

Научная статья

УДК 669.715:669.018.62

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-33-49

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ ПРЕССОВАННЫХ ПОЛОС ИЗ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА В-1469

И. Бенариев¹, В.А. Романенко¹, М.Д. Пантелеев¹,
М.С. Оглодков¹, В.В. Овчинников², Е.В. Филонова¹

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

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», Москва, Россия; mospolytech@mospolytech.ru

Аннотация. Исследована микроструктура и механические свойства сварных соединений, полученных электронно-лучевой сваркой прессованных полос из высокопрочного сплава В-1469 системы Al–Cu–Li. Методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии с применением термического анализа и термодинамического моделирования исследованы особенности структурно-фазового состояния материала в различных зонах сварного соединения. Изучено влияние скорости сварки на механические свойства и характер разрушения сварных швов.

Ключевые слова: алюминий-литиевые сплавы, система Al–Cu–Li, сплав В-1469, электронно-лучевая сварка, ликвационные трещины, дифференциальная сканирующая калориметрия

Для цитирования: Бенариев И., Романенко В.А., Пантелеев М.Д., Оглодков М.С., Овчинников В.В., Филонова Е.В. Особенности структуры и механические свойства соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой прессованных полос из алюминий-литиевого сплава В-1469 // Труды ВИАМ. 2024. № 4 (134). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-33-49.

Scientific article

STRUCTURAL FEATURES AND MECHANICAL PROPERTIES OF JOINTS, PRODUCED BY ELECTRON BEAM WELDING OF STRIP EXTRUSIONS FROM ALUMINUM-LITHIUM ALLOY V-1469

I. Benariev¹, V.A. Romanenko¹, M.D. Panteleev¹,
M.S. Oglochkov¹, V.V. Ovchinnikov², E.V. Philonova¹

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

²Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia; mospolytech@mospolytech.ru

Abstract. This paper presents results of study of the microstructure and mechanical properties of welded joints produced by electron beam welding of strip extrusions from high-strength alloy V-1469 of Al–Cu–Li system. The features of the structural and phase state of the material in various zones of electron beam welding joint are studied by means of scanning and transmission electron microscopy, thermal analysis and thermodynamic modeling. The influence of welding speed on the mechanical properties and nature of fracture of welds was studied.

Keywords: aluminum-lithium alloys, Al–Cu–Li system, alloy V-1469, electron-beam welding, liquation cracks, differential scanning calorimetry

For citation: Benarieb I., Romanenko V.A., Panteleev M.D., Oglodkov M.S., Ovchinnikov V.V., Philonova E.V. Structural features and mechanical properties of joints, produced by electron beam welding of strip extrusions from aluminum-lithium alloy V-1469. *Trudy VIAM*, 2024, no. 4 (134), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-33-49.

Введение

Повысить весовую эффективность современных изделий авиационной и ракетно-космической техники можно за счет применения высокопрочных алюминий-литиевых сплавов системы Al–Cu–Li [1–14].

В настоящее время сварка деталей больших толщин (>10 мм), в частности корпусных деталей, изготавливаемых из полуфабрикатов алюминиевых сплавов, является актуальной задачей. Для реализации традиционного метода аргоно-дуговой сварки таких деталей необходимо осуществить большое количество проходов, что повышает трудоемкость технологического процесса и значительно снижает прочность сварного соединения за счет многократного термического воздействия на основной металл. Для изготовления соединений из толстостенных деталей рационально применять метод электронно-лучевой сварки (ЭЛС), который позволяет за один проход получить соединение более высокого качества за счет переплава и эффективной дегазации в вакууме металла шва [15–22].

Изготовление сварных конструкций из алюминий-литиевых сплавов системы Al–Cu–Li сваркой плавлением связано со сложностями вследствие их повышенной склонности к образованию горячих пор и трещин, в том числе ликвационных трещин в зоне сплавления и околошовной зоне сварного соединения [9, 23–31]. Существенной проблемой является значительное разупрочнение материала ($\sigma_{в.св}/\sigma_{в} \geq 0,5$) под воздействием термического цикла сварки (рис. 1), в том числе вследствие выгорания в сварном шве лития [23] – ключевого элемента, который образует упрочняющие фазы в сплаве [26]. Повысить эксплуатационные характеристики сварных соединений можно за счет совершенствования технологии сварки, обеспечивающей оптимизацию структуры сварного шва, и рационального выбора технологической схемы последующей термической обработки.

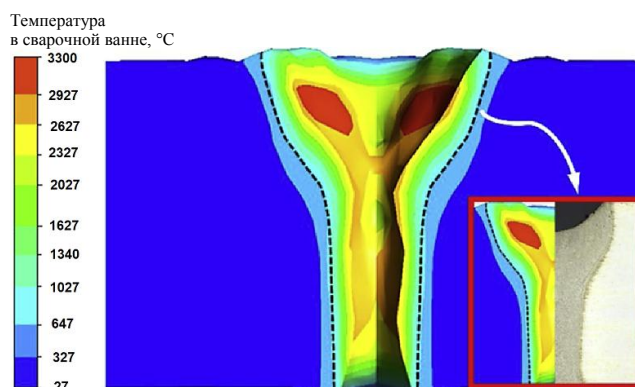


Рис. 1. Распределение температур в сварочной ванне при электронно-лучевой сварке алюминий-литиевого сплава 2195 системы Al–Cu–Li, определенное с помощью компьютерного моделирования [23]

Перспективным конструкционным материалом для аэрокосмической промышленности является высокопрочный свариваемый сплав В-1469 системы Al–Cu–Li–(Ag) [32, 33]. Для листов и тонкостенных профилей из сплава В-1469 освоены прогрессивные технологии лазерной сварки и сварки трением с перемешиванием [34–36]. Исследованы также сварные соединения различных полуфабрикатов из сплава В-1469,

полученные ЭЛС [37–39]. Для совершенствования технологии изготовления массивных сварных конструкций из сплава В-1469 методом ЭЛС важной задачей является дальнейшее исследование особенностей структурообразования, различных дефектов в материале и механических свойств получаемых сварных соединений.

Цель данной работы – исследование особенностей микроструктуры, механических свойств и характера разрушения сварных соединений, полученных методом ЭЛС прессованных полос из высокопрочного сплава В-1469.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексного научного направления 8. «Легкие, высокопрочные коррозионностойкие свариваемые сплавы и стали, в том числе с высокой вязкостью разрушения» и комплексной научной проблемы 10.8. «Технологии сварки плавлением новых конструкционных материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Материалы и методы

Материалом для исследований служили сварные соединения заготовок прессованных полос толщиной 12 или 40 мм из алюминий-литиевого сплава В-1469, выполненные ЭЛС. Исходным материалом являлись прессованные полосы толщиной 40 мм, изготовленные в промышленных условиях на металлургическом предприятии ОАО «КУМЗ». Химический состав материала, определенный методом спектрального анализа, соответствовал ОСТ 1 90048–90. После закалки, правки растяжением (в продольном направлении) и искусственного старения при температуре 160 °С прессованные полосы обладали следующими механическими свойствами: $\sigma_B \geq 640$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 610$ МПа, $\delta_5 \geq 8,0$ % (состояние Т1).

Из прессованной полосы вырезали плоские заготовки толщиной 12 и 40 мм, которые затем подвергали механической обработке и химическому фрезерованию для получения качественной поверхности для сварки.

Электронно-лучевую сварку проводили в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ на установке, оснащенной системой числового программного управления и энергоблоком мощностью 40 кВт с ускоряющим напряжением 60 кВ. В процессе сварки с помощью программы задаются координаты перемещения электронно-лучевой пушки и технологические параметры процесса ЭЛС: скорость сварки ($V_{св}$), ток луча и фокусировки, ускоряющее напряжение, рабочее расстояние. Сварку заготовок проводили встык поперек направления волокна с различными скоростями, изменяя ток луча и фокусировки при постоянных значениях ускоряющего напряжения и рабочего расстояния. Для каждой скорости сварки добивались формирования качественного сварного шва без визуально контролируемых дефектов.

Структурные исследования сварных соединений проводили методами световой, растровой электронной и просвечивающей электронной (ПЭМ) микроскопии. Рентгеноспектральный микроанализ при растровой электронной микроскопии проводили с помощью приставки EDS. Температуру фазовых превращений определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) при нагреве образцов со скоростью 20 °С/с. Образцы для ПЭМ и ДСК вырезали из разных зон сварного соединения: основного металла, зоны термического влияния (ЗТВ) и сварного шва.

