



УДК 669.715

doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-4-4

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МАССИВНЫХ
ПРЕССОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ
ВЫСОКОПРОЧНОГО АЛЮМИНИЙЛИТИЕВОГО
СПЛАВА В-1469**

Ю.Ю. Клочкова
кандидат технических наук

Г.Г. Клочков

В.А. Романенко

И.П. Бурляева

Сентябрь 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 669.715

doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-4-4

Ю.Ю. Клочкова¹, Г.Г. Клочков¹, В.А. Романенко¹, И.П. Бурляева¹

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МАССИВНЫХ ПРЕССОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО АЛЮМИНИЙЛИТИЕВОГО СПЛАВА В-1469

Повышение весовой эффективности перспективных изделий авиационно-космической техники возможно благодаря применению алюминийлитиевых сплавов, обладающих пониженной плотностью. Во ФГУП «ВИАМ» разработан высокопрочный сплав В-1469 системы Al–Cu–Li пониженной плотности, повышенной жесткости, дополнительно легированный микродобавками Ag, Sc и Zr. Разработана промышленная технология прессования массивных профилей из сплава В-1469. Выбрана температура прессования, исследовано влияние режимов термомеханической обработки на структуру и механические свойства профилей. Приведены результаты всесторонних исследований механических, коррозионных и эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: сплав В-1469, система Al–Cu–Li, прессование, профили, термомеханическая обработка, структура, механические свойства, коррозионная стойкость.

Y.Y. Klochkova, G.G. Klochkov, V.A. Romanenko, I.P. Burlyayeva

STRUCTURE AND PROPERTIES OF EXTRUDED PRODUCTS FROM HI-STRENGTH ALUMINIUM-LITHIUM ALLOY V-1469

An increase of weight efficiency of perspective aerospace vehicles is possible by using aluminium-lithium alloys with low density. Perspective, hi-strength, hi-stiffness, alloy V-1469, based on Al-Cu-Li system and alloyed with Ag, Sc and Zr, has been developed in VIAM. Industrial technology of manufacturing extruded products from V-1469 alloy was developed. Pressing temperature was chosen. Effects of heat treatment on

structure and mechanical properties were studied. Complex of mechanical, corrosion and resource characteristics was investigated.

Keywords: *alloy V-1469, Al–Cu–Li system, pressing, extrusions, heat treatment, structure, mechanical properties, corrosion resistance.*

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

Создание перспективных конкурентоспособных изделий авиационно-космической техники требует разработки и освоения промышленного производства новых материалов. Разработка новых композиций алюминиевых сплавов пониженной плотности, повышенной жесткости и прочности в сочетании с высокими ресурсными характеристиками, а также технологических параметров получения полуфабрикатов из них в условиях промышленного производства является актуальной задачей [1–4].

Одним из перспективных конструкционных материалов для авиационно-космической промышленности является высокопрочный ($\sigma_b \geq 580$ МПа) высокомодульный ($E=78$ ГПа) сплав В-1469 пониженной плотности ($d=2,67$ г/см³) системы Al–Cu–Li, дополнительно легированный Ag, Sc и Zr, разработанный в ВИАМ [5, 6]. Этот сплав по удельной прочности превосходит все существующие алюминиевые деформируемые сплавы и обладает высокой коррозионной стойкостью, трещиностойкостью и усталостной долговечностью [7], а также технологической пластичностью при литье и обработке давлением, что позволяет применять его для изготовления в промышленных условиях широкой номенклатуры полуфабрикатов [8, 9]. В настоящее время освоено промышленное производство листов толщиной 0,8–6 мм, плит толщиной 25–80 мм, пресованных профилей различного сечения и раскатных колец на серийном оборудовании ОАО «КУМЗ». Все вышеперечисленные полуфабрикаты и сварные соединения из листов и плит паспортизованы [10–13], за исключением раскатных колец.

