



УДК 621.791.1:691.77.001.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-6-6

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЙЛИТИЕВЫХ
СПЛАВОВ**

В.И. Лукин

доктор технических наук

Е.Н. Иода

М.Д. Пантелеев

А.А. Скупов

Апрель 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 621.791.1:691.77.001.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-6-6

В.И. Лукин¹, Е.Н. Иода¹, М.Д. Пантелеев¹, А.А. Скупов¹

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЙЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ

Установлено, что максимальный уровень характеристик прочности достигается при проведении полной термообработки (закалка+искусственное старение) после сварки. Термическая обработка сварных соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием, приводит к выравниванию структурной неоднородности и устранению разупрочнения по зоне термического влияния. Послесварочные режимы термообработки практически не оказывают влияния на защитные свойства неметаллических неорганических покрытий.

Ключевые слова: *сварка трением с перемешиванием, сварка алюминийлитиевых сплавов, механические свойства, термообработка, коррозионная стойкость, защитные покрытия.*

V.I. Lukin, E.N. Ioda, M.D. Panteleev, A.A. Scupov

HEAT TREATMENT INFLUENCE ON CHARACTERISTICS OF WELDING JOINTS OF HIGH-STRENGTH ALUMINUM-LITHIUM ALLOYS

It was determined that the maximum level of strength is achieved after full heat treatment (quenching and artificial ageing) after welding. Heat treatment of welded joints made by friction stir welding leads to structural heterogeneity alignment and removal of weakening of the heat affected zone. After-welding modes of heat treatment do not practically influence the protective properties of non-metallic inorganic coatings.

Keywords: *friction stir welding, aluminum lithium alloys welding, mechanical properties, heat treatment, corrosion resistance, protective coating.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

По данным отечественных и зарубежных источников уровень прочности сварных соединений высокопрочных алюминийлитиевых сплавов, выполненных сваркой трением с перемешиванием (СТП), составляет 0,75–0,8 от прочности самого сплава. Получить равнопрочные с основным материалом соединения возможно путем применения термической обработки после сварки [1–17]. Поэтому целью данной работы являлось исследование влияния термической обработки на механические свойства и коррозионную стойкость сварных соединений сплавов В-1461 и В-1469.

Сварные узлы из алюминиевых сплавов зачастую эксплуатируются в условиях, способствующих коррозионному поражению металла сварного соединения. Основными покрытиями для защиты от коррозии алюминиевых сплавов являются неметаллические неорганические химические и анодно-оксидные покрытия. Особенности химического состава и структуры новых алюминиевых сплавов и их сварных соединений требуют разработки технологии получения неметаллических неорганических покрытий, позволяющих обеспечить их применение для изделий, эксплуатирующихся в различных, в том числе и всеклиматических условиях. Легирование сплава литием и новыми легирующими компонентами приводит к изменению качества покрытий, формирующихся в электролитах, разработанных для алюминиевых сплавов. Поэтому в работе также исследовали защитные свойства покрытий, нанесенных на сварные соединения алюминийлитиевых сплавов. В научно-технической документации данные по защитным свойствам неметаллических неорганических покрытий на алюминийлитиевых сплавах и их сварных соединениях практически отсутствуют [18].

Методы исследования

Методы исследования и геометрические размеры образцов для определения механических характеристик (σ_b , α , КСЧ) сварных соединений соответствуют ГОСТ 6996–66 и ГОСТ 1497–84. Микротвердость определяли на твердомере EmcoTest DuraJet-10. Исследования микроструктуры проводили на инвертированном оптическом микроскопе Leica DM IRM с программно-аппаратным комплексом обработки изображения Image Expert Pro3x согласно ГОСТ 9.024–74.