Механические свойства при растяжении ($\sigma_{B,св}$) и ударную вязкость соединений с U-образным надрезом (КСУ) образцов сварных соединений определяли при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 6996–66 и ГОСТ 9454–78 соответственно. Для сварного соединения толщиной 40 мм образцы отбирали из средней части шва. Микротвердость по Виккерсу определяли с использованием микротвердомера в соответствии с ГОСТ 9450–76.

Результаты и обсуждение

При выбранных режимах ЭЛС получены стыковые сварные заготовки толщиной 12 и 40 мм. На рис. 2 представлены типичная макроструктура сварного соединения при «кинжальном» проплавлении и результаты определения микротвердости в поперечном сечении. Ширина шва для сварного соединения толщиной 12 мм изменяется по высоте от 2 до 4 мм, толщиной 40 мм – от 0,5 до 4 мм. С лицевой стороны соединения формируется усиление шва на 1 мм, со стороны проплава – на 0,8 мм (рис. 2, а).

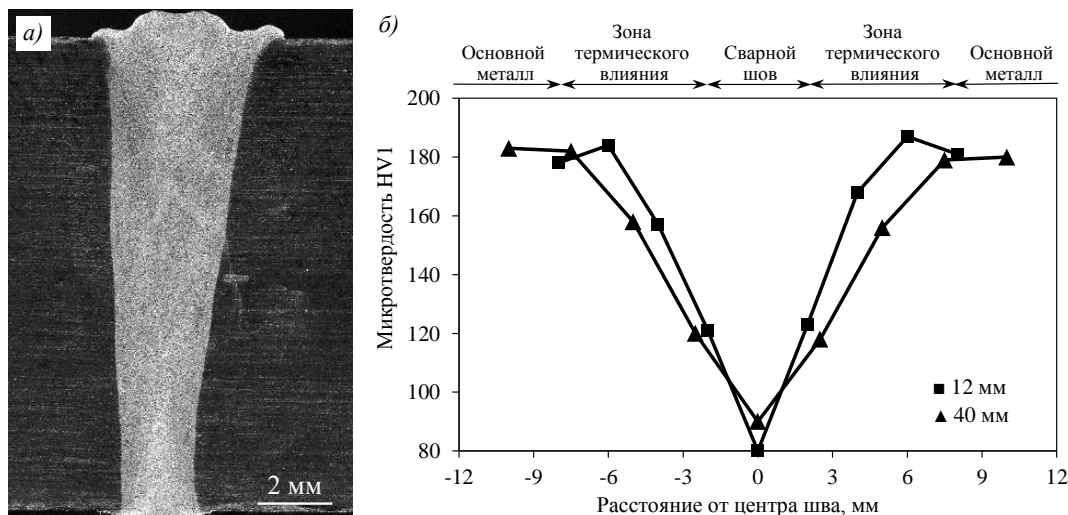


Рис. 2. Макроструктура сварного соединения из сплава В-1469 толщиной 12 мм (а) и распределение микротвердости сварных соединений различной толщины в поперечном сечении по средней линии (б)

Распределение микротвердости в поперечном сечении сварных соединений по средней линии имеет V-образную форму (рис. 2, б). Микротвердость зоны сварного шва в ~2 раза меньше (80 HV) по сравнению с зоной основного металла (180 HV), так как сплав находится в литом (неупрочненном) состоянии. В соответствии с результатами определения микротвердости протяженность ЗТВ составляет ≤ 5 мм. Для сварного соединения толщиной 40 мм характерны меньшие значения микротвердости в ЗТВ, чем для соединения толщиной 12 мм, что вызвано более высокой погонной энергией.

Металлографический анализ показал, что структура зоны сварного шва, полученного ЭЛС, имеет характерное дендритное строение, незначительно отличающееся по высоте, пористость практически отсутствует (рис. 3).

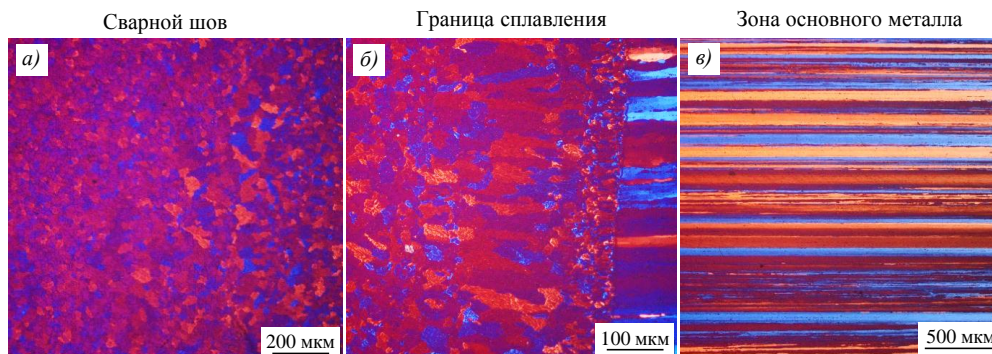


Рис. 3. Типичная микроструктура сварного соединения из сплава В-1469, выполненного электронно-лучевой сваркой (световая микроскопия в поляризованном свете)

Структура швов (рис. 3, а, б) аналогична структуре слитков из сплава В-1469: на границе сплавления наблюдаются мелкие равноосные зерна, которые переходят в более крупные (столбчатые) кристаллиты, вытянутые в направлении теплоотвода, при этом количество столбчатых кристаллитов на границе сплавления превалирует в верхней части шва. В центре шва формируются более мелкие зерна (рис. 3, а), размер которых отличается по высоте шва [23–26]: в верхней части наблюдаются зерна размером до 100 мкм, в нижней части – до 20 мкм. Это обусловлено различием скоростей охлаждения расплава по высоте шва (рис. 1). Зерно в структуре шва более мелкое, чем в слитке в литом состоянии [40], вследствие высокой скорости кристаллизации, реализуемой при сварке (для промышленных слитков из сплава В-1469 характерен размер зерен 200–500 мкм). Границы зерен и дендритов сварного шва представляют практически сплошной каркас из включений интерметаллидов, в том числе фаз эвтектического происхождения (рис. 4).

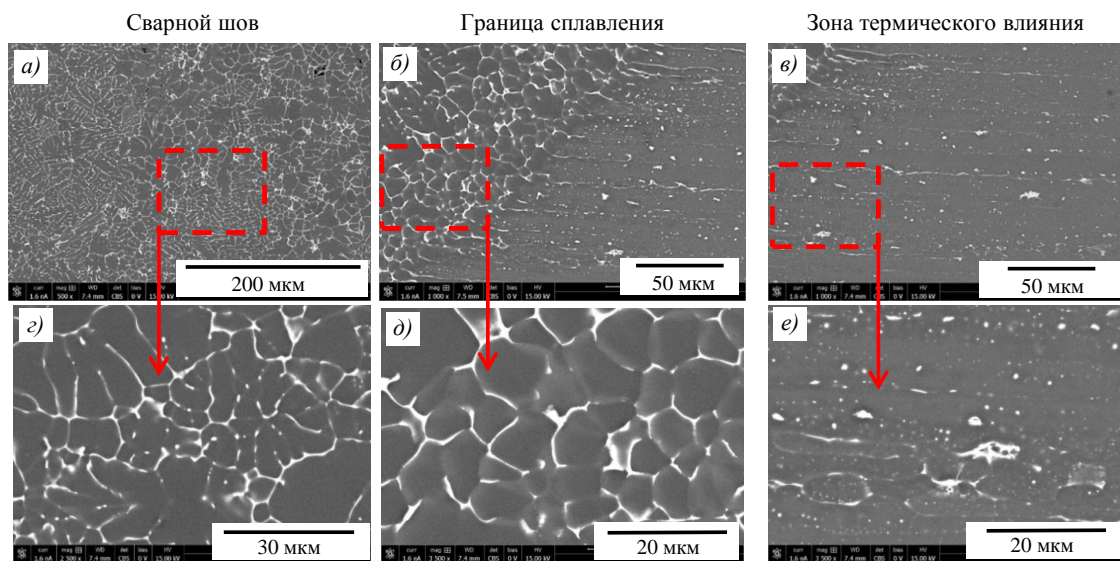


Рис. 4. Микроструктура сварного соединения из сплава В-1469, выполненного электронно-лучевой сваркой (растровая электронная микроскопия)