Сплав В-1469-Т1 по сравнению с широко применяющимся в настоящее время сплавом В950.ч./п.ч.-Т2 обладает повышенными прочностью, жесткостью, сопротивлением коррозионному растрескиванию, сваривается всеми основными видами сварки. Сплав В-1469 имеет зарубежные сплавы-аналоги: 2195 – широко используется для сварных конструкций ракетно-космической техники [14, 15]; 2098 и 2198 – применяются в конструкциях самолетов компании Airbus. Сплав 2198 также применяется в сварных элементах фюзеляжа ракеты-носителя одноразового применения Space X Falcon 9 [17].

Применение прессованных полуфабрикатов из сплава В-1469 перспективно и для деталей внутреннего набора изделий авиационно-космической техники. В статье представлены результаты исследования структуры и свойств массивных прессованных полуфабрикатов.

Материал и методы

Материалом для исследований служили круглые слитки диаметром 405 мм и прессованные профили с толщиной полки 40–60 мм (площадь сечения 100 см²) из сплава В-1469, изготовленные в условиях промышленного металлургического производства ОАО «КУМЗ».

Микроструктуру прессованных профилей исследовали на шлифах размером 15×15 мм при помощи металлографического микроскопа Neophot30, оснащенного цифровой камерой фирмы Olympus. Травление шлифов проводили раствором Келлера следующего состава: HF (1 см³)+HCl (1,5 см³)+HNO₃ (2,5 см³)+вода (95 см³), с последующим осветлением в 10–20%-ном водном растворе азотной кислоты.

Исследования механических свойств при растяжении, усталостных характеристик, коррозионных свойств прессованных профилей из сплава В-1469, термообработанных по режиму T1, проведены с использованием современного сертифицированного оборудования в соответствии с действующими стандартами и методиками Российской Федерации.

Результаты

В условиях ОАО «КУМЗ» на промышленном плавильно-литейном агрегате массой 8 т с индукционной тигельной печью ИАТ-10/2,5 и электрическим вакуумным миксером проведена плавка сплава В-1469 и отлиты круглые слитки диаметром 405 мм. Химический состав сплава соответствует требованиям ОСТ 1 90048. Проведен гомогенизационный отжиг слитков по серийному режиму.

С целью выбора температурного интервала прессования проведено исследование механических свойств слитков при повышенных (350–480°C) температурах (рис. 1).

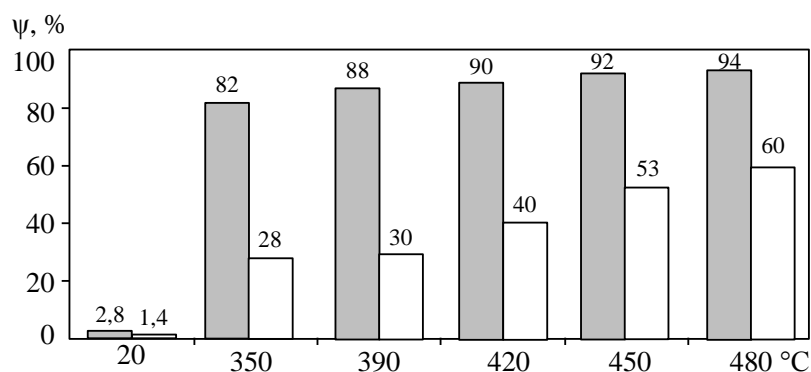


Рисунок 1. Механические свойства слитков из сплава В-1469 при высоких температурах: ■ – относительное сужение; □ – относительное удлинение

Установлено, что в температурном интервале 390–480°C достигаются практически максимальные значения характеристик пластичности ($\delta=30\text{--}60\%$, $\psi=88\text{--}94\%$). Это позволяет проводить горячую деформацию в указанном интервале температур. В результате для опробования технологии прессования были выбраны две температуры 390 и 480°C. Профили с толщиной полки 40–60 мм, с площадью сечения 100 см² изготовлены в одно очко на горизонтально-гидравлическом прессе с усилием 5000 тс из контейнера $\varnothing 370$ мм (рис. 2). Размеры заготовок под прессование $\varnothing 360 \times 640$ мм, скорость прессования 0,8 м/мин, коэффициент вытяжки 9,4%.