Для нанесения защитных неорганических неметаллических покрытий образцы из алюминийлитиевых сплавов В-1461 и В-1469 предварительно обрабатывались в растворе HNO_3 . После предварительной обработки проведена подготовка поверхности пе-

ред нанесением неметаллических неорганических покрытий: образцы подвергали травлению в горячем (55°C) 5%-ном растворе NaOH и осветляли в 30%-ном растворе HNO₃. Анодно-оксидные покрытия наносили в электролите, содержащем 200 г/л H₂SO₄, при плотности анодного тока 1 А/дм² в течение 30 мин при температуре 20–21°C. Для сплава В-1461 напряжение на клеммах составляло 12–14 В; для сплава В-1469 напряжение на клеммах составляло 15–17 В. Электролит перемешивали механической мешалкой (60 об/мин). После проведения анодного оксидирования покрытие уплотняли в 5%-ном растворе K₂Cr₂O₇ при температуре 95–98°C в течение 20 мин.

Химические оксидные покрытия наносили в растворе, содержащем комплекс ингибиторов коррозии различной концентрации. Образцы с нанесенными неметаллическими покрытиями и без них выставили на экспозицию в камеру солевого тумана: с покрытием Ан.Окс.хр – на ≥ 750 ч и с покрытием Хим.Окс – на ≥ 168 ч).

Результаты и обсуждение

Исследовано влияние вариантов термообработки на механические свойства (σ_b , α , KCU) и коррозионную стойкость сварных соединений высокопрочных алюминийлитиевых сплавов В-1461 и В-1469.

Термическую обработку заготовок из сплавов В-1461 и В-1469 проводили по режимам, обеспечивающим максимальный уровень прочности. После СТП, выполненной по оптимальному режиму, проводили старение и закалку с последующим старением по режимам, принятым для основного материала. Сварные соединения высокопрочных алюминийлитиевых сплавов В-1461 и В-1469, полученные СТП, имеют уровень прочности, пластичности и ударной вязкости на 15–20% выше, чем у соединений, выполненных аргоно-дуговой сваркой, поэтому вполне могут использоваться без дополнительной последующей термообработки (табл. 1).

Проведенное после сварки искусственное старение не повышает прочность сварных соединений сплава В-1469. Прочностные характеристики сварных соединений сплава В-1461 повышаются на 15–20%. Максимальный уровень прочности ($\sigma_{b,cb}/\sigma_b \geq 0,9$) достигается при проведении полной термообработки сварных соединений сплавов В-1461 и В-1469. Значения пластичности, измеренные по углу изгиба, и ударной вязкости имеют высокий уровень: $\alpha=90-95$ град, KCU=200–300 кДж/м².

Таблица 1

Механические свойства* сварных соединений сплавов В-1461 и В-1469

Свойства	Значения свойств сварных соединений, выполненных сваркой по технологическому варианту		
	СТП	СТП+старение	СТП+закалка+старение
Сплав В-1461			
σ_B , МПа	<u>375–400</u> 390	<u>440–455</u> 450	<u>494–495</u> 495
$\sigma_{B,CB}/\sigma_B$	0,75	0,82	0,9
α , град	<u>65–70</u> 67	<u>69–77</u> 73	<u>91–95</u> 93
$KCU_{шОВ}$, кДж/м ²	<u>110–125</u> 115	<u>125–175</u> 155	<u>200–220</u> 210
Сплав В-1469			
σ_B , МПа	<u>425–465</u> 435	<u>410–470</u> 440	<u>500–502</u> 500
$\sigma_{B,CB}/\sigma_B$	0,8	0,81	0,92
α , град	<u>85–95</u> 90	<u>84–90</u> 87	<u>94–96</u> 95
$KCU_{шОВ}$, кДж/м ²	<u>245–350</u> 280	<u>272–289</u> 280	<u>281–309</u> 295

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Замер микротвердости на шлифах сварных соединений сплавов В-1461 и В-1469 показал, что особенностью формирования сварных соединений при СТП является снижение микротвердости в районе перехода от зоны термомеханического к зоне термического воздействия, где и происходит разрушение при механических испытаниях (рис. 1). Зона термического влияния при СТП составляет ~10 мм.

