



УДК 669.715

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-1-1

**ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО
СПЛАВА В-1469 СИСТЕМЫ Al–Cu–Li–Mg**

Г.Г. Клочков

О.Е. Грушко

доктор технических наук

Ю.Ю. Клочкова

В.А. Романенко

Июль 2014

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: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-1-1

Г.Г. Клочков¹, О.Е. Грушко, Ю.Ю. Клочкова¹, В.А. Романенко¹

ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО СПЛАВА В-1469 СИСТЕМЫ Al–Cu–Li–Mg

Приведены результаты исследований опытно-промышленных партий листов, плит, прессованных профилей и раскатных колец из нового российского высокопрочного коррозионностойкого сплава пониженной плотности В-1469 системы Al–Cu–Li–Mg–Ag.

Ключевые слова: *алюминийлитиевый сплав В-1469, листы, плиты, прессованные профили, раскатные кольца, термическая обработка, искусственное старение, трещиностойкость.*

G.G. Klochkov, O.E. Grushko, Y.Y. Klochkova, V.A. Romanenko

INDUSTRIAL DEVELOPMENT OF HIGH-STRENGTH ALLOY V-1469 OF Al–Cu–Li–Mg SYSTEM

This paper presents results of researches of industrial sheets, plates, extrusions and rolling rings from new high-strength corrosion-resistant alloy V-1469 with low density based on Al–Cu–Li–Mg–Ag system.

Keywords: *aluminum-lithium alloy V-1469, sheet, plate, extrusion, rolled ring, heat treatment, artificial aging, fracture toughness.*

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

На протяжении нескольких десятилетий, как в России, так и за рубежом, с целью повышения весовой эффективности изделий авиационной и ракетно-космической техники ведутся исследования, направленные на разработку алюминиевых сплавов, легированных литием [1–3].

Перспективный сплав В-1469 системы Al–Cu–Li–Mg разработан в ВИАМ и является первым в России алюминийлитиевым сплавом, легированным серебром [4]. За рубежом тенденция применения алюминийлитиевых сплавов, в том числе легированных серебром, в конструкциях изделий авиакосмической техники известна давно: идет по-

стоянное совершенствование составов сплавов и технологий изготовления полуфабрикатов из них [5–7]. Серебро в небольшом количестве усиливает выделение дисперсных упрочняющих фаз при искусственном старении, что обеспечивает повышенные характеристики статической прочности [8–10]. Сплав также содержит скандий и цирконий, которые являются модификаторами литой структуры и обеспечивают получение мелкозернистой структуры в слитке, а также задерживают процессы рекристаллизации при получении полуфабрикатов и улучшают свариваемость.

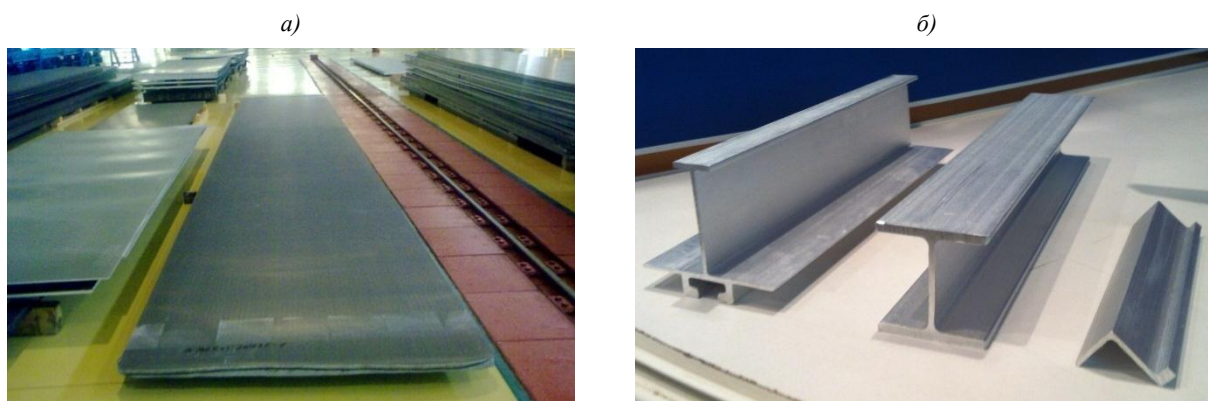
Сплав В-1469 – высокопрочный, высокомодульный ($E=79$ ГПа), пониженной плотности ($d=2,67$ г/см³) – обладает высокой технологичностью при литье и обработке давлением, что позволяет получать в промышленных условиях широкую номенклатуру полуфабрикатов. В настоящее время на серийном оборудовании ОАО «КУМЗ» освоено промышленное производство листов (0,8–6,0 мм), плит (35–80 мм), прессованных профилей различного сечения и раскатных колец. Все полуфабрикаты и сварные соединения из листов и плит, за исключением раскатных колец, паспортизованы [11–15].