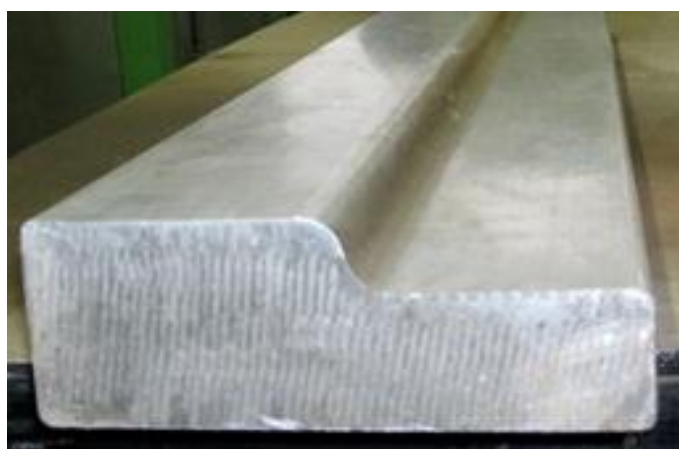


Рисунок 2. Внешний вид прессованного профиля из сплава В-1469

Анализ макроструктуры поперечного сечения профилей, отпрессованных при двух температурах, проведенный на образцах, отобранных с выходного и утяжинного концов, показал, что структура однородная мелкозернистая по всему сечению. Дефектов в виде плен, неметаллических включений, пористости не обнаружено (рис. 3).

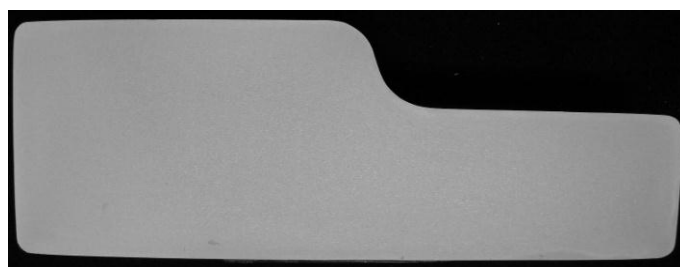


Рисунок 3. Макроструктура прессованных профилей из сплава В-1469

С утяжинного и выходного концов из толстой и тонкой части, соответственно, по всему сечению профилей, отпрессованных при двух температурах, в продольном направлении были отобраны образцы для проведения термообработки и испытаний

механических свойств с целью выбора оптимального режима. В лабораторных условиях опробованы различные температуры нагрева под закалку (510–530°С) с продолжительностью выдержки (90–250 мин). Правка растяжением профилей после закалки не проводилась.

Микроструктура полуфабрикатов из сплава В-1469 представляет собой тонкую волокнистую субзернистую структуру на периферии и крупнозернистую – в центральной части (зоне) профилей (рис. 4). Существенных различий в микроструктуре профилей, подвергшихся различным режимам термической обработки, не наблюдается.

Исследование распределения механических свойств по сечению профилей при двух температурах прессования показало, что прочностные характеристики в центральной зоне несколько ниже, чем на периферии, при более высоких значениях относительного удлинения ввиду пониженной теплопроводности сплава В-1469. Максимальный уровень прочности при сохранении высокой пластичности обеспечивает проведение закалки после выдержки при температуре 520–530°С, длительность выдержки должна быть увеличена в два раза по сравнению с выдержкой, рекомендованной в ПИ1.2.699, для тех же толщин полуфабрикатов из серийных алюминиевых сплавов.