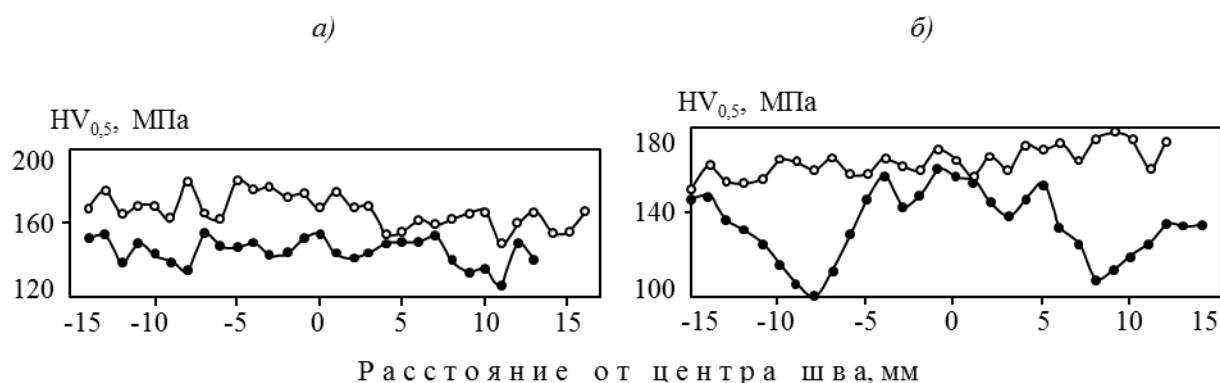


Рис. 1. Распределение микротвердости в поперечном сечении сварных соединений сплавов В-1469 (а) и В-1461 (б), выполненных сваркой трением с перемешиванием (●) и с последующей термической обработкой (○)

Применение термической обработки сварных соединений приводит к выравниванию структурной неоднородности сварных соединений и отсутствию разупрочнения в зоне термического влияния.

Исследовали влияние режимов термической обработки на микроструктуру сварных соединений сплавов В-1461 и В-1469.

Ядро сварного шва имеет мелкозернистую равноосную структуру несколько вытянутую на периферии в направлении вращения инструмента (рис. 2). Размер зерна составляет 3–5 мкм для сплава В-1461 и 6–10 мкм для сплава В-1469. Применение последующей термообработки не приводит к изменению размера зерна сварного соединения сплава В-1469. Для сплава В-1461 размер зерна после старения и особенно после закалки и старения увеличивается в ~2 раза – до 10 мкм.

Структура переходной зоны, формирующаяся при СТП, значительно отличается на входе (сторона набегания) и на выходе инструмента (рис. 3). Со стороны набегания инструмента (см. рис. 3, б) пластическая деформация проходит в большей степени, чем со стороны выхода (см. рис. 3, а). Последующая термическая обработка сварных соединений сплава В-1461 приводит к незначительному росту зерна в слоях металла с различной протравливаемостью.

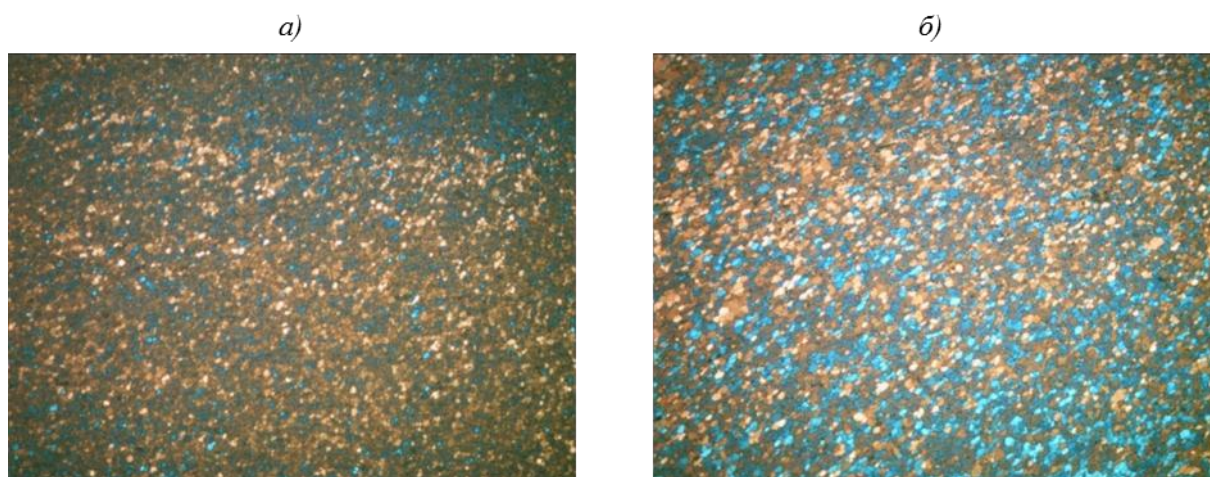


Рис. 2. Микроструктура ($\times 200$) сварного шва сплавов В-1461 (а) и В-1469 (б)