Сплав В-1469 относится к высоколегированным алюминиевым сплавам, характеризующимся сложными фазовыми превращениями на всех стадиях изготовления. Проведено термодинамическое моделирование фазового состава выделений, сформированных в металле сварного шва, при неравновесной кристаллизации методом Шейла–Гулливера с использованием специализированного программного обеспечения. Расчет показал (рис. 5), что в интервале температур от 722 до 650 °С образуется β -фаза (Al_3Zr) в количестве 0,07 % (мольн.), которая может служить центром кристаллизации зерен (Al) твердого раствора (92 % (мольн.)), возникающего в интервале температур от 650 (ликвидус) до 503 °С (неравновесный солидус). Выделение 0,2 % (мольн.) фазы AlLiSi наблюдается в интервале температур от 610 до 503 °С. В температурном диапазоне от 520 до 503 °С одновременно образуются фаза Al_3Sc в количестве 0,03 % (мольн.) и различные фазы с медью, % (мольн.): 1,5 – $T_1(\text{Al}_2\text{CuLi})$; 0,8 – $T_B(\text{Al}_7\text{Cu}_4\text{Li})$; 1,3 – $S(\text{Al}_2\text{CuMg})$; 1,5 – $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$; 0,05 – $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$; 0,01 – $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$; 0,05 – $W(\text{AlCuSc})$. Фазы, содержащие Cu, появляются в последнюю очередь, поэтому располагаются в виде эвтектики на границах дендритных ячеек (рис. 4, з, д) [40].

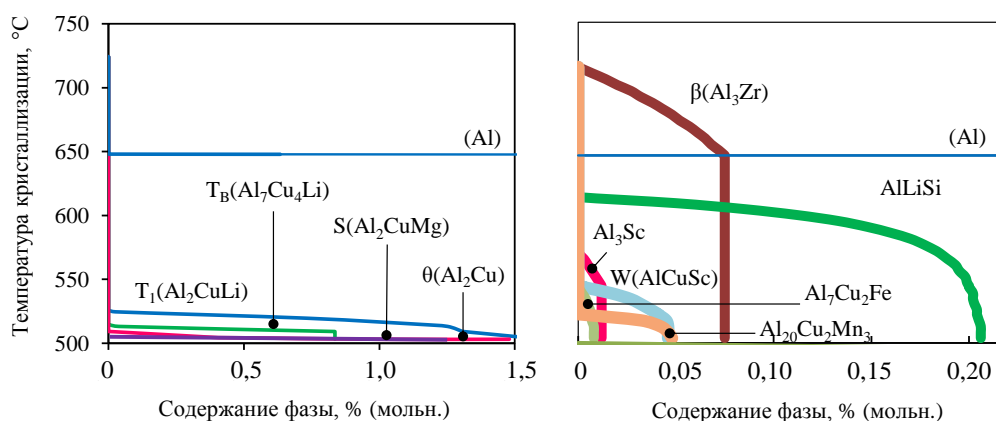


Рис. 5. Фазовый состав сплава В-1469 при неравновесной кристаллизации, рассчитанный методом Шейла–Гулливера с использованием специализированного программного обеспечения

В основном металле и ЗТВ наблюдаются вытянутые частично рекристаллизованные зерна (волокна) (рис. 3, в), по границам которых располагаются относительно крупные включения интерметаллидных фаз (рис. 4, в), образованных при кристаллизации слитков и сохранившихся при последующих технологических операциях. Согласно результатам рентгеноспектрального микроанализа в состав включений входят преимущественно Cu и Fe, что позволяет предположить их принадлежность к фазе Al_7Cu_2Fe (рис. 5).

Околошовная зона, в отличие от основного металла, содержит продолжительные непрерывные строчки (прослойки) из интерметаллидов (рис. 4, в, е), которые сформировались в результате высокотемпературного нагрева при сварке (рис. 6). Основной причиной их образования является ликвационная неоднородность в исходном материале, а также интенсивная диффузия Cu и Li при нагреве по границам волокон, что приводит к образованию и коагуляции выделений, частичному оплавлению (пережогу) данных участков вследствие пониженной температуры солидус (рис. 1) [9, 24, 28, 41].

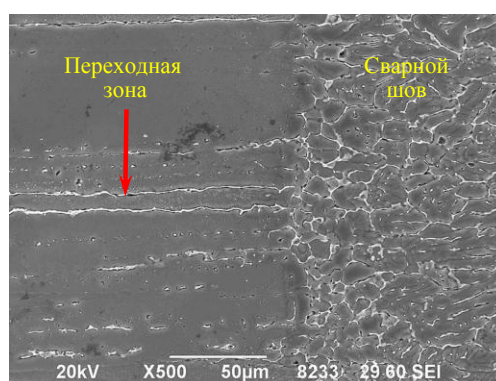


Рис. 6. Структура переходной зоны сварного соединения из сплава В-1469, выполненного электронно-лучевой сваркой (стрелкой указаны прослойки выделений интерметаллидных фаз на границах волокон)

Анализ микроструктуры сварных соединений позволил также выявить наличие ликвационных трещин длиной от 0,5 до 0,9 мм (рис. 7), появляющихся периодически по высоте в зоне сплавления и расположенных горизонтально вдоль границ зерен (волокон) околошовной зоны. При этом для сварного соединения толщиной 12 мм при

$V_{св} > 36$ м/ч возрастает вероятность образования околошовных трещин. Подобные трещины образуются при сварке плавлением толстостенных полуфабрикатов с выраженной волокнистостью исходной структуры [9, 24, 28, 31, 38].

По-видимому, ликвационные трещины образуются в результате оплавления (пережога) обнаруженных строчек легкоплавких включений по границам зерен (волокон) в зоне сплавления и околошовной зоне под действием высоких термических напряжений при сварке (рис. 7, в, з) [9, 24, 27, 28, 31]. Данные включения оказывают охрупчивающее действие и служат концентратором напряжений. Трещина распространяется преимущественно вдоль границ волокон по разупрочненной зоне термического влияния и может проходить по границам зерен закристаллизовавшегося металла шва (рис. 7, а). При этом пониженная прочность и пластичность в высотном направлении исследуемого прессованного полуфабриката может облегчать распространение трещины.