Благодаря высокой технологичности, близкой к технологичности сплава 1441 при прокатке, стало возможным изготовление тонких листов толщиной 0,4–0,5 мм, которые рекомендованы к опробованию в алюмокомпозитном СИАЛ на базе листов из сплава В-1469 [16, 17, 18].

Сплав обладает высокой критической степенью деформации (~20%), что позволяет изготавливать детали холодной деформацией без промежуточных отжигов. Последующий нагрев под закалку не приводит к росту зерна. Освоено промышленное производство гнутых профилей из листов методом стесненного изгиба. Сплав сваривается всеми видами сварки, обладает высоким сопротивлением к коррозионному растрескиванию.

Материал для исследований

Исследования проводили на опытно-промышленных партиях листов и плит различных толщин, прессованных профилей различного сечения и раскатных колец из сплава В-1469, изготовленных на серийном оборудовании ОАО «КУМЗ» (см. рисунок).



Полуфабрикаты из сплава В-1469:
a – плиты; *б* – прессованные профили

Результаты эксперимента и их обсуждение

Для изготовления полуфабрикатов из сплава В-1469 в условиях промышленного металлургического производства полунепрерывным методом отлиты слитки: плоские сечением 300×1100 мм и цилиндрические $\varnothing 400$ мм.

В процессе изготовления прессованных профилей отмечена высокая технологичность сплава: при скорости прессования до 1 м/мин профили отлично распрессовывались, отклонений по геометрическим размерам и качеству поверхности не зафиксировано. Механические свойства при растяжении профилей из сплава В-1469 при комнатной температуре приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства при растяжении прессованных профилей из сплава В-1469

Толщина полки, мм	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta_5, \%$
	МПа		
До 5	570	540	10
До 40	580	550	8
Св. 40 до 80	620	590	10

Малоцикловая усталость (МЦУ) профилей из сплава В-1469 оценена по количеству циклов до разрушения (N) на плоских образцах с концентратором напряжения в виде центрального круглого отверстия $\varnothing 5$ мм ($K_f=2,6$). Частота нагружения (f) составляла 5 Гц, коэффициент асимметрии цикла (R) равен 0,1 [19]. При максимальном напряжении в сечении «нетто» (157 МПа) $N=300$ цикл. Критический коэффициент интенсивности напряжений в условиях плосконапряженного состояния (K_c^y) определен для образца шириной 80 мм из тонкостенного прессованного профиля и составил 65 МПа $\sqrt{м}$. Для массивных профилей критический коэффициент интенсивности напряжений в условиях плоской деформации (K_{Ic}) составил 25 МПа $\sqrt{м}$. Глубина межкристаллитной коррозии профилей – до 0,14 мм, расслаивающая коррозия: 3 балл. При определении КР на установке «Сигнал» образцы простояли более 45 сут без разрушения при напряжении 300 и 280 МПа в поперечном и высотном направлениях соответственно.

Раскатные кольца $\varnothing 1030/850-888 \times 320$ мм из сплава В-1469 получены из кованых заготовок $\varnothing 400 \times 650$ мм. Ковка и раскатка при изготовлении раскатных колец проведены без промежуточных отжигов. При проведении ультразвукового контроля раскатных колец из сплава В-1469 эхо-сигналы от дефектов, равные или превышающие по амплитуде эхо-сигналы от плоскодонного отражателя диаметром 1,2 мм, не обнаружены. Механические свойства при растяжении определены на образцах, вырезанных в хордовом, радиальном и осевом направлениях (табл. 2).

Таблица 2

Механические свойства при растяжении раскатных колец из сплава В-1469

Направление вырезки образца	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta_5, \%$
	МПа		
Хордовое	520	465	11,0
Радиальное	500	445	10,0
Осевое	500	455	7,0

Листы из сплава В-1469 толщиной 0,8–3,0 мм изготовлены холодной рулонной прокаткой из горячекатаного рулона толщиной 7,0 мм с одним промежуточным отжигом без плакировки. Микроструктура листов тонковолокнистая с расположенными по границам зерен мелкодисперсными фазовыми составляющими.

