

Научная статья

УДК 621.791

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-28-37

ОСОБЕННОСТИ СВАРИВАЕМОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

М.Д. Пантелеев¹, А.В. Свиридов¹, С.В. Неруш¹,
С.В. Бондаренко¹, И.В. Мостяев¹

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

Аннотация. Изложены ретроспектива и возможные перспективы применения жаропрочных алюминиевых сплавов различных систем легирования. Обозначены общие проблемы свариваемости данных сплавов. Проанализированы причины возникновения горячих трещин в сварных соединениях, детально рассмотрены подходы для их устранения. Исследована свариваемость жаропрочных алюминиевых сплавов 1151, В-1213, АК4-1ч. и алюминиевого сплава 1201 с применением присадочных проволок и без них.

Ключевые слова: жаропрочные алюминиевые сплавы, свариваемость, сварные соединения, горячие трещины, испытания жаропрочных алюминиевых сплавов

Для цитирования: Пантелеев М.Д., Свиридов А.В., Неруш С.В., Бондаренко С.В., Мостяев И.В. Особенности свариваемости жаропрочных алюминиевых сплавов // Труды ВИАМ. 2023. № 12 (130). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-28-37.

Scientific article

WELDABILITY FEATURES OF HEAT-RESISTANT ALUMINUM ALLOYS

M.D. Panteleev¹, A.V. Sviridov¹, S.V. Nerush¹,
S.V. Bondarenko¹, I.V. Mostyaev¹

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

Abstract. A retrospective of the use of heat-resistant aluminum alloys of various alloying systems is presented, possible prospects for their applications are considered. The general problems of weldability of these alloys are indicated. The analysis of the causes of hot cracks in welded joints is carried out, methods and approaches for their elimination are considered in detail. The weldability of heat-resistant aluminum alloys 1151, В-1213, АК4-1ch. and 1201 with and without filler wires was evaluated.

Keywords: heat-resistant aluminum alloys, weldability, welded joints, hot cracking, testing of heat-resistant aluminum alloys

For citation: Panteleev M.D., Sviridov A.V., Nerush S.V., Bondarenko S.V., Mostyaev I.V. Weldability features of heat-resistant aluminum alloys. *Trudy VIAM*, 2023, no. 12 (130), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-28-37.

Введение

Совершенствование авиационно-космической техники предполагает обязательное развитие двух взаимосвязанных направлений: создание новых материалов

и разработка процессов их соединения в неразъемные конструкции. Чем более ответственные функциональные задачи ставят перед новыми летательными аппаратами, тем более совершенными должны быть применяемые материалы, что усложняет проблемы, стоящие перед специалистами в области их соединения.

Для самолетов, которые представляют собой продукцию высоких технологий, вбирающую в себя все последние достижения науки и техники, постоянно разрабатывают новые перспективные материалы. Специфика предъявляемых требований, необходимость сочетания «взаимоисключающих» свойств, обеспечение максимальной эксплуатационной надежности изделий при высокой весовой эффективности привели к возникновению нового направления в авиационном материаловедении, призванного на основе фундаментальных и прикладных исследований обеспечить разработку и всестороннее изучение материалов, предназначенных для авиационной техники.

Важную роль в обеспечении авиационной промышленности новыми материалами сыграл Всероссийский (ранее – Всесоюзный) институт авиационных материалов (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ).

В 1930-е гг. тяжелые самолеты изготавливали преимущественно из алюминиевых сплавов и стали. Естественно, все усилия металлургов, металлургов и технологов были направлены на создание материалов, позволяющих достичь высокой прочности при минимальной массе. Так, в этот период освоен алюминиевый сплав Д16, ставший основным конструкционным материалом в самолетостроении. С развитием сверхскоростной реактивной авиации и увеличением тепловой напряженности деталей и узлов газотурбинных двигателей возникла необходимость создания нового класса жаропрочных алюминиевых сплавов, отвечающих данным требованиям. Сплав Д16 стал прототипом, на основе которого разработан жаропрочный сплав Д20 из семейства сплавов системы Al–Cu.