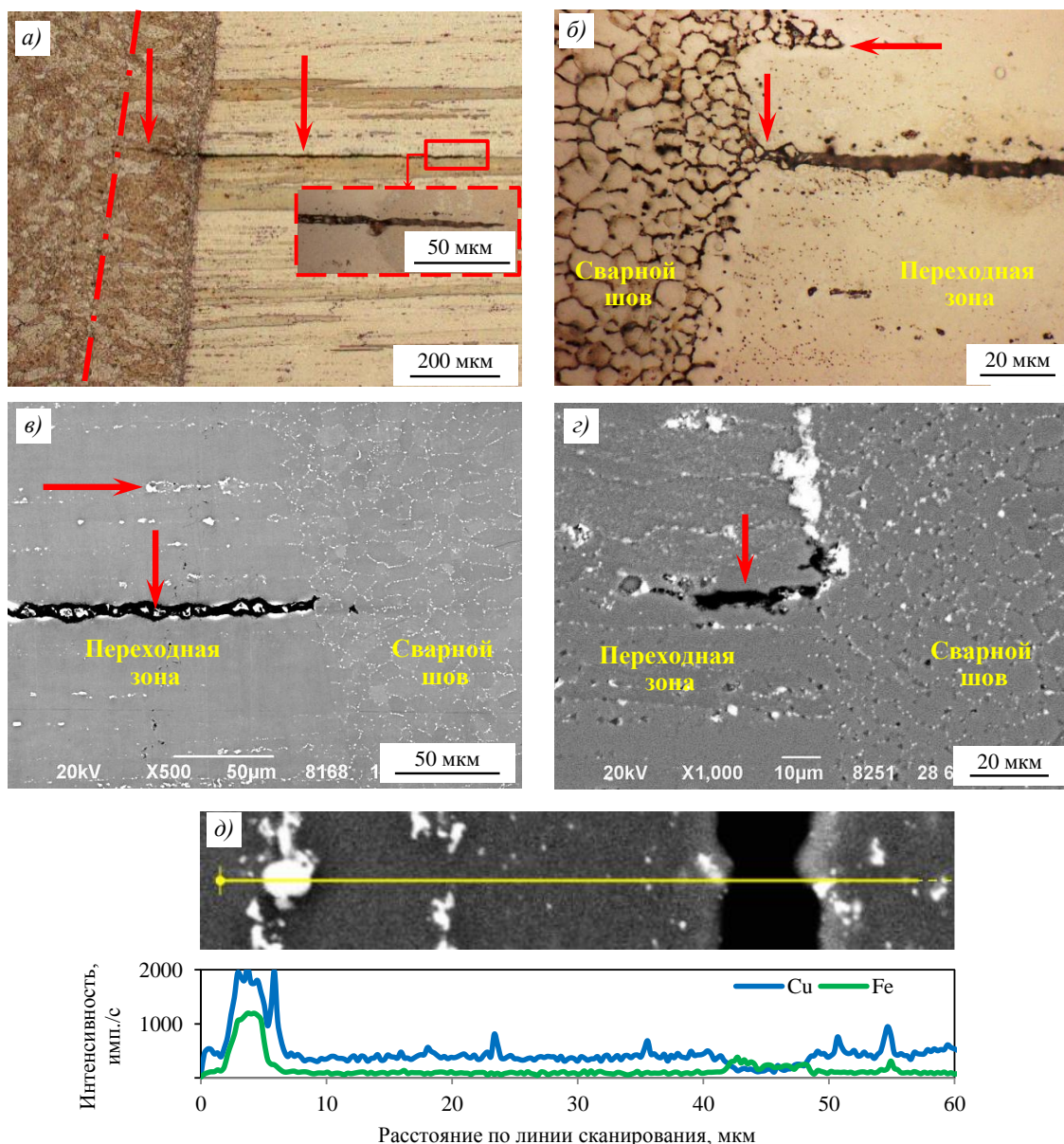


Рис. 7. Структура (а–з) переходной зоны сварного соединения, выполненного электронно-лучевой сваркой, с ликвационными трещинами (стрелками указаны трещины и участки оплавления между волокнами) и результаты рентгеноспектрального микроанализа (д)

Сплав В-1469 является термически упрочняемым, достигает высокой прочности за счет выделений мелкодисперсных наночастиц $T_1(\Omega')$ -фазы, формирующихся в закаленном состоянии при искусственном старении.

Анализ сварных соединений с помощью ПЭМ показал, что структура основного металла субзеренная (рис. 8, а), ЗТВ – частично рекристаллизованная (рис. 8, б). По всему объему основного металла наблюдаются вторичные выделения упрочняющих фаз: пластины $T_1(\Omega')$ -фазы размером 160×15 нм (внутри субзерен и на границах субзерен) и θ' -фазы (Al_2Cu) размером 120×15 нм (внутри субзерен), а также сферические дисперсоиды метастабильной β' -фазы ($Al_3(Zr, Sc)$) со структурой $L1_2$ [9, 10, 13] и размером <40 нм (рис. 8, г, ж). Данные фазы типичны для сплавов типа В-1469 в закаленном и искусственно состаренном состоянии [32, 33, 36, 42–48]. Примечательно, что структура ЗТВ, в отличие от основного металла, содержит меньшее количество частиц $T_1(\Omega')$ -фазы (рис. 8, д), а частицы θ' -фазы практически отсутствуют (рис. 8, з), что обусловлено их растворением при высокотемпературном нагреве в процессе сварки. Благодаря высокой термической стабильности характер выделений дисперсоидов β' -фазы после термического цикла сварки практически не изменяется. В микроструктуре зоны сварного шва отсутствуют выделения упрочняющих фаз (рис. 8, в), наблюдается развитая дислокационная структура (рис. 8, е, и), что может быть обусловлено высокими термическими напряжениями при сварке.

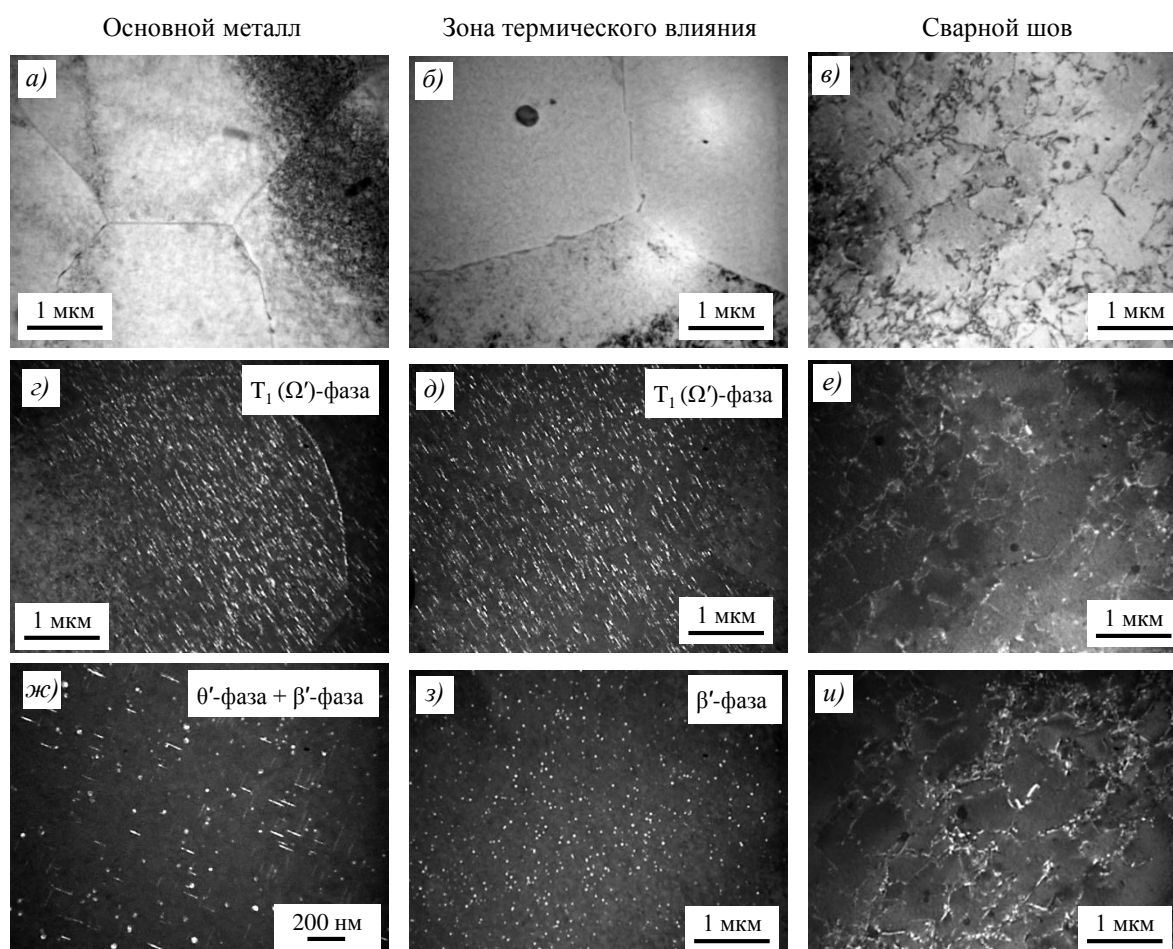


Рис. 8. Структура разных зон сварного соединения, выполненного электронно-лучевой сваркой прессованных полос из сплава В-1469 (просвечивающая электронная микроскопия)

На рис. 9 приведены ДСК-кривые при нагреве образцов разных зон сварного соединения из сплава В-1469, выполненного ЭЛС. Пики фазовых превращений на ДСК-кривых интерпретировали с учетом работ [42, 43, 49, 50]. Сравнительный анализ ДСК-кривых подтверждает данные ПЭМ (рис. 8).