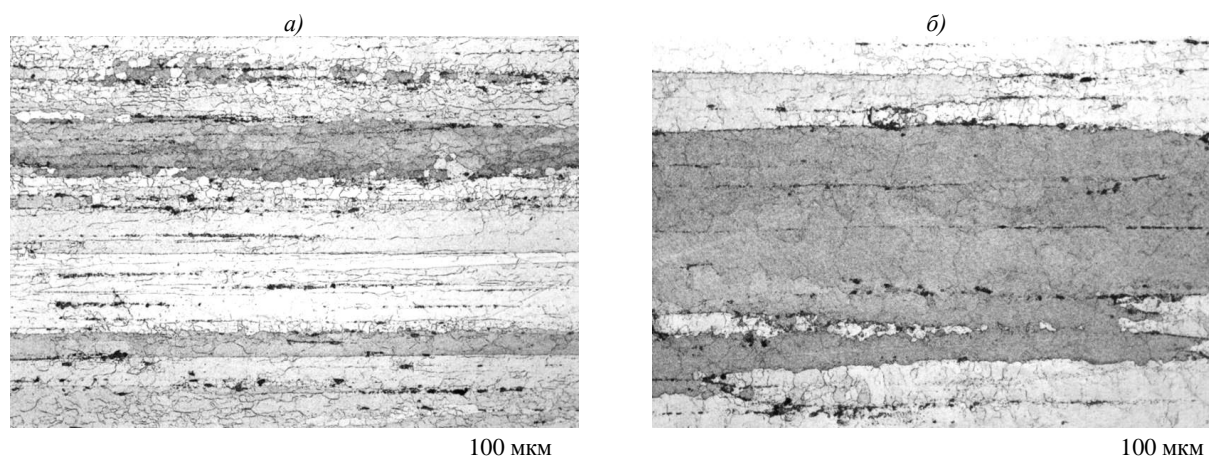


Рисунок 4. Микроструктура прессованных профилей из сплава В-1469:
а – выходной; *б* – утяжинный

Исследовано влияние продолжительности выдержки при старении на механические свойства. Установлено, что максимальный уровень свойств в продольном, поперечном и высотном направлениях достигается после старения по режиму: 150–160°С в течение 30–40 ч. Из анализа полученных значений механических свойств сделан вывод, что после термической обработки по рекомендованному режиму (закалка+старение, без правки растяжением) при обеих температурах прессования (390 и 480°С) достигается

максимальный уровень прочности при сохранении высокого относительного удлинения: $\sigma_B=590$ МПа; $\sigma_{0,2}=530-540$ МПа; $\delta=9,7-10,5\%$.

Известно, что значительный эффект в повышении прочностных свойств, характеристик трещиностойкости и коррозионной стойкости наблюдается при использовании правки растяжением полуфабрикатов [18]. Фактическая степень остаточной деформации после правки профилей в промышленных условиях составила 4–5,5%. Значения механических свойств профилей по сечению после термической обработки в промышленных условиях ОАО «КУМЗ» приведены на рис. 5.

σ_B , МПа	650	610	600	610					
$\sigma_{0,2}$, МПа	620	590	570	580					
δ , %	9,8	9,0	9,0	7,3					
σ_B , МПа	630	620	600	580	580	580			650
$\sigma_{0,2}$, МПа	600	600	570	560	560	550			630
δ , %	9,8	8,3	9,3	9,3	8,8	9,8	600	610	9,0
σ_B , МПа	650	610	610	610	600	590	570	590	650
$\sigma_{0,2}$, МПа	630	590	580	580	580	570	9,3	7,0	630
δ , %	8,5	8,3	9,5	10,5	9,8	7,3			9,8

Рисунок 5. Механические свойства прессованных профилей из сплава В-1469-Т1 (предел прочности/предел текучести/относительное удлинение)

С целью паспортизации профилей из сплава В-1469-Т1 определены их механические свойства при растяжении (σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ) при комнатной температуре (табл. 1). Образцы для испытания были вырезаны из двух зон профиля: толщиной 60 мм (в продольном (Д), поперечном (П) и высотном (В) направлениях); толщиной 40 мм (в направлениях Д и П).

Таблица 1

Механические свойства при растяжении массивных прессованных профилей из сплава В-1469-Т1 при комнатной температуре

Толщина полки, мм	Направление вырезки образца	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %
		МПа		
60	Д	600–650	580–620	9–12
	П	540–550	520	6–7
	В	520–530	460–530	4–5
40	Д	610–640	580–620	10,5–11,0
	П	550	520	6,8–8,0

Модуль упругости (E) составляет 78 ГПа, что на 8–10% превосходит модуль упругости серийно применяемых алюминиевых сплавов. При испытании механических свойств при растяжении при 20°C после нагрева при 85°C до 3000 ч не происходит снижения относительного удлинения, при этом пределы прочности и текучести

остаются на том же уровне.