Жаропрочные алюминиевые сплавы благодаря высокому уровню технологичности и эксплуатационных свойств широко используют для изготовления современных изделий авиационно-космической промышленности, в энергетическом машиностроении и других отраслях в качестве конструкционного материала. Сочетание высокого уровня механических свойств при повышенных температурах, низкой плотности, высокой теплопроводности, жаростойкости и жаропрочности позволило повысить весовую эффективность готовых изделий. Применение жаропрочных алюминиевых сплавов, наряду с титановыми и никелевыми, позволяет при меньших затратах получить надежные соединения ответственного назначения. Однако для большинства жаропрочных алюминиевых сплавов характерна низкая свариваемость с высокой вероятностью возникновения дефектов, что актуализирует задачу обеспечения качественных и надежных сварных соединений [1–6].

К жаропрочным алюминиевым сплавам относят в первую очередь термоупрочняемые (деформируемые) сплавы систем Al–Cu–Mn (Д20, начало промышленного освоения с 1930-х гг.), Al–Cu–Mg (ВД17, с 1960-х гг.) и Al–Cu–Mg–Fe–Ni (АК4, АК4-1, с 1970-х гг.), разработанные изначально для изготовления деталей газотурбинных (лопатки) и реактивных (воздухозаборники, лопатки и крыльчатки насосов и компрессоров) двигателей. В поршневых двигателях из данного сплава изготавливают картеры, головки цилиндров, поршни, детали топливной аппаратуры и т. п. Так, сплав АК4-1 получил широкое распространение благодаря более высокому уровню технологических свойств (свариваемость, деформируемость, коррозионная стойкость, механическая обрабатываемость) [7]. Аналогами являются зарубежные

сплавы марок: AA2018, AA2218 и AA2618 (США); 2618А (Великобритания); 2018, 2218 и 2618 (Япония); ENAW-2618А, ENAW-AlCu2Mg1.5Ni (страны ЕС); А-U4N (Франция); 424218 (Чехия); AlCu2Mg2Ni1 (Польша). На базе сплава АК4-1 путем снижения содержания железа и никеля в 2 раза, а также введения циркония разработан сплав АК4-2ч. (1143) с повышенным на 20–30 % уровнем трещиностойкости при сохранении механических свойств и жаропрочности. Это объясняется наличием в сплаве АК4-2ч. включений фазы Al_3Zr , тормозящей рост зерен. Хорошо себя зарекомендовали также сплавы Д21, Д25 на базе системы Al–Cu–Mn. В дальнейшем разработан сплав 1215, который превзошел сплав Д21 по прочности на 30–40 МПа и жаропрочности на 20–30 %.

Современные военные самолеты проектируют и производят с учетом жестких условий эксплуатации: значительное превышение скорости звука, многократно повторяющиеся пиковые нагрузки, форсированные режимы полетов при любой погоде, резкие перепады температур и аэродинамический нагрев конструкции, динамический характер внешних силовых воздействий. Одновременно решается задача минимизации габаритов и массы, обеспечения качества, надежности, заданного ресурса работы конструкции и ее агрегатов. Решение этих сложных и многообразных задач требует создания цельносварных конструкций планера самолета или отдельных его элементов, таких как несущие кессон-баки и др.

Реализация прогрессивных конструкторских идей возможна только при использовании хорошо свариваемых материалов (желательно не требующих после сварки термической обработки), имеющих в то же время высокую удельную прочность, жесткость, длительный ресурс и работоспособность при значительном перепаде температур.

Из широко применяемых в самолетостроении конструкционных материалов перечисленным требованиям наиболее полно отвечают хорошо свариваемые алюминиевые сплавы с высокой удельной прочностью и титановые сплавы с достаточной жесткостью. Для подобных задач разработаны сплавы 1150, 1151 и 1153, обладающие хорошей свариваемостью, повышенной жаропрочностью, коррозионной стойкостью и технологичностью. В 1974 г. в ВИАМ для сварки группы сплавов 1151–1177 традиционным методом (автоматическая аргоно-дуговая электрическая сварка) разработана и применена присадочная проволока.