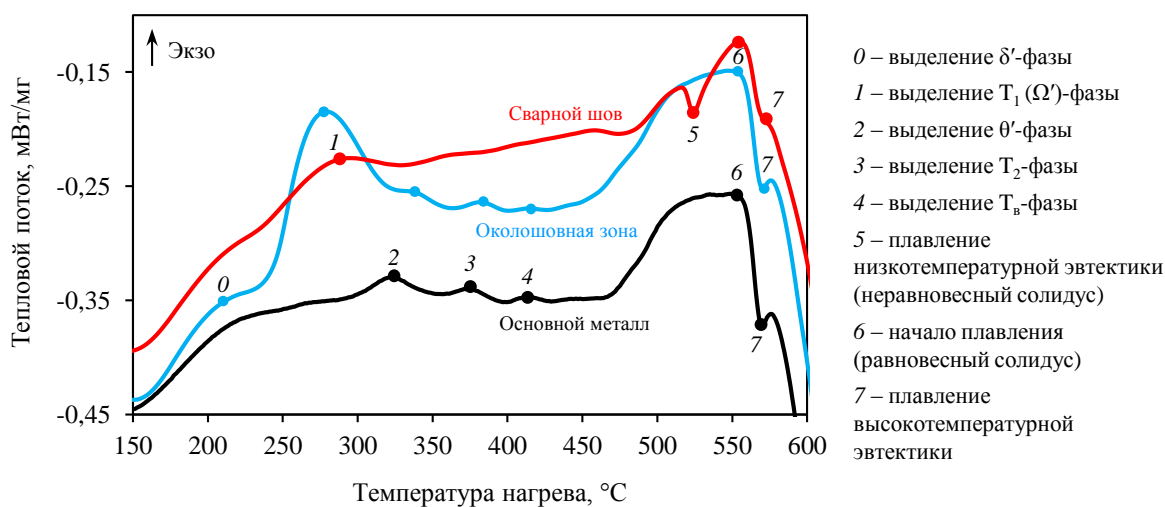


Рис. 9. Кривые дифференциальной сканирующей калориметрии при нагреве образцов разных зон сварного соединения, выполненного электронно-лучевой сваркой пресованных полос из сплава В-1469, и интерпретация пиков фазовых превращений

Из сравнения ДСК-кривых видно, что при нагреве в ЗТВ наблюдается экзотермический пик 1 со значительным тепловым эффектом, что свидетельствует о выделении метастабильных фаз, которые, по-видимому, растворяются в процессе сварки. Это позволяет предположить возможность упрочнения ЗТВ с помощью искусственного старения сварного соединения. На ДСК-кривой сварного шва присутствует эндотермический пик 5 ($T_n = 525 \text{ }^\circ\text{C}$), что указывает на плавление неравновесной эвтектики, сформированной при кристаллизации сварного шва. Поэтому при дальнейшей термической обработке сварного соединения режим нагрева под закалку следует выбирать с учетом температуры неравновесного солидус металла шва во избежание пережога. Кроме того, следует отметить, что на ДСК-кривой сварного шва практически отсутствует эндотермический пик 7 ($T_n = 568 \text{ }^\circ\text{C}$), в отличие от основного металла и ЗТВ.

Анализ результатов исследования механических характеристик (рис. 10) показал, что для сварных соединений толщиной 12 мм при увеличении скорости сварки с 36 до 144 м/ч прочность ($\sigma_{в.св}$) имеет тенденцию к снижению (с 320 до 300 МПа), а для ударной вязкости ($KCU_{шов}$) наблюдается экстремальная зависимость. Наилучшие свойства сварного соединения толщиной 12 мм получены при $V_{св} = 36 \text{ м/ч}$: $\sigma_{в.св} = 320 \text{ МПа}$, $KCU_{шов} = 180 \text{ кДж/м}^2$. Более высокий уровень характеристик наблюдается для сварного соединения толщиной 40 мм ($\sigma_{в.св} = 340\text{--}360 \text{ МПа}$, $KCU_{шов} = 180 \text{ кДж/м}^2$), что может быть вызвано большей скоростью кристаллизации металла сварного шва. При увеличении скорости сварки с 36 до 72 м/ч свойства сварного соединения толщиной 40 мм практически не изменяются.

Для оценки характера разрушения сварных швов, изготовленных по различным режимам ЭЛС, провели фрактографический анализ изломов образцов сварных соединений толщиной 12 мм после испытаний на ударную вязкость (рис. 11). Установлено, что разрушение происходит по сварному шву по механизму вязкого среза внутризеренно

с образованием мелкоячеистого рельефа. На границах ямок присутствуют множественные интерметаллидные включения кристаллизационного происхождения на основе Cu и Li (рис. 11, д, е), которые оказывают охрупчивающее действие. Значительного различия в изломах образцов в зависимости от $V_{св}$ не выявлено.

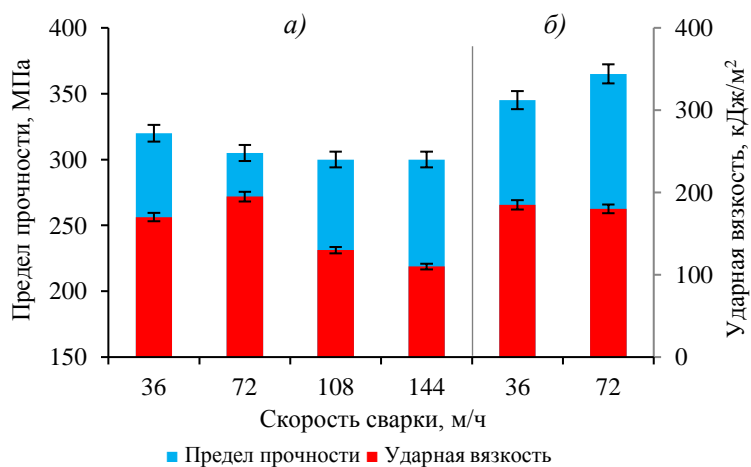


Рис. 10. Зависимость механических свойств сварных соединений прессованных полос из сплава В-1469 от скорости сварки при толщине заготовок 12 (а) и 40 мм (б)

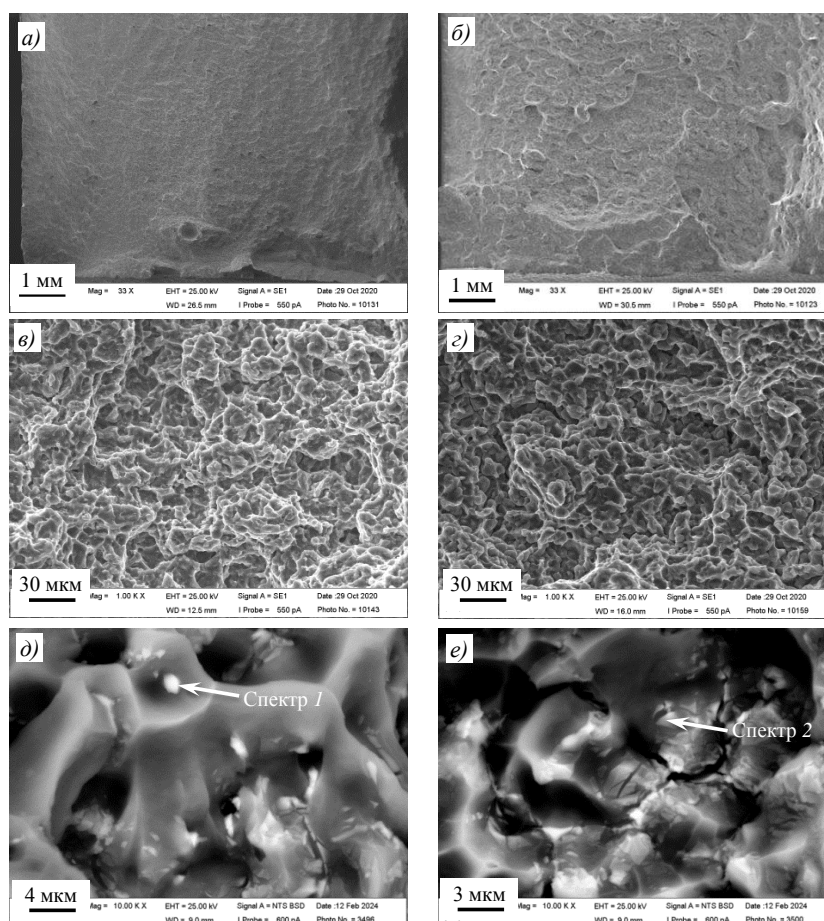


Рис. 11. Общий вид изломов сварных соединений толщиной 12 мм, выполненных электронно-лучевой сваркой при скорости 36 (а, в, д) и 144 м/ч (б, г, е), после испытаний на ударную вязкость

Заключения

В данной работе исследованы особенности микроструктуры, механические свойства и характер разрушения сварных соединений толщиной 12 или 40 мм, полученных ЭЛС прессованных полос из высокопрочного сплава В-1469 системы Al–Cu–Li.