Сплав В-1469 разработан как высокопрочный. Однако, учитывая современные тенденции развития алюминийлитиевых сплавов, задача получения на листах повышенных характеристик трещиностойкости при достаточно высоком уровне механических свойств весьма актуальна [20, 21]. Одним из способов, с помощью которого возможно повлиять на характеристики трещиностойкости материала, является воздействие на характер выделений упрочняющих фаз, образующихся при искусственном старении [22–24]. В результате проведенных исследований кинетики искусственного старения при различных температурах и выдержках разработан смягчающий режим, позволивший повысить трещиностойкость листов при незначительном снижении статической прочности [26, 27]. Комплекс эксплуатационных и коррозионных свойств листов из сплава В-1469 с повышенными трещиностойкостью и прочностью приведен в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики листов толщиной 1,5–3,0 мм из сплава В-1469-Т1

Свойства	Уровень свойств для сплава В-1469-Т1	
	с повышенной трещиностойкостью	с повышенной прочностью
σ_b , МПа	≥ 550	≥ 580
$\sigma_{0,2}$, МПа	≥ 510	≥ 540
δ_5 , %	$\geq 10,5$	$\geq 7,5$
МЦУ: N , кцикл ($f=40$ Гц, $\sigma_{max}=157$ МПа)	285	230
K_c^y , МПа $\sqrt{м}$, при $B=200$ мм	85	65
СРТУ: dI/dN , мм/кцикл, при $\Delta K=31$ МПа $\sqrt{м}$	2,3	4
РСК, балл	3	3
МКК, мм	$\leq 0,12$	$\leq 0,14$
$\sigma_{кр}$, МПа, (П) «Сигнал»	380*	400*

* Без разрушения.

Для оценки возможности применения в конструкции нового изделия ОАО «РКК «Энергия» освоено промышленное производство плит из сплава В-1469 толщиной 35 мм и проведены их комплексные испытания. В настоящее время ведется

разработка технологии изготовления и проводятся исследования плит толщиной 40, 60 и 80 мм. Механические свойства при растяжении плит из сплава В-1469 в продольном направлении при комнатной температуре приведены в табл. 4. Для сравнения уровня свойств плит толщиной 40, 60 и 80 мм в различных зонах, испытаны образцы, отобранные на 1/2 и 1/4 части плиты по толщине.

Таблица 4

Механические свойства* при растяжении плит из сплава В-1469

Толщина плиты, мм	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta_5, \%$
	МПа		
35	580	540	8,0
40	590/590	560/560	7,0/6,5
60	600/600	560/560	7,0/6,5
80	570/570	530/540	6,5/5,5

* Для плит толщиной 35 мм приведены свойства по ТУ; для плит толщиной 40–80 мм приведены фактические свойства, определенные на образцах, вырезанных из зон 1/4 толщины плиты / 1/2 толщины плиты.

Характеристика МЦУ для плит из сплава В-1469 толщиной 35 мм определена при тех же условиях испытания (как для листов) и оценена по количеству циклов нагружения: 315 кцикл при максимальном нагружении цикла $\sigma_{max}^{netto}=157$ МПа. Вязкость разрушения (K_{Ic}) составила $30 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$, СРТУ: $3,0 \text{ мм/цикл}$ при $\Delta K=31 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$.

Образцы для определения склонности к РСК и МКК вырезаны из поверхностных слоев и из середины по толщине плиты. Для всех зон РСК составляет 3 балла, глубина МКК – низкая и составляет 0,07–0,11 и 0,11–0,14 мм соответственно. При определении КР на установке «Сигнал» образцы, вырезанные в высотном направлении, простояли более 45 сут без разрушения при напряжении 350 МПа.

Предел текучести ($\sigma_{0,2сж}$) и модуль упругости ($E_{сж}$) плит сопоставимы со свойствами при растяжении. Чувствительность к концентратору напряжений в виде отверстия отсутствует. Проведены кратковременные испытания при температурах от 100 до 175°C, а также определены пределы длительной прочности и ползучести, свойства после длительных нагревов при этих температурах.

Заключение

Таким образом, результаты комплексных исследований позволяют рекомендовать полуфабрикаты из сплава В-1469 для элементов конструкций авиационно-космической техники, работающих в условиях сжатия длительно во всеклиматических условиях при температурах от -70 до +150°C (верхние поверхности крыла, лонжероны, балки, стрингеры и другие детали). Применение полуфабрикатов из сплава В-1469 в клепаных и сварных конструкциях обеспечивает снижение массы деталей и узлов на 10 и 20% со-

ответственно. Перспективно применение тонких листов толщиной 0,4–0,5 мм в алюмоплексостеклопластике СИАЛ.

В результате проведенной работы отмечена высокая технологическая пластичность сплава при изготовлении, освоено промышленное производство полуфабрикатов: плит различных толщин; неплакированных листов толщиной 0,4–0,5 и 0,8–3,0 мм, полученных рулонной холодной прокаткой с одним промежуточным отжигом; прессованных профилей различного сечения; раскатных колец.