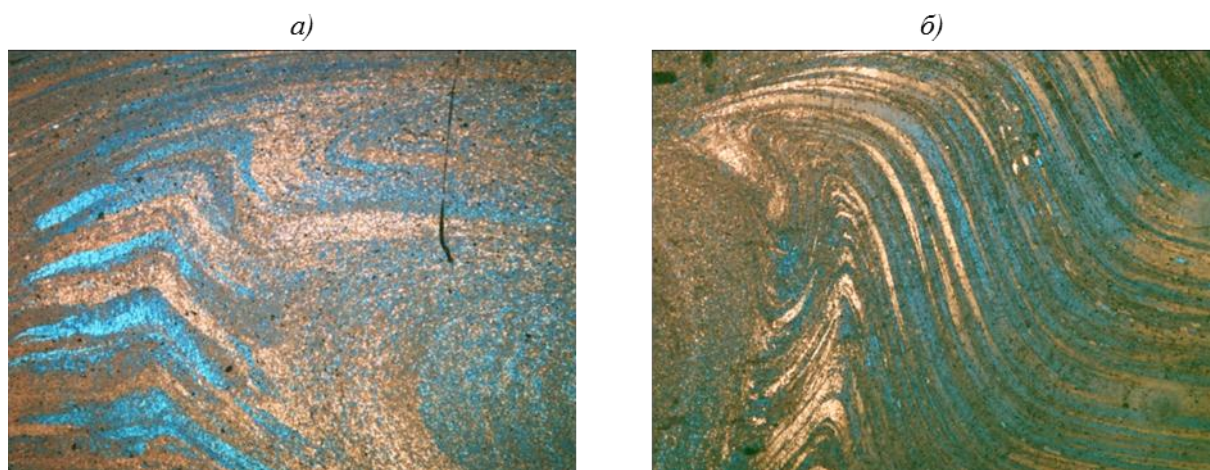


Рис. 3. Микроструктура ($\times 50$) переходной зоны сварных соединений сплава В-1461 со стороны выхода инструмента (а) и набегания инструмента (б)

Для исследования влияния вариантов термообработки на коррозионную стойкость сварных соединений, на изготовленные сварные образцы сплавов В-1461 и В-1469 нанесли защитные антикоррозионные покрытия (анодно-оксидные и химически оксидные).

Проведены ускоренные коррозионные испытания в камере солевого тумана (КСТ) сварных соединений с защитными неметаллическими неорганическими покрытиями и без покрытий*.

Установлено, что сварные образцы из алюминийлитиевых сплавов В-1461 и В-1469 с анодно-оксидными и химически оксидными покрытиями, сформированными по стандартной технологии, выдержали испытания в КСТ без появления коррозионных поражений по шву и зоне термического влияния.

Послесварочные режимы термообработки практически не оказывают влияния на защитные свойства неметаллических неорганических покрытий.

Следует отметить, что коррозионная стойкость выше для образцов с меньшей шероховатостью поверхности сварного шва для обоих сплавов ($R_z \leq 40$ мкм) – рис. 4.