Сварные соединения, полученные ЭЛС, характеризуются следующим уровнем механических характеристик:

– при толщине 12 мм и $V_{св} = 36$ м/ч: $\sigma_{в,св} = 320$ МПа, $\sigma_{в,св}/\sigma_{в} = 0,50$, $KCU_{шов} = 170$ кДж/м²;

– при толщине 40 мм и $V_{св} = 72$ м/ч: $\sigma_{в} = 360$ МПа, $\sigma_{в,св}/\sigma_{в} = 0,55$, $KCU_{шов} = 180$ кДж/м².

При увеличении скорости сварки с 36 до 144 м/ч свойства сварного соединения толщиной 12 мм имеют тенденцию к снижению.

Распределение микротвердости в поперечном сечении сварных соединений имеет V-образную форму с минимумом в зоне сварного шва (80 HV) и максимумом в основном металле (180 HV). Полученные значения механических свойств и характер разрушения в значительной степени определяются особенностями микроструктуры сварных соединений.

Показано, что при ЭЛС прессованных полос из сплава В-1469 образуются околосшовные ликвационные трещины в зоне сплавления на границах волокон, на которых располагаются охрупчивающие прослойки легкоплавких интерметаллидных фаз кристаллизационного происхождения, содержащих медь и литий. Для сварного соединения толщиной 12 мм вероятность образования трещин возрастает с увеличением скорости сварки.

Метод ЭЛС позволяет получить благоприятную структуру сварного шва в отличие от многопроходной аргоно-дуговой сварки. Сварные швы имеют относительно равномерную мелкозернистую структуру, при этом в верхней части шва образуются более крупные (<100 мкм) зерна, в нижней – более мелкие (<20 мкм). На границах зерен шва расположены выделения неравновесной эвтектики, которые, согласно результатам термодинамического расчета, должны соответствовать преимущественно следующим фазам с медью: $T_1(Al_2CuLi)$, $\theta(Al_2Cu)$, $T_B(Al_7Cu_4Li)$, $S(Al_2CuMg)$. Методом ДСК установлен температурный интервал плавления неравновесной эвтектики в сварном шве, который составил 510–540 °С.

Фрактографический анализ показал, что при испытаниях на ударную вязкость образцы разрушаются по сварному шву по механизму вязкого среза по алюминиевой матрице с образованием мелкоямочного рельефа. При этом на границах ямок присутствуют множественные интерметаллидные включения кристаллизационного происхождения на основе меди и лития, оказывающие охрупчивающее действие.

Методами ПЭМ и ДСК изучены фазовые превращения в различных зонах сварного соединения. Установлено, что в ЗТВ высокотемпературный нагрев при сварке приводит к сохранению термически стабильных дисперсоидов β' -фазы ($Al_3(Zr, Sc)$), частичному растворению упрочняющих частиц $T_1(\Omega')$ -фазы и практически полному растворению θ' -фазы, что вызывает снижение прочности. Дальнейший нагрев вызывает повторное выделение метастабильных фаз, что указывает на возможность упрочнения ЗТВ с помощью искусственного старения.

Для повышения комплекса механических свойств сварных соединений из сплава В-1469, выполненных ЭЛС, перспективно применение упрочняющей термической обработки (заковки, старения), что будет исследовано в дальнейшей работе.

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность специалистам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ С.В. Сбитневой, А.А. Левченко и С.И. Пахомкину за вклад в проведение исследований методами электронной микроскопии и ДСК.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Оглодкова Ю.С., Оглодков М.С. Опыт и перспективы применения алюминий-литиевых сплавов в изделиях авиационной и космической техники // *Металлург.* 2021. № 1. С. 62–70.
2. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе // *Цветные металлы.* 2016. № 8 (884). С. 86–91.
3. 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.
4. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Лукина Е.А. Тенденции развития алюминий-литиевых сплавов и технологии их обработки / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2019. 367 с.
5. Грушко О.Е., Овсянников Б.В., Овчинников В.В. Алюминиево-литиевые сплавы: металлургия, сварка, металловедение. М.: Наука, 2014. 296 с.
6. Бецофен С.Я., Антипов В.В., Князев М.И. Сплавы систем Al–Cu–Li и Al–Mg–Li: фазовый состав, текстура и анизотропия механических свойств (обзор) // *Деформация и разрушение материалов.* 2015. № 11. С. 10–26.
7. Елагин В.И., Захаров В.В. Современные Al–Li-сплавы и перспективы их развития // *Технология легких сплавов.* 2013. № 4. С. 17–23.
8. Овсянников Б.В., Комаров С.Б. Развитие производства деформированных полуфабрикатов из алюминиево-литиевых сплавов в ОАО «КУМЗ» // *Технология легких сплавов.* 2014. № 1. С. 97–103.
9. Prasad N.E., Gokhale A., Wanhill R.J.H. Aluminium-lithium alloys: processing, properties, and applications. Amsterdam: Elsevier, 2014. 652 p.
10. Dorin T., Vahid A., Lamb J. Aluminium lithium alloys // *Fundamentals of aluminium metallurgy.* Cambridge: Woodhead Publishing, 2018. P. 387–438. DOI: 10.1016/B978-0-08-102063-0.00011-4.
11. Starke E.A.(Jr.) Historical development and present status of aluminium-lithium alloys // *Aluminium-lithium alloys. Processing, properties and applications.* Oxford: Elsevier Inc., 2014. P. 3–26.
12. Rioja R.J., Liu J. The Evolution of Al–Li Base Products for Aerospace and Space Applications // *Metallurgical and Materials Transactions A.* 2012. Vol. 43. No. 9. P. 25–37.
13. Антипов В.В., Ткаченко Е.А., Зайцев Д.В., Селиванов А.А., Овсянников Б.В. Влияние режимов гомогенизационного отжига на структурно-фазовое состояние и механические свойства слитков из алюминий-литиевого сплава 1441 // *Труды ВИАМ.* 2019. № 3 (75). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-44-52.
14. Оглодков М.С., Романенко В.А., Бенариев И., Рудченко А.С., Григорьев М.В. Исследование промышленных полуфабрикатов из перспективных алюминий-литиевых сплавов для авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии.* 2023. № 3 (72). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-62-77.
15. Шаронов Н.И., Шарапов М.Г. Управление процессом формирования сварного соединения при электронно-лучевой сварке алюминиевых сплавов повышенных толщин // *Вопросы металловедения.* 2018. № 2 (94). С. 167–174.
16. Бондарев А.А., Нестеренков В.М. Электронно-лучевая сварка тонколистовых объемных конструкций из алюминиевых сплавов // *Автоматическая сварка.* 2011. № 6. С. 43–47.
17. Скальский Е.Г., Ботвина Л.Р., Лясота И.Н. Особенности структурной и механической неоднородности в сварных соединениях сплава 1201-T, выполненных электронно-лучевой сваркой // *Автоматическая сварка.* 2012. № 7. С. 19–23.
18. Терновой Е.Г., Бондарев А.А. Электронно-лучевая сварка толстостенных обечаек из алюминиевых сплавов АМг6 и М40 // *Автоматическая сварка.* 2012. № 4. С. 8–14.
19. Трошин А.А., Шепелевич М.В. Повышение качества сварных соединений из алюминиевых сплавов при электронно-лучевой сварке // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики.* 2013. Т. 1. № 9. С. 119–120.