На основе системы Al–Cu–Mn разработаны высокопрочные свариваемые сплавы 01205 и 1201, рекомендованные для изготовления сварных емкостей криогенной техники. Деформируемые полуфабрикаты из сплава 1201 характеризуются высоким уровнем механических свойств при комнатной, повышенной и криогенной (–259 °С) температурах. Согласно критерию оценки жаропрочности по темпу разупрочнения при нагревах, данный сплав не относится к жаропрочным, однако за счет высокой технологичности и хорошей свариваемости активно применялся в конструкции (разгонный блок, кабина) планера космического корабля «Буран».

Позднее в ВИАМ разработано и освоено опытно-промышленное производство сплава В-1208, дополнительно легированного Ag, Sc и Zr. Повышения уровня механических характеристик, улучшения свариваемости, жаропрочности и коррозионной стойкости удалось достичь за счет оптимального состава и комплексного легирования (Ag, Zr, Sc), а также режимов деформации и термической обработки. Диаграмма состояния сплавов системы Al–Cu–Mg дает представление о фазовом составе промышленных деформируемых сплавов (рис. 1) [8–12].

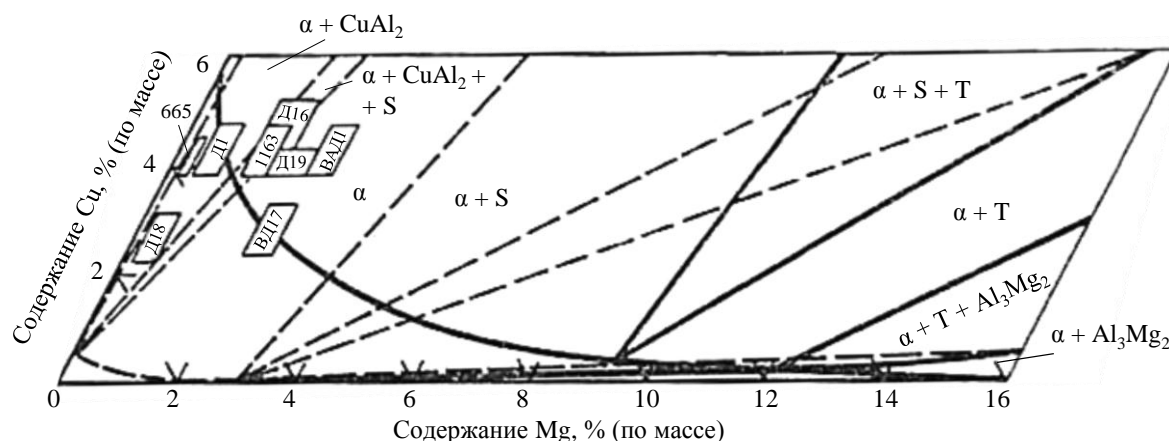


Рис. 1. Фазовый состав промышленных деформируемых сплавов [13]

Основой жаропрочных алюминиевых сплавов являются главным образом системы Al–Cu (сплав Д20) и Al–Cu–Mg (сплавы 1151, 1171 и др.). Последние обладают более низкими относительной плотностью (на 5–6 %) и склонностью к неоднородности микро- и макроструктур. Вследствие диффузионных процессов, которые связаны с дефектами кристаллической решетки, данные сплавы относят к жаропрочным. Необходимым условием повышения уровня жаропрочных свойств является наличие в структуре сплава диффузионно-подвижных упрочняющих фаз Al_2Cu (фаза θ) и Al_2CuMg (фаза S). Степень жаропрочности определяется количественным соотношением фаз, обусловленных содержанием Cu, Mg и их расположением в атомной решетке. С учетом рассмотренных факторов разработан наиболее технологичный и жаропрочный сплав 1151. Данный сплав уникален тем, что при высокотемпературном нагреве упрочняется в результате торможения диффузионных процессов [14, 15].

