентгенографического контроля проведена последующая механическая обработка КПО.

Испытания плоских КПО на кратковременную прочность проводили по методике из ГОСТ 6996–66 с определением максимальной нагрузки и напряжения.

Испытания КПО стрингерных панелей осуществляли в шарнирной раме, обеспечивающей по всем кромкам равномерное распределение касательных усилий (рис. 3).



Рис. 3. Проведение испытаний сварных стрингерных панелей фюзеляжа

Статические испытания каждого типа КПО стрингерных панелей (по каждому из трех типов сварного шва, выполненного лазерной сваркой) проводили при одноосном растяжении до потери несущей способности с определением максимальной нагрузки  $P_{max}$  при скорости перемещения активного захвата 1–10 мм/мин.

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

### Результаты и обсуждение

Исследованы образцы сварных соединений и определены характеристики прочности, пластичности и малоциклового усталости (МЦУ).

Соединения из сплава 1151, выполненные с присадкой Св-1177 (в сравнении с присадкой Св-1201), обладают прочностью сварных соединений до 0,83 от прочности основного металла и пластичностью ~30 г.

Соединения из сплава В-1213, выполненные с присадкой Св-1201 (в сравнении с присадкой Св-1177) обладают прочностью сварных соединений до 0,81 от прочности основного металла и пластичностью ~50 г (табл. 2).

Таблица 2

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

Сплав	Присадка	$\sigma_{в}$ , МПа	$\sigma_{в,св}/\sigma_{в}$	$\alpha$ , 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.

Важнейшей ресурсной характеристикой сварных соединений является МЦУ, оценка которой проведена при лазерной сварке.

Сварные соединения из сплава В-1213, выполненные с присадкой Св-1201, достигают значений МЦУ: 83400 циклов. Соединения сплава 1151, выполненные с присадкой Св-1177, выдерживают всего 17750 циклов, что связано с результатами исследования свариваемости этих сплавов (табл. 3).

Таблица 3

**Стойкость к образованию горячих трещин по ГОСТ 26389–84 для сплавов В-1213 и 1151**

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

При проведении повторных проходов оценивали ремонтпригодность при лазерной сварке и их влияние на характеристики сварных соединений (табл. 4).

Результаты проведенных испытаний позволили установить, что второй проход снижает прочность соединений сплава 1151 на 8 % за счет повторного термического цикла сварки. Пластичность после второго прохода повышается на 19 % при двукратном снижении значений МЦУ (табл. 2), что связано с уширением сварного шва. Третий проход дополнительно разупрочняет соединение на 7 % при повышении пластичности на 14 %, при этом снижение значений МЦУ составляет ~20 %.

Таблица 4

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

Сплав	Присадка	Количество проходов	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{св.}/\sigma_b$	$\alpha$ , градусов	МЦУ, циклов
1151-T1	Св-1177	2 (одна подварка)	$\frac{295-320}{310}$	0,75	$\frac{35-39}{37}$	9377
		3 (две подварки)	$\frac{275-310}{290}$	0,7	$\frac{39-45}{42}$	7730
В-1213-T1	Св-1201	2 (одна подварка)	$\frac{340-380}{355}$	0,75	$\frac{30-34}{32}$	154953
		3 (две подварки)	$\frac{315-330}{325}$	0,68	$\frac{30-36}{33}$	19900

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

Два прохода лазерной сваркой сплава В-1213 снижает прочность сварных соединений на 8 % и пластичность – на 68 %. Применение зачистки шва повышает МЦУ в 2 раза. Третий проход разупрочняет соединение на 9 % при том же уровне пластичности.

Необходимо отметить значительное снижение как значений МЦУ, так и прочности сварных соединений после третьего прохода лазерной сваркой. Поэтому при разработке технологий и проведении лазерной сварки не следует применять более одной ремонтной подварки для ресурсных конструкций.