20. Ерыпалов Л.А., Ковалев Д.С. Оптимизация технологии электронно-лучевой сварки изделий из алюминиевых сплавов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2012. Т. 1. № 8. С. 91–93.
21. Башенко В.В., Шаронов Н.И. Особенности электронно-лучевой сварки прессованно-штампованных алюминиевых сплавов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2010. № 3 (106). С. 139–143.
22. Cam G., Ventzke V., Dos Santos J.F. et al. Characterization of electron beam welded aluminium alloys // Science and Technology of Welding and Joining. 1999. Vol. 4. No. 5. P. 317–323.
23. Chen G., Yin Q., Zhang G., Zhang B. Underlying causes of poor mechanical properties of aluminum-lithium alloy electron beam welded joints // Journal of Manufacturing Processes. 2020. Vol. 50. P. 216–223.
24. Hosseini S.A., Abdollah-Zadeh A., Naffakh-Moosavy H., Mehri A. Elimination of hot cracking in the electron beam welding of AA2024-T351 by controlling the welding speed and heat input // Journal of Manufacturing Processes. 2019. Vol. 46. P. 147–158.
25. Chen G., Yin Q., Zhang G., Zhang B. Fusion-diffusion electron beam welding of aluminum-lithium alloy with Cu nano-coating // Materials and Design. 2020. Vol. 188. P. 108439.
26. Bárta J., Šimeková B., Marônek M., Dománková M. Electron Beam Welding of 2099-T83 aluminum-lithium alloy thick plates // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 269. Art. 02010.
27. Сорокин Л.И. Образование горячих трещин в околошовной зоне при сварке жаропрочных никелевых сплавов (обзор) // Сварочное производство. 2005. № 8. С. 38–43.
28. Самарина М.В., Алов А.А., Елагин В.И., Козловская В.П. Влияние структуры свариваемых полуфабрикатов из алюминиевых сплавов на чувствительность к околошовным трещинам // Технология легких сплавов. 1976. № 11. С. 7–11.
29. Маликов А.Г., Оришич А.М. Получение высокопрочных лазерных сварных соединений алюминиевых сплавов авиационного назначения // Фотоника. 2019. Т. 13. № 4. С. 356–366.
30. Белянин В.П., Денисов Б.С., Мейлах А.И. и др. Особенности формирования зоны сплавления сварных швов сплава 1420 // Авиационная промышленность. 1989. № 9. С. 70.
31. Иванов С.Ю., Кархин В.А., Михайлов В.Г. и др. Моделирование образования ликвационных трещин при лазерной сварке Al–Mg–Si сплавов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. Вып. 6. Ч. 2. С. 66–74.
32. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Шамрай В.Ф., Ключков Г.Г. Высокопрочный конструкционный Al–Cu–Li–Mg-сплав пониженной плотности, легированный серебром // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007. № 6 (624). С. 3–7.
33. Истомина-Кастровский В.В., Шамрай В.Ф., Грушко О.Е., Ключкова Ю.Ю., Рязанцева М.А. Влияние добавок серебра, магния, циркония на старение сплава В-1469 системы Al–Cu–Li // Металлы. 2010. № 5. С. 73–78.
34. 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: 21.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-2-2.
35. 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: 25.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-35-46.
36. 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.
37. Овчинников В.В., Грушко О.Е., Алексеев В.В. и др. Структура и свойства сварных соединений алюминий-литиевого сплава В-1469, полученных электронно-лучевой сваркой // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 5. С. 7–11.

38. Махин И.Д., Николаев В.В., Петровичев П.С. Исследование свариваемости сплавов В-1469 и 01570С с использованием электронно-лучевой сварки применительно к конструкции перспективного пилотируемого корабля // Космическая техника и технологии. 2014. № 4. С. 68–75.
39. Егоров Р.В., Овчинников В.В. Электронно-лучевая сварка алюминиевых сплавов на основе системы Al–Cu–Li // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Т. 15. № 7. С. 294–298.
40. Jia M., Zheng Z., Gong Z. Microstructure evolution of the 1469 Al–Cu–Li–Sc alloy during homogenization // Journal of alloys and compounds. 2014. Vol. 614. P. 131–139.
41. Фриндлярдер И.Н., Сандлер В.С., Лукин В.И. Тепловые испытания сплавов из Al–Mg–Li // Металловедение и термическая обработка металлов. 1991. № 2. С. 38–40.
42. Examilioti T., Li W., Kashaev L. et al. On anisotropic tensile mechanical behavior of Al–Cu–Li AA2198 alloy under different ageing conditions // Journal of materials research and technology. 2023. Vol. 24. P. 895–908.
43. Каблов Е.Н., Лукина Е.А., Сбитнева С.В., Хохлатова Л.Б., Зайцев Д.В. Формирование метастабильных фаз при распаде твердого раствора в процессе искусственного старения Al-сплавов // Технология легких сплавов. 2016. № 3. С. 7–17.
44. Фомина М.А., Кутырев А.Е., Ключкова Ю.Ю., Сбитнева С.В. Исследование коррозионных характеристик высокопрочного сплава системы Al–Cu–Li в зависимости от различных режимов термической обработки // Авиационные материалы и технологии. 2016. № S2 (44). С. 39–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-39-48.
45. Lequeu Ph., Smith K.P., Danielou A. Aluminum-copper-lithium alloy 2050 developed for medium to thick plate // Journal of Materials Engineering and Performance. 2010. Vol. 19 (6). P. 841–847.
46. Yang Q., Lei L., Fan X. et al. Microstructure evolution and processing map of Al–Cu–Li–Mg–Ag alloy // Materials Chemistry and Physics. 2020. Vol. 254. P. 123256.
47. Jiang N., Xiang G., Zi-Qiao Z. Microstructure evolution of aluminum-lithium alloy 2195 undergoing commercial production // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2010. Vol. 20. P. 740–745.
48. Овчинников В.В., Егоров Р.В. Пористость швов при электронно-лучевой сварке алюминиевых сплавов, легированных литием // Вестник ИГЭУ. 2006. Вып. 4. С. 1–5.
49. Лощинин Ю.В., Пахомкин С.И., Фокин А.С. Влияние скорости нагревания при исследовании фазовых превращений в алюминиевых сплавах методом ДСК // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 2. С. 3–6.
50. Колобнев Н.И., Рябова Е.Н., Хохлатова Л.Б., Оглодков М.С. Особенности структуры слитков из сплавов системы Al–Cu–Li в зависимости от химического состава // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2016. № 3. С. 69–80. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-3-69-80.

References

1. Kablov E.N., Antipov V.V., Oglodkova Yu.S., Oglodkov M.S. Experience and prospects for the use of aluminum-lithium alloys in aviation and space technology products. *Metallurg*, 2021, no. 1, pp. 62–70.
2. Kablov E.N., Antipov V.V., Klochkova Yu.Yu. New generation aluminum-lithium alloys and layered aluminum-fiberglass plastics based on them. *Tsvetnye metally*, 2016, no. 8 (884), pp. 86–91.
3. 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.
4. Kolobnev N.I., Khokhlatova L.B., Lukina E.A. *Trends in the development of aluminum-lithium alloys and technologies for their processing*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2019, 367 p.
5. Grushko O.E., Ovsyannikov B.V., Ovchinnikov V.V. *Aluminum-lithium alloys: metallurgy, welding, metal science*. Moscow: Nauka, 2014, 296 p.