Большинство жаропрочных сплавов являются трудно свариваемыми при сварке плавлением, так как имеют низкое сопротивление образованию горячих трещин, что ограничивает возможности их более широкого применения. В связи с этим исследование свариваемости жаропрочных сплавов является актуальной задачей. Сварка жаропрочных алюминиевых сплавов имеет особенности, в частности происходят образование горячих трещин, разупрочнение металла в околошовной зоне в связи с укрупнением зерен, оплавление границ зерен и растворение упрочняющих фаз под воздействием повышенных температур.

Решение проблем трещинообразования возможно при комплексном рассмотрении системы «металл–шов–околошовная зона». При кристаллизации сварного шва развивается пластическая деформация, приводящая к образованию горячих трещин, т. е. к хрупкому межкристаллитному разрушению металла сварного шва и зон термического влияния по завершении кристаллизации. Потенциальной склонностью к образованию горячих трещин могут обладать большинство конструкционных сплавов при сварке плавлением, а также при некоторых видах сварки давлением (в случае нагрева до подсолидусных температур) [16, 17]. Теоретически горячие трещины образуются в случае критического сочетания (рис. 2) следующих факторов:

- температурный интервал хрупкости в период кристаллизации металла шва;
- минимальная пластичность в температурном интервале хрупкости δ_{\min} ;
- темп высокотемпературной сварочной деформации ($\Delta\varepsilon/\Delta T$).

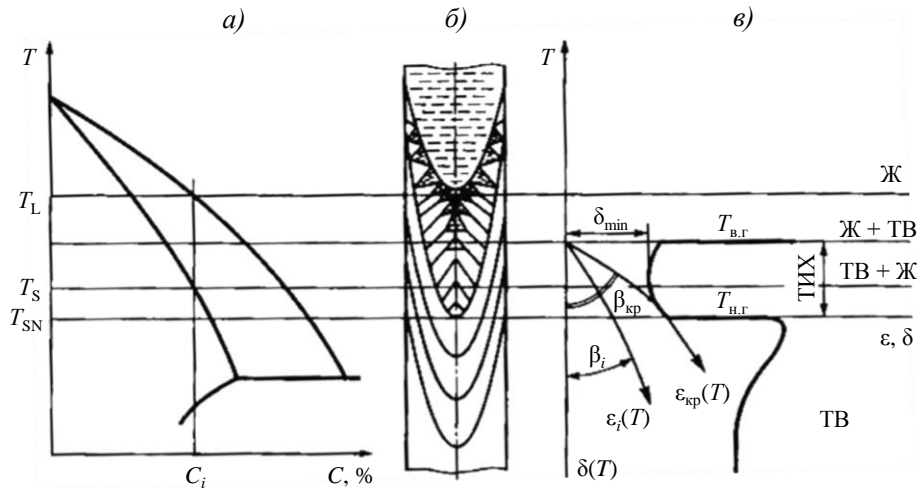


Рис. 2. Образование горячих трещин при кристаллизации сварного шва: *a* – диаграмма состояния сплава (C_i – состав сплава; T_L , T_S , T_{SN} – температуры ликвидус, равновесного и неравновесного солидус соответственно); *b* – процесс кристаллизации сварного шва; *в* – распределение пластичности δ (ТИХ – температурный интервал хрупкости; $T_{в.г}$, $T_{н.г}$ – верхняя и нижняя границы температурного интервала хрупкости; δ_{\min} – минимальная пластичность в ТИХ; ϵ – интенсивность сварочных деформаций; β – угол наклона касательной к кривой зависимости пластичности от температуры; Ж, ТВ – жидкая и твердая фазы)

Для снижения вероятности образования горячих трещин используют следующие способы:

- технологические, связанные с выбором рационального режима сварки, обеспечивающего уменьшение напряжений металла шва во время кристаллизации;
- конструктивные, подразумевающие проектирование соединений, которое уменьшит деформацию металла при кристаллизации;
- металлургические, основанные на оптимизации состава присадочного материала за счет модифицирования металла шва.