Модуль нормальной упругости ($E_{сж}$) и условный предел текучести при сжатии ($\sigma_{0,2сж}$) определены на образцах, вырезанных в продольном направлении. Средние значения составили $E_{сж}=80$ ГПа, $\sigma_{0,2сж}=600$ МПа.

Малоцикловая усталость (МЦУ) профилей определена при $f=40$ Гц, $R=0,1$, $\sigma_{\max}^{\text{нетто}} = 157$ МПа и составляет 350–700 циклов.

Значение вязкости разрушения (K_{IQ}) в направлении ДП составило $40 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Скорость роста трещины усталости (СРТУ) определена на компактных образцах, среднее значение СРТУ (dl/dN) профилей при $\Delta K=31,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ составляет $1,65 \text{ мм/циклов}$.

Испытания на межкристаллитную коррозию (МКК) проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 9.021–74 в растворе 2 в течение 6 ч, глубина МКК составляет $<0,14$ мм. Испытания на расслаивающую коррозию (РСК) проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 9.904–82 в растворе 2 в течение 2 сут, склонность к РСК: 2–4-й балл. При испытании на стойкость к коррозионному растрескиванию на установке «Сигнал» образцы, вырезанные в высотном направлении, простояли более 45 сут без разрушения при напряжении 280 МПа.

Технология прессования массивных профилей из сплава В-1469 освоена и внедрена в промышленное металлургическое производство ОАО «КУМЗ», разработана нормативная документация на их изготовление и поставку. Результаты всесторонних исследований, в том числе при высоких и низких (криогенных) температурах, позволили рекомендовать сплав для конструкций перспективных изделий авиационно-космической техники, работающих в интервале температур от -70 до $+150^\circ\text{C}$ (длительно) и от -150 до $+175^\circ\text{C}$ (кратковременно).

Характеристики прессованных профилей из сплава В-1469-Т1 в сравнении с базовым сплавом В950.ч./п.ч.-Т2 приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Характеристики прессованных профилей из сплава В-1469-Т1
в сравнении с аналогичными полуфабрикатами из сплава В950.ч./п.ч.-Т2**

Характеристика	Значение характеристик сплавов		Квоты преимущества, %
	В-1469-Т1 (паспортные данные)	В950.ч./п.ч.-Т2 [19]	
σ_B , МПа	600–650	≥ 510	≥ 18
σ_B/d , км (усл. ед.)	$\geq 22,5$	$\geq 17,9$	≥ 26
$\sigma_{0,2}$, МПа	580–620	≥ 450	≥ 29
E , ГПа	78	71	10

СРТУ: dI/dN , м/цикл (при $\Delta K=31 \text{ Па}\sqrt{\text{м}}$)	1,65	2,7	64
$\sigma_{кр}$, МПа	>280	170	>65

Видно, что полученные свойства прессованных профилей из сплава В-1469-Т1 превосходят свойства аналога – отечественного сплава В95о.ч./п.ч.-Т2: по удельной прочности более чем на 20%, модулю упругости – на 10%, сопротивлению коррозионному растрескиванию – на 65%.

Массивные прессованные профили из сплава В-1469Т1 рекомендованы для изготовления направляющих крепления кресел, каркаса пола пассажирского салона, рельсов грузового отсека, деталей внутреннего набора и других изделий авиационно-космической техники.

Обсуждение и заключения

Разработана технология прессования массивных профилей из высокопрочного алюминийлитиевого сплава В-1469, на серийном оборудовании ОАО «КУМЗ» освоено их опытно-промышленное производство.

Исследовано влияние различных режимов упрочняющей термической обработки на структуру и механические свойства прессованных профилей. Выбран режим, обеспечивающий максимальный уровень прочности при сохранении высокого относительного удлинения: $\sigma_{в} \geq 600 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} \geq 580 \text{ МПа}$, $\delta \geq 9\%$.