Результаты проведенных исследований позволили разработать технологии лазерной сварки применительно к элементам фюзеляжа, обеспечивающие для жаропрочного

сплава 1151 прочность 0,83 от прочности основного металла, а для жаропрочного сплава В-1213 – прочность 0,81 от прочности основного металла. По разработанным технологиям изготовлены сварные КПО с различными вариантами соединения стрингеров с обшивкой, а именно: с непрерывным и прерывистыми несимметричным и симметричным швами.

Результаты испытаний на кратковременную прочность и МЦУ плоских сварных КПО со стрингером представлены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

**Кратковременная прочность (средние значения) различных типов плоских сварных конструктивно-подобных образцов со стрингером, выполненных лазерной сваркой, из жаропрочных алюминиевых сплавов 1151 и В-1213**

Тип шва	$\sigma_b$ , МПа, для сплава	
	1151	В-1213
Прерывистый несимметричный	355	385
Прерывистый симметричный	370	405
Непрерывный	330	360

Анализ результатов испытаний показал, что максимальная кратковременная прочность сварных соединений для обоих исследуемых материалов достигается для варианта прерывистого симметричного шва, а минимальная – для непрерывного шва. Снижение прочности для сплошного шва связано с большим тепловложением в сравнении с прерывистыми схемами приварки стрингера.

Проведены испытания на растяжение сварных стрингерных панелей из жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151, выполненных лазерной сваркой. Испытания каждой стрингерной панели при растяжении позволили определить максимальную нагрузку до потери несущей способности ( $P_{max}$ ) для каждого типа КПО (табл. 6).

Таблица 6

**Нагрузка при потере устойчивости и наработка до разрушения сварных конструктивно-подобных образцов стрингерных панелей, выполненных лазерной сваркой, из жаропрочных алюминиевых сплавов 1151 и В-1213**

Тип шва	Нагрузка при потере устойчивости $P_{max}$ , кН, для сплава	
	1151	В-1213
Прерывистый несимметричный	70,1	–
Прерывистый симметричный	91,1	–
Непрерывный	121,4	82,1

Установлено, что наибольшую нагрузку способны выдерживать панели из сплава 1151, выполненные лазерной сваркой непрерывным швом: 121,4 кН.

### Заключения

Проектирование перспективного сверхзвукового пассажирского самолета невозможно без применения новых материалов и современных технологий сварки, таких как лазерная сварка, которую можно использовать при изготовлении сварных конструкций изделий авиационной техники из жаропрочных алюминиевых сплавов системы Al–Cu–Mg.

Применение присадки Св-1177 при лазерной сварке сплава 1151 позволяет повысить прочность соединений до 0,83 от прочности основного металла, а для сплава В-1213 с присадкой Св-1201 аналогичная характеристика повышается с 0,75 до 0,81.

Установлено значительное снижение как значений МЦУ, так и уровня прочности сварных соединений после третьего прохода при лазерной сварке жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151, поэтому при проведении такой сварки следует применять не более одной ремонтной подварки в элементах ресурсных конструкций.

Максимальная кратковременная прочность сварных КПО достигается для варианта соединения стрингера с обшивкой прерывистым симметричным швом, а минимальная – для варианта непрерывного шва.

При исследовании влияния повторных проходов, имитирующих ремонт сварных соединений, на уровень прочности, пластичности и МЦУ получено значительное снижение как значений МЦУ, так и уровня прочности соединений после третьего прохода.

По чертежам КБ ПАО «Туполев» изготовлены КПО элементов фюзеляжа (КПО со стрингером и КПО стрингерных панелей) из жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151. Проведен рентгенографический контроль, показавший отсутствие дефектов в сварных соединениях, поэтому все КПО признаны годными.

Испытания при одноосном растяжении до потери несущей способности сварных стрингерных панелей из жаропрочных алюминиевых сплавов В-1213 и 1151 показали, что наибольшую нагрузку способны выдерживать панели из сплава 1151, выполненные непрерывным лазерным сварным швом: 121,4 кН.