Сопротивляемость металла сварных соединений образованию горячих трещин оценивается расчетным или экспериментальным методом. Экспериментальную оценку проводят на технологических пробах или при машинных испытаниях.

При испытании технологических проб металл сварного шва подвергается воздействию деформации от его усадки. Образцы проб сконструированы таким образом, чтобы обеспечить повышенные темпы высокотемпературной деформации. Однако ввиду сложности их изготовления наиболее часто применяют машинные методы испытаний. Они предусматривают испытания с помощью специализированных испытательных машин на растяжение, изгиб, имитацию сварочного цикла на растяжение согласно ГОСТ 26389–84.

По результатам таких испытаний определяют склонность материала к образованию дефектов при сварке, выраженную в относительных количественных показателях свариваемости. Их определяют по соотношению одноименных свойств металла и применяют для сравнительной оценки реакции материала на процесс сварки вне зависимости от вида свариваемых конструкций.

Различают четыре качественные степени технологической свариваемости: хорошая, удовлетворительная, ограниченная и плохая. При прикладной оценке свариваемости число показателей свариваемости приравнивают к числу характеристик

и свойств, обеспечивающих работоспособность сварных соединений для каждого вида материалов и условий эксплуатации, соответствующих назначению сварных конструкций. Именно поэтому в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ широко используют машинные испытания с имитацией сварочного термического цикла на образцах, позволяющие количественно оценить свариваемость сплавов разных систем с использованием присадочных материалов.

Материалы и методы

Работа проведена с использованием листовых полуфабрикатов из алюминиевых сплавов АК4-1ч., В-1213, 1151 и 1201 толщиной 2 мм в состоянии Т1. В качестве присадочного материала использовали проволоки марок Св-1201, АМг6 и Св-1177 диаметром 1,6 мм. Поверхность подготавливали химическим травлением.

Трещиностойкость алюминиевых сплавов оценивали по ГОСТ 26389–84 на установке ЛТП1-6 при поочередной автоматической аргоно-дуговой электрической сварке серии образцов размерами 50×50×2 мм с дискретной варьируемой скоростью растяжения. Относительное перемещение свариваемых кромок (т. е. скорость деформации) увеличивали до момента появления горячих трещин, определяемых визуально. Критическую скорость растяжения $V_{кр}$ рассчитывали по среднему арифметическому трех минимальных скоростей, при которых образовались трещины, и принимали за сравнительный показатель сопротивляемости металла образованию горячих трещин. Трещиностойкость оценивали как без применения присадочного материала, так и с присадками.

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

Результаты и обсуждение

Оценка свариваемости листовых полуфабрикатов показала, что бездефектное образование сварного шва жаропрочных сплавов АК4-1ч., 1201, В-1213 и 1151 труднодостижимо без применения присадочных материалов. Критическая скорость растяжения при сварке без использования присадок для всех изученных сплавов имеет достаточно низкие значения – от 0,6 до 4,2 мм/мин (см. таблицу).

**Сопротивление образованию горячих трещин
листовых полуфабрикатов из алюминиевых сплавов**

Сплав	Присадка	Критическая скорость растяжения $V_{кр}$, мм/мин
АК4-1ч.	Без присадки	4,2
	Св-1201	3,1
	АМг6	10,5
	Св-1177	3,1
В-1213	Без присадки	0,6
	Св-1201	3,4
	АМг6	1,9
	Св-1177	2,5
1151	Без присадки	2,7
	Св-1201	4,8
	АМг6	3,1
	Св-1177	5,7
1201	Без присадки	3,1
	Св-1201	6,2

Сплав В-1213 можно отнести к группе ограничено свариваемых при сварке плавлением из-за высокой склонности к образованию горячих трещин. Применение присадочных материалов марок АМг6 и Св-1201 позволяет повысить значение показателя $V_{кр}$ до 1,9 и 3,4 мм/мин соответственно. В связи со склонностью сплава к образованию горячих трещин целесообразно использовать режимы сварки, обеспечивающие меньшее тепловложение.