Проведены комплексные исследования массивных прессованных профилей, разработана нормативная документация на их изготовление и поставку.

Сплав В-1469 рекомендован для применения в конструкциях перспективных изделий авиационно-космической техники, работающих длительно в интервале температур от -70 до +150°C (длительно) до +175°C (кратковременно).

Прессованные профили из сплава В-1469-Т1 рекомендованы для замены аналогичных полуфабрикатов из сплава В95о.ч./п.ч.-Т2, так как превосходят их по удельной прочности более чем на 20%, модулю упругости – на 10%, сопротивлению коррозионному растрескиванию – на 65%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедиче-

ский справочник. 2008. №3. С. 2–14.

3. Фридляндер И.Н. Воспоминания о создании авиакосмической и атомной техники из алюминиевых сплавов. М.: Наука. 2005. 275 с.
4. Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 5–6.
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. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него: пат. 2237098 Рос. Федерация; опубл. 24.07.2003.
7. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Алюминийлитиевые сплавы /В кн. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный научн.-техн. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 163–171.
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.А. Промышленное освоение высокопрочного сплава В-1469 системы Al–Cu–Li–Mg //Труды ВИАМ. 2014. №7. Ст. 01 (viam-works.ru).
10. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Оглодков М.С., Клочкова Ю.Ю. Высокопрочные сплавы системы Al–Cu–Li с повышенной вязкостью разрушения для самолетных конструкций //Цветные металлы. 2013. №9. С. 66–71.
11. Шамрай В.Ф., Грушко О.Е., Тимофеев В.Н., Лазарев Э.М., Клочкова Ю.Ю., Гордеев А.С. Структурные состояния материала прессовок и листов из сплава системы Al–Cu–Li, легированного серебром //Металлы. 2009. №6. С. 53–59.
12. Shamray V., Grushko O., Timofeev V., Lazarev E., Klochkova J. Structural Evolution in Aluminum-Copper-Lithium-Magnesium Alloy Sheets During Processing /Proceedings of the 12-th International Conference of Aluminium Alloys. 2010. P. 2141–2146.
13. 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.
14. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Шамрай В.Ф., Клочков Г.Г. Высокопрочный конструкционный Al–Cu–Li–Mg сплав пониженной плотности, легированный серебром //МиТОМ. 2007. №6 (624). С. 3-7.

15. Troeger P., Domack M.S., Wagner J.A. Microstructural and Mechanical Property Characterization of Shear Formed Aerospace Aluminum Alloys /NASA. Langly Research Center Hampton. Virginia. 2000.
16. Hales S.J., Hafley R.A. Structure-Property Correlations in Al–Li Alloy Integrally Stiffened Extrusions /NASA, Langly Research Center Hampton. 2001.
17. Prasad N.E., Gokhale A., Wanhill R.J.H. Aluminium-lithium alloys: processing, properties, and applications. 2013. 608 p.
18. Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л., Колобнев Н.И. Алюминиево-литиевые сплавы. Структура и свойства. К.: Наукова думка. 1992. 192 с.
19. Авиационные материалы: Справочник в 13-ти томах. 7-е изд., перераб. и доп. /Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2009. Т. 4. Ч. 1. Кн. 2. 170 с.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030»] //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). S. 3–33.
2. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials science] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2008. №3. S. 2–14.
3. Fridljander I.N. Vospominanija o sozdanii aviakosmicheskoi i atomnoj tehniki iz aljuminievykh splavov [Memories of creation of aerospace and nuclear equipment from aluminum alloys]. М.: Nauka. 2005. 275 s.
4. Tarasov Ju.M., Antipov V.V. Novye materialy VIAM – dlja perspektivnoj aviacionnoj tehniki proizvodstva OAO «OAK» [The VIAM new materials – for perspective aviation engineering of production of JSC OAK] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. S. 5–6.
5. Antipov V.V., Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Vahromov R.O. Aljuminievyje deformiruemye splavy [Aluminum deformable alloys] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. S. 167–182.
6. Splav na osnove aljuminija i izdelie, vypolnennoe iz nego [Alloy on the basis of aluminum and the product which has been executed of it]: pat. 2237098 Ros. Federacija; opubl. 24.07.2003.