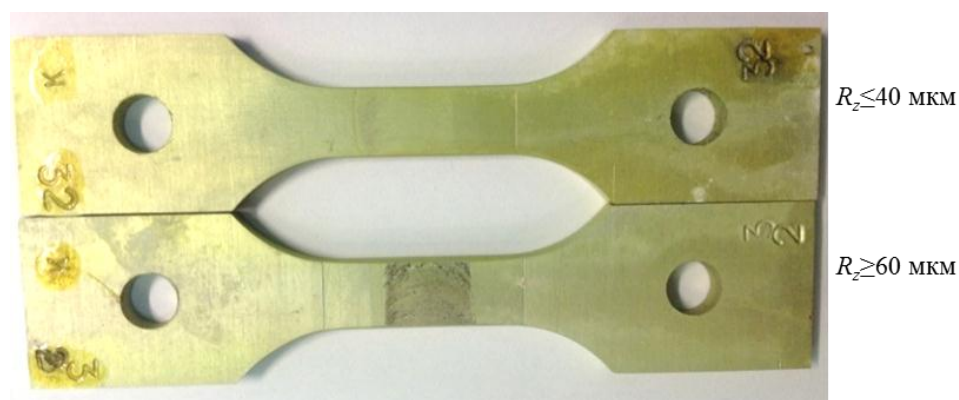


Рис. 4. Внешний вид сварных образцов с различной шероховатостью поверхности с анодно-оксидными покрытиями после испытаний в КСТ

Прочностные испытания сварных образцов с защитными покрытиями и без покрытий после выдержки в КСТ (табл. 2) показали, что потери прочности соединений без покрытий составляют от 7 до 19% в зависимости от варианта термообработки после сварки.

* Исследования коррозионной стойкости проведены М.А. Фоминой.

Таблица 2

Прочность сварных соединений после испытаний в КСТ

Вид термообработки после сварки	Тип защитного покрытия	Продолжительность экспозиции, сут	σ_B , МПа	Потери σ_B , %
Сплав В-1461				
Без термообработки	Без покрытия	7	368	5
	Химическое оксидирование	7	385	1
	Без покрытия	30	359	8
	Анодное оксидирование	30	388	0
Старение	Без покрытия	7	440	2
	Химическое оксидирование	7	435	3
	Без покрытия	30	425	5
	Анодное оксидирование	30	445	1
Закалка+старение	Без покрытия	7	465	6
	Химическое оксидирование	7	490	1
	Без покрытия	30	451	9
	Анодное оксидирование	30	481	3
Сплав В-1469				
Без термообработки	Без покрытия	7	438	0
	Химическое оксидирование	7	430	2
	Без покрытия	30	423	3
	Анодное оксидирование	30	427	2
Старение	Без покрытия	7	440	0
	Химическое оксидирование	7	440	0
	Без покрытия	30	426	3
	Анодное оксидирование	30	425	3
Закалка+старение	Без покрытия	7	480	4
	Химическое оксидирование	7	490	2
	Без покрытия	30	426	15
	Анодное оксидирование	30	495	1

Для образцов с анодно-оксидными и химически оксидными покрытиями потери прочности составляют от 0 до 4% в зависимости от варианта термообработки после СТП.

Заключения

1. Максимальный уровень характеристик прочности ($\sigma_{B,CB}/\sigma_B \geq 0,9$) достигается при проведении полной термообработки (закалка+искусственное старение) после сварки. Термическая обработка сварных соединений приводит к выравниванию структурной неоднородности и устранению разупрочнения в зоне термического влияния.

2. По результатам ускоренных испытаний сварных соединений на коррозионную стойкость в КСТ установлено, что сварные образцы сплавов В-1461 и В-1469 с покрытиями выдержали испытания без появления коррозионных поражений по шву и зоне термического влияния.