Установлено, что листовые полуфабрикаты из сплава 1151 менее склонны к образованию пор, трещин и подрезов. При сварке без использования присадки значения $V_{кр}$ не превышают 2,7 мм/мин. Применение присадок марок Св-1201 и Св-1177 увеличивает значения показателя $V_{кр}$ до 4,8 и 5,7 мм/мин соответственно.

Наиболее высоким сопротивлением образованию горячих трещин обладают листовые полуфабрикаты из сплава 1151 с присадочной проволокой марки Св-1177, использование которой позволяет увеличить значение показателя $V_{кр}$ до 5,7 мм/мин.

В отличие от сплава Д16, который в состаренном состоянии имеет пониженную пластичность и при сварке образует дефекты, сплав 1151 системы Al–Cu–Mg имеет улучшенные характеристики свариваемости, жаропрочности и стойкости к коррозии. Его состав имеет оптимальное соотношение меди и магния, а также легирующих элементов, образующих нерастворимые интерметаллидные соединения. Это позволяет использовать данный сплав в широком диапазоне рабочих температур без снижения уровня механических характеристик.

Сплав 1201 не склонен к образованию горячих трещин, так как при сварке без присадки $V_{кр} = 3,1$ мм/мин. Применение присадочной проволоки марки Св-1201 позволяет повысить изначально высокий уровень свариваемости сплава в 2 раза: $V_{кр} = 6,2$ мм/мин. Таким образом, сплав 1201 системы Al–Cu–Mn имеет высокое сопротивление образованию горячих трещин.

Заключения

Жаропрочные алюминиевые сплавы используются во многих отраслях промышленности. Благодаря высоким уровням технологических и эксплуатационных свойств данные сплавы широко применяют в наукоемких производствах во всем мире. Свариваемость, как основной критерий технологичности, имеет ключевое значение для дальнейшего развития сфер их применения. Исследован составной показатель свариваемости, полученный при оценке сопротивления образованию горячих трещин алюминиевых сплавов АК4-1ч., В-1213, 1151 и 1201.

Установлено, что наибольшими значениями показателя $V_{кр}$ обладают полуфабрикаты из сплавов 1201 и 1151. При этом сплав 1151, являясь жаропрочным, имеет значительные перспективы применения в сварных конструкциях авиационно-космической техники, претерпевающих аэродинамический нагрев.

Детальное исследование комплекса механических свойств сварных соединений как неотъемлемой составляющей определения свариваемости при использовании современных способов сварки (таких как электронно-лучевая и лазерная сварка, а также сварка в твердой фазе) является актуальной задачей дальнейших исследований [18].

Работы (исследования) выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (Соглашение № 075-11-2021-085 от 22.12.2021).

Список источников

1. 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.