Таким образом, для достижения более высоких показателей несущей способности сварной конструкции сварку панелей необходимо проводить непрерывным швом, если же необходимо минимизировать деформации, то целесообразно применение прерывистого симметричного шва.

#### **Список источников**

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., 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.
3. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. № 3. С. 10–15.
4. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7–27.
5. Близнюк В., Васильев Л., Вуль В. и др. *Правда о сверхзвуковых и пассажирских самолетах*. М.: Московский рабочий, 2000. 335 с.
6. Альтман М.Б., Андреев Г.Н., Арбузов Ю.П. и др. *Применение алюминиевых сплавов*. М.: *Металлургия*, 1985. 344 с.
7. Фомин В.М., Маликов А.Г., Оришич А.М. и др. Влияние термической обработки на структуру сварных соединений листов из сплава В-1469 системы Al–Cu–Li, полученных лазерной сваркой // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 9–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-9-18.
8. Булина Н.В., Маликов А.Г., Оришич А.М., Ключков Г.Г. Исследование структурно-фазового состава сварных соединений листов алюминий-литиевого сплава В-1469, полученных лазерной сваркой, в зависимости от термообработки // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 31–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-31-39.
9. Пантелеев М.Д., Бакрадзе М.М., Скупов А.А., Щербаков А.В., Белозор В.Е. Технологические особенности сварки плавлением алюминиевого сплава В-1579 // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 11–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-11-17.

10. Рохлин Л.Л., Бочвар Н.Р., Добаткина Т.В. Совместное влияние некоторых переходных металлов на изменение фазового состава и рекристаллизацию алюминия // Технология легких сплавов. 2009. № 2. С. 20–27.
11. Григорьев М.В., Антипов В.В., Вахромов Р.О., Сенаторова О.Г. Овсянников Б.В. Структура и свойства слитков из сплава системы Al–Cu–Mg с микродобавками серебра // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 3. С. 3–6.
12. Иванова А.О., Вахромов Р.О., Григорьев М.В., Сенаторова О.Г. Исследование влияния малых добавок серебра на структуру и свойства ресурсных сплавов системы Al–Cu–Mg // Труды ВИАМ. 2014. № 10. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.22). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-1-1.
13. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него: пат. 2278179 Рос. Федерация; заявл. 21.12.04; опубл. 20.06.06.
14. Оглодкова Ю.С., Лукина Е.А., Вахромов Р.О., Антипов К.В. Влияние режимов искусственного старения на структуру и свойства жаропрочного сплава В-1213 системы Al–Cu–Mg–Ag // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 8 (710). С. 13–19.
15. Чирков Е.Ф., Кононова Л.А., Шмелева В.С. Влияние эквивалентного содержания Cu и Mg на процессы старения жаропрочного свариваемого конструкционного сплава 1151 (Al–Cu–Mg) // Авиационные материалы и технологии. 2013. № S2. С. 20–24.
16. Чирков Е.Ф. Темп разупрочнения при нагревах – критерий оценки жаропрочности конструкционных сплавов систем Al–Cu–Mg и Al–Cu // Труды ВИАМ. 2013. № 2. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.22).
17. Пантелеев М.Д., Свиридов А.В., Скупов А.А., Одинцов Н.С. Живучесть сварных конструкций элементов фюзеляжа из алюминий-литиевого сплава В-1469 // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.12.22). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-25-35.
18. Dittrich D., Standfuss J., Liebscher J. et al. Laser Beam Welding of Hard to Weld Al Alloys for a Regional Aircraft Fuselage Design – First Results // Physics Procedia. 2011. No. 12. P. 113–122.