3. Послесварочные режимы термообработки практически не оказывают влияния на защитные свойства неметаллических неорганических покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Перспективные алюминиевые сплавы и технологии их соединения для изделий авиакосмической техники /В сб. Тезисов докладов II Международной конф. «Алюминий–21/Сварка и пайка». 2012. С. 8.
2. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
3. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
4. Панин В.Е., Каблов Е.Н., Почивалов Ю.И., Панин С.В., Колобнев Н.И. Влияние наноструктурирования поверхностного слоя алюминий-литиевого сплава 1424 на механизмы деформации, технологические характеристики и усталостную долговечность. Повышение пластичности и технологических характеристик //Физическая мезомеханика. 2012. Т. 15. №6. С. 107–111.
5. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 167–182.
6. Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л., Колобнев Н.И., Коваль Ю.Н. Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства. К.: Наукова думка. 1992.
7. Fridlyander I.N., Sister V.G., Grushko O.E., Berstenev V.V., Sheveleva L.M., Ivanova L.A. Aluminum alloys: promising materials in the automotive industry //Metal Science and Heat Treatment. 2002. Т. 44. №9–10. P. 365–370.
8. Клочкова Ю.Ю., Грушко О.Е., Ланцова Л.П., Бурляева И.П., Овсянников Б.В. Освоение в промышленном производстве полуфабрикатов из перспективного алюминийлитиевого сплава В-1469 //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 8–12.
9. Клочков Г.Г., Грушко О.Е., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.Ю. Промышленное освоение высокопрочного сплава В-1469 системы Al–Cu–Li–Mg //Труды ВИАМ. 2014. №7. Ст. 01 (viam-works.ru).
10. Саморуков М.Л. Аналитический подход к математическому моделированию температурной составляющей ротационной сварки трением //Труды ВИАМ. 2013. №9. Ст. 03 (viam-works.ru).
11. Лукин В.И., Оспенникова О.Г., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д. Сварка алюминиевых сплавов в авиакосмической промышленности //Сварка и диагностика. 2013. №2. С. 47–52.
12. Лукин В.И., Иода Е.Н., Базескин А.В. и др. Повышение надежности сварных соединений из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1461 //Сварочное производство. 2010. №11. С. 14–17.

13. Petrovic M., Veljic D., Rakin M., Radovic N., Sedmak A., Bajic N. Friction-stir welding of high-strength aluminium alloys and a numerical simulation of plunge stage //Materials in technology. 2012. V. 46. №3. P. 215–221.
14. Силис М.И., Елисеев А.А., Силис В.Э. и др. Особенности структуры сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных фрикционной сваркой //МиТОМ. 2009. №4. С. 34–39.
15. Лукин В.И., Иода Е.Н., Базескин А.В. и др. Особенности формирования сварного соединения при сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава В-1469 //Сварочное производство. 2012. №6. С. 30–36.
16. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминийлитиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 183–195.
17. Оглодков М.С., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И. и др. Влияние термомеханической обработки на свойства и структуру сплава системы Al–Cu–Mg–Li–Zn //Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 7–11.
18. Жиликов В.П., Каримова С.А., Лешко С.С., Чесноков Д.В. Исследование динамики коррозии алюминиевых сплавов при испытании в камере солевого тумана (КСТ) //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 18–22.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N., Lukin V.I., Ospennikova O.G. Perspektivnye aljuminievye splavy i tehnologii ih soedinenija dlja izdelij aviakosmicheskoy tehniky [Perspective aluminum alloys and technologies of their connection for products of aerospace equipment] /V sb. Tezisev dokladov II Mezhdunarodnoj konf. «Aljuminij–21/Svarka i pajka». 2012. S. 8.
2. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials science] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2008. №3. S. 2–14.
3. Kablov E.N. Sovremennye materialy – osnova innovacionnoj modernizacii Rossii [Modern materials – basis of innovative modernization of Russia] //Metally Evrazii. 2012. №3. S. 10–15.
4. Panin V.E., Kablov E.N., Pochivalov Ju.I., Panin S.V., Kolobnev N.I. Vlijanie nanostrukturirovanija poverhnostnogo sloja aljuminij-litievogo splava 1424 na mehanizmy deformacii, tehnologicheskie harakteristiki i ustalostnuju dolgovechnost'. Povyshenie plastichnosti i tehnologicheskikh harakteristik [Influence of nanostructuring surface layer aluminum-lithium alloy 1424 on deformation mechanisms, technical characteristics and fatigue life. Increase of plasticity and technical characteristics] //Fizicheskaja mezomehanika. 2012. T. 15. №6. S. 107–111.
5. Antipov V.V., Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Vahromov R.O. Aljuminievye deformiruemye splavy [Aluminum deformable alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 167–182.