2. Фридляндер И.Н. Воспоминания о создании авиакосмической и атомной техники из алюминиевых сплавов. М.: Наука, 2005. 277 с.
3. Фридляндер И.Н. Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2002. № 7. С. 24–29.
4. 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: 10.08.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
5. 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: 10.08.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
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.: ООО «Алюсил-МВиТ», 2012. Ст. 8.
7. Телешов В.В. Структура и свойства полуфабрикатов из сплава АК4-2 // *Технология легких сплавов*. 2016. № 1. С. 80–97.
8. Шеметев Г.Ф. Алюминиевые сплавы: составы, свойства, применение: учеб. пособие. СПб.: СПбПУ, 2012. Ч. 1. 155 с. Электронный ресурс. URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/2747.pdf/view> (дата обращения: 10.07.2023).
9. Клочков Г.Г., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Новый сплав системы Al–Cu–Mn для изделий космической техники // *Труды ВИАМ*. 2015. № 4. Ст. 01. URL: <http://viam-works.ru/> (дата обращения: 04.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-1-1.
10. Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S (85). С. 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211.
11. 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 (85). С. 225–241. DOI: 10.1857/2071-9740-2017-0-S-225-241.
12. Юдаев Д.П. Влияние технологических и эксплуатационных воздействий на структуру и свойства алюминиевых сплавов 1151 и 1545K и возможность изготовления из них конструкций перспективных ракет-носителей: дис. ... канд. техн. наук. Самара: СамГТУ, 2014. 146 с.
13. Чирков Е.Ф. Темп разупрочнения при нагревах – критерий оценки жаропрочности конструкционных сплавов систем Al–Cu–Mg и Al–Cu // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № S2. С. 11–19.
14. Чирков Е.Ф., Кононова Л.А., Шмелева В.С. Влияние экваторного содержания Cu и Mg на процессы старения жаропрочного свариваемого конструкционного сплава 1151 (Al–Cu–Mg) // *Труды ВИАМ*. 2013. № 2. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.08.2023).
15. Якушин Б.Ф., Макаров Э.Л. Теория свариваемости сталей и сплавов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 487 с.
16. 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: 14.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-35-46.
17. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing // *Journal Material Science Engineering*. 2005. Vol. 50. P. 1–78.

18. 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.

References

1. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vol. St. Petersburg, 2019, vol. 4, pp. 24.
2. Fridlyander I.N. *Memories of the creation of aerospace and nuclear technology from aluminum alloys*. Moscow: Nauka, 2005, 277 p.
3. Fridlyander I.N. Modern aluminum, magnesium alloys and composite materials based on them. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2002, no. 7, pp. 24–29.
4. Kablov E.N., Kutuyev 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: August 10, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
5. 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: August 10, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
6. Kablov E.N., Lukin V.I., Ospennikova O.G. Promising aluminum alloys and technologies for their connection for aerospace products. *Report 2nd Int. conf. and the exhibition «Aluminium-21. Welding and soldering»*. St. Petersburg: Alusil-MViT LLC, 2012, art. 8.
7. Teleshov V.V. Structure and properties of semi-finished products from AK4-2 alloy. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2016, no. 1, pp. 80–97.
8. Shemetev G.F. *Aluminum alloys: compositions, properties, application*: textbook. St. Petersburg: SPbPU, 2012, part 1, 155 p. Available at: <https://elib.spbstu.ru/dl/2747.pdf/view> (accessed: July 10, 2023).
9. Klochkov G.G., Klochkova Y.Y., Romanenko V.A. New alloy of Al–Cu–Mn system for the space hardware. *Trudy VIAM*, 2015, no. 4, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 10, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-1-1.
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. 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.
12. Yudaev D.P. *The influence of technological and operational influences on the structure and properties of aluminum alloys 1151 and 1545K and the possibility of manufacturing promising launch vehicle structures from them*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Samara: SamSTU, 2014, 146 p.
13. Chirkov E.F. Weakening rate under heating is the evaluation criterion of heat resistance of Al–Cu–Mg and Al–Cu structural alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2013, no. S2, pp. 11–19.
14. 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. *Trudy VIAM*, 2013, no. 2, paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 10, 2023).
15. Yakushin B.F., Makarov E.L. *Theory of weldability of steels and alloys*. Moscow: Bauman MSTU Publ. house, 2018, 487 p.

16. 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: August 14, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-35-46.
17. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing. *Journal Material Science Engineering*, 2005, vol. 50, pp. 1–78.
18. 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.

Информация об авторах

Пантелеев Михаил Дмитриевич, 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

Неруш Святослав Васильевич, начальник НИО, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бондаренко Сергей Валентинович, ведущий специалист, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Мостяев Игорь Владимирович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Mikhail D. Panteleev, 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

Svyatoslav V. Nerush, Head of Scientific-Research Bureau, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey V. Bondarenko, Leading Specialist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Igor V. Mostyaev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 04.09.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.11.2023.
The article was submitted 04.09.2023; approved and accepted for publication after reviewing 20.11.2023.