6. Betsofen S.Ya., Antipov V.V., Knyazev M.I. Alloys of the Al–Cu–Li and Al–Mg–Li systems: phase composition, texture and anisotropy of mechanical properties (review). *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2015, no. 11, pp. 10–26.
7. Elagin V.I., Zakharov V.V. Modern Al–Li alloys and prospects for their development. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2013, no. 4, pp. 17–23.
8. Ovsyannikov B.V., Komarov S.B. Development of production of deformed semi-finished products from aluminum-lithium alloys at JSC KUMZ. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2014, no. 1, pp. 97–103.
9. Prasad N.E., Gokhale A., Wanhill R.J.H. *Aluminium-lithium alloys: processing, properties, and applications*. Amsterdam: Elsevier, 2014, 652 p.
10. Dorin T., Vahid A., Lamb J. Aluminium lithium alloys. *Fundamentals of aluminium metallurgy*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2018, pp. 387–438. DOI: 10.1016/B978-0-08-102063-0.00011-4.
11. Starke E.A.(Jr.) Historical development and present status of aluminium-lithium alloys. *Aluminium-lithium alloys. Processing, properties and applications*. Oxford: Elsevier Inc., 2014, pp. 3–26.
12. Rioja R.J., Liu J. The Evolution of Al–Li Base Products for Aerospace and Space Applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, vol. 43, no. 9, pp. 25–37.
13. Antipov V.V., Tkachenko E.A., Zajtsev D.V., Selivanov A.A., Ovsyannikov B.V. The influence of homogenizing annealing regimes on the structural phase state and mechanical properties of aluminum-lithium alloy 1441 ingots. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 18, 2023). DOI: 0.18577/2307-6046-2019-0-3-44-52.
14. Oglodkov M.S., Romanenko V.A., Benarieb I., Rudchenko A.S., Grigoryev M.V. Study of industrial semi-finished products from advanced aluminum-lithium alloys for aircraft products. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 18, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-62-77.
15. Sharonov N.I., Sharapov M.G. Control of the process of formation of a welded joint during electron beam welding of aluminum alloys of increased thickness. *Voprosy materialovedenia*, 2018, no. 2 (94), pp. 167–174.
16. Bondarev A.A., Nesterenkov V.M. Electron beam welding of thin-sheet volumetric structures made of aluminum alloys. *Avtomaticheskaya svarka*, 2011, no. 6, pp. 43–47.
17. Skalsky E.G., Botvina L.R., Lyasota I.N. Features of structural and mechanical heterogeneity in welded joints of alloy 1201-T, made by electron beam welding. *Avtomaticheskaya svarka*, 2012, no. 7, pp. 19–23.
18. Ternovoy E.G., Bondarev A.A. Electron beam welding of thick-walled shells made of aluminum alloys AMg6 and M40. *Avtomaticheskaya svarka*, 2012, no. 4, pp. 8–14.
19. Troshin A.A., Shepelevich M.V. Improving the quality of welded joints made of aluminum alloys during electron beam welding. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2013, vol. 1, no. 9, pp. 119–120.
20. Erypalov L.A., Kovalev D.S. Optimization of electron beam welding technology for products made of aluminum alloys. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2012, vol. 1, no. 8, pp. 91–93.
21. Bashenko V.V., Sharonov N.I. Features of electron beam welding of pressed-stamped aluminum alloys. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 3 (106), pp. 139–143.
22. Cam G., Ventzke V., Dos Santos J.F. et al. Characterization of electron beam welded aluminium alloys. *Science and Technology of Welding and Joining*, 1999, vol. 4, no. 5, pp. 317–323.
23. Chen G., Yin Q., Zhang G., Zhang B. Underlying causes of poor mechanical properties of aluminum-lithium alloy electron beam welded joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 50, pp. 216–223.
24. Hosseini S.A., Abdollah-Zadeh A., Naffakh-Moosavy H., Mehri A. Elimination of hot cracking in the electron beam welding of AA2024-T351 by controlling the welding speed and heat input. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 46, pp. 147–158.

25. Chen G., Yin Q., Zhang G., Zhang B. Fusion-diffusion electron beam welding of aluminum-lithium alloy with Cu nano-coating. *Materials and Design*, 2020, vol. 188, p. 108439.
26. Bárta J., Šimeková B., Marônek M., Dománková M. Electron Beam Welding of 2099-T83 aluminum-lithium alloy thick plates. *MATEC Web of Conferences*, 2019, vol. 269, art. 02010.
27. Sorokin L.I. Formation of hot cracks in the heat-affected zone during welding of heat-resistant nickel alloys (review). *Svarochnoe proizvodstvo*, 2005, no. 8, pp. 38–43.
28. Samarina M.V., Alov A.A., Elagin V.I., Kozlovskaya V.P. Influence of the structure of welded semi-finished products from aluminum alloys on the sensitivity to heat-affected cracks. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 1976, no. 11, pp. 7–11.
29. Malikov A.G., Orisic A.M. Preparation of high-strength laser welded joints of aluminum alloys for aviation purposes. *Fotonika*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 356–366.
30. Belyanin V.P., Denisov B.S., Meilakh A.I. et al. Features of the formation of the fusion zone of welds of alloy 1420. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1989, no. 9, p. 70.
31. Ivanov S.Yu., Karkhin V.A., Mikhailov V.G. et al. Modeling of the formation of liquation cracks during laser welding of Al–Mg–Si alloys. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*, 2015, is. 6, part 2, pp. 66–74.
32. Fridlyander I.N., Grushko O.E., Shamray V.F., Klochkov G.G. High-strength structural Al–Cu–Li–Mg alloy of low density, alloyed with silver. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2007, no. 6 (624), pp. 3–7.
33. Istomin-Kastrosky V.V., Shamray V.F., Grushko O.E., Klochkova Yu.Yu., Ryazantseva M.A. The influence of additions of silver, magnesium, zirconium on the aging of the B-1469 alloy of the Al–Cu–Li system. *Metally*, 2010, no. 5, pp. 73–78.
34. 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. 02. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: December 21, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-2-2.
35. Pantelev 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: December 25, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-35-46.
36. 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.
37. Ovchinnikov V.V., Grushko O.E., Alekseev V.V. et al. Structure and properties of welded joints of aluminum alloy V-1469 obtained by electron beam welding. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyenii*, 2012, no. 5, pp. 7–11.
38. Makhin I.D., Nikolaev V.V., Petrovichev P.S. Study of the weldability of alloys V-1469 and O1570S using electron beam welding in relation to the design of a promising manned spacecraft. *Kosmicheskaya tekhnika i tehnologii*, 2014, no. 4, pp. 68–75.
39. Egorov R.V., Ovchinnikov V.V. Electron beam welding of aluminum alloys based on the Al–Cu–Li system. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyenii*, 2017, vol. 15, no. 7, pp. 294–298.
40. Jia M., Zheng Z., Gong Z. Microstructure evolution of the 1469 Al–Cu–Li–Sc alloy during homogenization. *Journal of alloys and compounds*, 2014, vol. 614, pp. 131–139.
41. Frindlyander I.N., Sandler V.S., Lukin V.I. Thermal tests of Al–Mg–Li alloys. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*, 1991, no. 2, pp. 38–40.
42. Examilioti T., Li W., Kashaev L. et al. On anisotropic tensile mechanical behavior of Al–Cu–Li AA2198 alloy under different ageing conditions. *Journal of materials research and technology*, 2023, vol. 24, pp. 895–908.
43. Kablov E.N., Lukina E.A., Sbitneva S.V., Khokhlatova L.B., Zaitsev D.V. Formation of metastable phases during the decomposition of a solid solution during artificial aging Al-alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2016, no. 3, pp. 7–17.

44. Fomina M.A., Kutyrav A.E., Klochkova Yu.Yu., Sbitneva S.V. Research of corrosion characteristics of high-strength alloy of Al–Cu–Li system depending on various modes of heat treatment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. S2, pp. 39–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-39-48.
45. Lequeu Ph., Smith K.P., Danielou A. Aluminum-copper-lithium alloy 2050 developed for medium to thick plate. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2010, vol. 19 (6), pp. 841–847.
46. Yang Q., Lei L., Fan X. et al. Microstructure evolution and processing map of Al–Cu–Li–Mg–Ag alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, vol. 254, p. 123256.
47. Jiang N., Xiang G., Zi-Qiao Z. Microstructure evolution of aluminum-lithium alloy 2195 undergoing commercial production. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, vol. 20, pp. 740–745.
48. Ovchinnikov V.V., Egorov R.V. Porosity of welds during electron beam welding of aluminum alloys alloyed with lithium. *Vestnik IGEU*, 2006, is. 4, pp. 1–5.
49. Loshchinin Yu.V., Pakhomkin S.I., Fokin A.S. Influence of speed of heating at research of phase transformations in aluminum alloys DSC method. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2011, no. 2, pp. 3–6.
50. Kolobnev N.I., Ryabova E.N., Khokhlatova L.B., Oglodkov M.S. Features of the structure of ingots from alloys of the Al–Cu–Li system depending on the chemical composition. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser.: Mashinostroyeniye*, 2016, no. 3, pp. 69–80. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-3-69-80.

Информация об авторах

Бенариеб Ильяс, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Романенко Валерия Андреевна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Оглодков Михаил Сергеевич, заместитель начальника научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Овчинников Виктор Васильевич, заведующий кафедрой, д.т.н., Московский политехнический университет, mospolytech@mospolytech.ru

Филонова Елена Владимировна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Pyas Benarieb, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valeria A. Romanenko, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Mikhail S. Oglodkov, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Victor V. Ovchinnikov, Head of Department, Doctor of Sciences (Tech.), Moscow Polytechnic University, mospolytech@mospolytech.ru

Elena V. Philonova, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 21.03.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.03.2024.

The article was submitted 21.03.2024; approved and accepted for publication after reviewing 28.03.2024.