6. Fridljander I.N., Chuistov K.V., Berezina A.L., Kolobnev N.I., Koval' Ju.N. Aljuminij-litievye splavy. Struktura i svojstva [Aluminum-lithium alloys. Structure and properties]. K.: Naukova dumka. 1992.
7. Fridlyander I.N., Sister V.G., Grushko O.E., Berstenev V.V., Sheveleva L.M., Ivanova L.A. Aluminum alloys: promising materials in the automotive industry //Metal Science and Heat Treatment. 2002. T. 44. №9–10. P. 365–370.
8. Klochkova Ju.Ju., Grushko O.E., Lancova L.P., Burljaeva I.P., Ovsjannikov B.V. Osvoenie v promyshlennom proizvodstve polufabrikatov iz perspektivnogo aljuminijlitievogo splava V-1469 [Development in industrial production of semi-finished products from perspective alyuminiylitievyy alloy V-1469] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №1. S. 8–12.
9. Klochkov G.G., Grushko O.E., Klochkova Ju.Ju., Romanenko V.Ju. Promyshlennoe osvoenie vysokoprochnogo splava V-1469 sistemy Al–Cu–Li–Mg [Industrial development of V-1469 high-strength alloy of Al–Cu–Li–Mg system] //Trudy VIAM. 2014. №7. St. 01 (viam-works.ru).
10. Samorukov M.L. Analiticheskij podhod k matematicheskomu modelirovaniju temperaturnoj sostavljajushhej rotacionnoj svarki treniem [Analytical approach to mathematical modeling of temperature component of rotational friction bonding] //Trudy VIAM. 2013. №9. St. 03 (viam-works.ru).
11. Lukin V.I., Ospennikova O.G., Ioda E.N., Panteleev M.D. Svarka aljuminievyh splavov v aviakosmicheskoj promyshlennosti [Welding of aluminum alloys in the aerospace industry] //Svarka i diagnostika. 2013. №2. S. 47–52.
12. Lukin V.I., Ioda E.N., Bazeskin A.V. i dr. Povyshenie nadezhnosti svarnyh soedinenij iz vysokoprochnogo aljuminievo-litievogo splava V-1461 [Increase of reliability of welded connections from high-strength aluminum-lithium alloy V-1461] //Svarochnoe proizvodstvo. 2010. №11. S. 14–17.
13. Petrovic M., Veljic D., Rakin M., Radovic N., Sedmak A., Bajic N. Friction-stir welding of high-strength aluminium alloys and a numerical simulation of plunge stage //Materials in technology. 2012. V. 46. №3. P. 215–221.
14. Silis M.I., Eliseev A.A., Silis V.Je. i dr. Osobennosti struktury svarnyh soedinenij aljuminievyh splavov, poluchennyh frikcionnoj svarkoj [Features of structure of welded compounds of the aluminum alloys received by frictional welding] //MiTOM. 2009. №4. S. 34–39.
15. Lukin V.I., Ioda E.N., Bazeskin A.V. i dr. Osobennosti formirovanija svarnogo soedinenija pri svarke treniem s peremeshivaniem aljuminievogo splava V-1469 [Features of forming of welded connection at friction bonding with V-1469 aluminum alloy hashing] //Svarochnoe proizvodstvo. 2012. №6. S. 30–36.
16. Antipov V.V., Kolobnev N.I., Hohlatova L.B. Razvitie aljuminijlitievyyh splavov i mnogostupenchatyh rezhimov termicheskoj obrabotki [Development of alyuminiylitievyy alloys

- and multistage modes of thermal processing] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 183–195.
17. Oglodkov M.S., Hohlatova L.B., Kolobnev N.I. i dr. Vliyanie termomehanicheskoy obrabotki na svojstva i strukturu splava sistemy Al–Cu–Mg–Li–Zn [Influence of thermomechanical processing on properties and Al–Cu–Mg–Li–Zn system alloy structure] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №4. S. 7–11.
18. Zhilikov V.P., Karimova S.A., Leshko S.S., Chesnokov D.V. Issledovanie dinamiki korrozii aljuminievyh splavov pri ispytanii v kamere solevogo tumana (KST) [Research of dynamics of corrosion of aluminum alloys when testing in the salt spray chamber (KST)] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №4. S. 18–22.