#### References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N., Antipov V.V., Klochkova Yu.Yu. Aluminium-lithium alloys of a new generation and layered aluminum-glass plastics based on them. *Tsvetnye metally*, 2016, no. 8 (884), pp. 86–91. DOI: 10.17580/tsm.2016.08.13.
3. Kablov E.N. Modern materials – the basis of innovative modernization of Russia. *Metally Evrazii*, 2012, no. 3, pp. 10–15.
4. Kablov E.N. Materials for aerospace engineering. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2007, no. 5, pp. 7–27.
5. Bliznyuk V., Vasiliev L., Vul V. et al. *The truth about supersonic and passenger aircraft*. Moscow: Moskovsky Rabochiy, 2000, 335 p.
6. Altman M.B., Andreev G.N., Arbuzov Yu.P. et al. *Application of aluminum alloys*. Moscow: Metallurgy, 1985, 344 p.
7. Fomin V.M., Malikov A.G., Orishich A.M., Antipov V.V., Klochkov G.G., Skupov A.A. Heat treatment effect on structure of joint weld sheets from V-1469 alloy of Al–Cu–Li system manufactured by laser welding. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 9–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-9-18.
8. Bulina N.V., Malikov A.G., Orishich A.M., Klochkov G.G. Research of the structural-phase composition of laser weld joint depending on the thermal processing of the aluminum alloy V-1469. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 31–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-31-39.

9. Panteleev M.D., Bakradze M.M., Skupov A.A., Scherbakov A.V., Belozor V.E. Technological features of fusion welding of aluminum alloy V-1579. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 11–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-11-17.
10. Rokhlin L.L., Bochvar N.R., Dobatkina T.V. Joint influence of some transition metals on the change in the phase composition and recrystallization of aluminum. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2009, no. 2, pp. 20–27.
11. Grigorev M.V., Antipov V.V., Vakhromov R.O. et al. Structure and properties of ingots from Al–Cu–Mg system alloy with silver microadditives. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2013, no. 3, pp. 3–6.
12. Ivanova A.O., Vahromov R.O., Grigor'ev M.V., Senatorova O.G. Effect of small additive of silver on structure and properties of Al–Cu–Mg alloys. *Trudy VIAM*, 2014, no. 10, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 01, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-1-1.
13. *Aluminum alloy and product made from it*: pat. 2278179 Rus. Federation; filed 21.12.04; publ. 20.06.06.
14. Oglodkova Yu.S., Lukina E.A., Vakhromov R.O., Antipov K.V. Influence of artificial aging regimes on the structure and properties of the high-temperature alloy V-1213 of the Al–Cu–Mg–Ag system. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2014, no. 8 (710), pp. 13–19.
15. Chirkov E.F., Kononova L.A., Shmelyova V.S. Effect of equiatomic cu and mg content on ageing processes of 1151 (Al–Cu–Mg) high-temperature weldable structural alloy. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2013, no. S2, pp. 20–24.
16. Chirkov E.F. Rate of loss of strength when heatings – criterion of assessment of thermal stability of structural alloys of Al–Cu–Mg and Al–Cu systems. *Trudy VIAM*, 2013, no. 2, paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 01, 2022).
17. Panteleev M.D., Sviridov A.V., Skupov A.A., Odintsov N.S. Aluminum-Lithium alloy V-1469 welded fuselage constructions survivability. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (69), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 01, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-25-35.
18. Dittrich D., Standfuss J., Liebscher J. et al. Laser Beam Welding of Hard to Weld Al Alloys for a Regional Aircraft Fuselage Design – First Results. *Physics Procedia*, 2011, no. 12, pp. 113–122.

#### Информация об авторах

**Антипов Владислав Валерьевич**, заместитель генерального директора по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Пантелеев Михаил Дмитриевич**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Свиридов Александр Владимирович**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Скупов Алексей Алексеевич**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Одинцов Никита Сергеевич**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Vladislav V. Antipov**, Deputy Director General for Science, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Mikhail D. Panteleev**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

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

**Aleksey A. Skupov**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Nikita S. Odintsov**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 23.12.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.01.2023.

The article was submitted 23.12.2022; approved and accepted for publication after reviewing 12.01.2023.