7. Fridljander I.N., Grushko O.E., Antipov V.V., Kolobnev N.I., Hohlatova L.B. Aljuminijlitiyevye splavy [Aluminum-lithium alloys] /V kn. 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007: Jubilejnyj nauchn.-tehn. sb. M.: VIAM. 2007. S. 163–171.
8. Klochkova Ju.Ju., Grushko O.E., Lancova L.P., Burljaeva I.P., Ovsjannikov B.V. Osvoenie v promyshlennom proizvodstve polufabrikatov iz perspektivnogo aljuminijlitiyevogo splava V-1469 [Development in industrial production of semi-finished products from perspective aluminum-lithium alloy V-1469] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №1. S. 8–12.
9. Klochkov G.G., Grushko O.E., Klochkova Ju.Ju., Romanenko V.A. 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. Kolobnev N.I., Hohlatova L.B., Oglodkov M.S., Klochkova Ju.Ju. Vysokoprochnye splavy sistemy Al–Cu–Li s povyshennoj vjzskost'ju razrushenija dlja samoletnyh konstrukcij [High-strength alloys of Al–Cu–Li system with the increased fracture toughness for aircraft designs] //Cvetnye metally. 2013. №9. S. 66–71.
11. Shamraj V.F., Grushko O.E., Timofeev V.N., Lazarev Je.M., Klochkova Ju.Ju., Gordeev A.S. Strukturnye sostojanija materiala pressovok i listov iz splava sistemy Al–Cu–Li, legirovannogo serebrom [Structural conditions of material of pressings and sheets from the alloy of Al–Cu–Li system alloyed by silver] //Metally. 2009. №6. C. 53–59.
12. Shamray V., Grushko O., Timofeev V., Lazarev E., Klochkova J. Structural Evolution in Aluminum-Copper-Lithium-Magnesium Alloy Sheets During Processing /Proceedings of the 12-th International Conference of Aluminium Alloys. 2010. P. 2141–2146.
13. Antipov V.V., Kolobnev N.I., Hohlatova L.B. Razvitie aljuminijlitiyevyh splavov i mnogostupenchatyh rezhimov termicheskoj obrabotki [Development of aluminum-lithium alloys and multistage modes of thermal processing] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 183–195.
14. Fridljander I.N., Grushko O.E., Shamraj V.F., Klochkov G.G. Vysokoprochnyj konstrukcionnyj Al–Cu–Li–Mg splav ponizhennoj plotnosti, legirovannyj serebrom [The high-strength constructional Al–Cu–Li–Mg alloy of the lowered density alloyed by silver] //MiTOM. 2007. №6 (624). S. 3 7.
15. Troeger P., Domack M.S., Wagner J.A. Microstructural and Mechanical Property Characterization of Shear Formed Aerospace Aluminum Alloys /NASA. Langly Research Center Hampton. Virginia. 2000.
16. Hales S.J., Hafley R.A. Structure-Property Correlations in Al–Li Alloy Integrally Stiff-

ened Extrusions /NASA, Langly Research Center Hampton. 2001.

17. Prasad N.E., Gokhale A., Wanhill R.J.H. Aluminium-lithium alloys: processing, properties, and applications. 2013. 608 p.
18. Fridljander I.N., Chuistov K.V., Berezina A.L., Kolobnev N.I. Aljuminievo-litievye splavy. Struktura i svojstva [Aluminum-lithium alloys. Structure and properties]. K.: Naukova dumka. 1992. 192 s.
19. Aviacionnye materialy [Aviation materials]: Spravochnik v 13-ti tomah. 7-e izd., pererab. i dop. /Pod obshh. red. E.N. Kablova. M.: VIAM. 2009. T. 4. Ch. 1. Kn. 2. 170 s.