В сравнении с зарубежными аналогами – сплавами 2195, 2098, 2198 системы Al–Cu–Li – полуфабрикаты из сплава В-1469 не уступают по комплексу прочностных, коррозионных свойств и характеристикам трещиностойкости, обладая при этом меньшей анизотропией свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фридляндер И.Н. Воспоминания о создании авиакосмической и атомной техники из алюминиевых сплавов. М.: Наука. 2005. 277 с.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
3. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 167–182.
4. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Алюминийлитиевые сплавы /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный научн.-техн. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 163–171.
5. Rioja R.J., Denzer D.K., Mooy D., Venema G. Lighter and Stiffer Materials for Use in Space Vehicles /In: Proceedings of the 13-th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-13). 2012. P. 593–598.
6. Rioja R., Liu J. The evolution of Al–Li base products for aerospace and space applications //Metallurgical and Materials Transactions A. 2012. V. 43. №9. P. 3325–3337.
7. Na J., Xiang G., Zheng Z.Q. Microstructure evolution of aluminum-lithium alloy 2195 undergoing commercial product //Transactions of nonferrous metals society of China. 2010. P. 740–745.
8. Mukhopadhyay A.K. Compositional Characterization of Cu-Rich Phase Particles Present in As-Cast Al–Cu–Mg (Li) Alloys Containing Ag //Metallurgical and materials transactions A. 1999. V. 30a. №7. P. 1693–1704.

9. Zheng Z.Q., Chen X.Z., Chen Z.G., Li S.C., Wei X.Y. The element effects on microstructure and mechanical properties in Al–Cu–Li alloy after thermal exposure /In: Proceedings of the 10-th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-10). 2006. P. 1931–1936.
10. Bakavos D., Prangnell P.B., Bes B., Eberl F. The effect of silver on microstructural evolution in two 2xxx series Al-alloys with a high Cu: Mg ratio during aging to a T8 temper //Mat. Sci. Eng. 2008. V. 491. P. 214–223.
11. Шамрай В.Ф., Грушко О.Е., Тимофеев В.Н., Лазарев Э.М., Ключкова Ю.Ю., Гордеев А.С. Структурные состояния материала прессовок и листов 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 /In: The 12-th International Conference of Aluminium Alloys (ICAA-12). 2010. P. 2141–2146.
13. Ключкова 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.
14. 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.
15. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Шамрай В.Ф., Ключков Г.Г. Высокопрочный конструкционный Al–Cu–Li–Mg сплав пониженной плотности, легированный серебром //МиТОМ. 2007. №6(624). С. 3-7.
16. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф. Новый класс слоистых алюмостеклопластиков на основе алюминий-литиевого сплава 1441 с пониженной плотностью//Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 174–183.
17. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г. Слоистые алюмостеклопластики СИАЛ-1441 и сотрудничество с Airbus и TU Delft //Цветные металлы. 2013. №9 (849). С. 50–53.
18. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В. Исследование пожаростойкости слоистых гибридных алюмостеклопластиков класса СИАЛ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 36-41.

19. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневич А.В., Терехин А.Л. Трещиностойкость авиационных материалов в процессе испытания на усталость //Труды ВИАМ. 2013. №10. Ст. 06 (viam-works.ru).
20. Magnusen P.E., Mooy D.C., Yocum L.A., Rioja R.J. Development of high toughness sheet and extruded products for airplane fuselage structures /In: Proceedings of the 13-th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-13). 2012. P. 535–540.
21. Karabin L.M., Bray G.H., Rioja R.J., Venema G. Al–Li–Cu–Mg (Ag) products for lower wing skin applications /In: Proceedings of the 12-th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-12). 2012. P. 529–534.
22. Елагин В.И. Состояние и пути повышения трещиностойкости высокопрочных алюминиевых сплавов //МиТОМ. 2002. №9. С. 10–15.
23. Polmear I.J. Aluminium alloys – a century of age hardening //Materials forum. 2004. V. 28. P. 1–14.
24. 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.
25. Cheng Y., Feng Y.D., Xiang Y.X. Solution Treatment on Mechanical Properties and Microstructures of Al–Li–Cu Alloy //J. Material Sci. Eng. 2012. V. 1. P. 1–5.
26. Лукина Е.А., Алексеев А.А., Антипов В.В., Зайцев Д.В., Клочкова Ю.Ю. Применение диаграмм фазовых превращений при старении для оптимизации режимов старения в Al–Li сплавах В-1469, 1441 //Металлы. 2009. №6. С. 60–67.
27. Lukina E.A., Alekseev A.A., Antipov V.V., Zaitsev D.V., Klochkova Y.Y. Application of the Diagrams of Phase Transformations during Aging for Optimizing the Aging Conditions for V-1469 and 1441 Al–Li Alloys /In: Proceedings of the 12-th International Conference of Aluminium Alloys (ICAA-12). 2010. P. 1984–1989.

REFERENCES LIST

1. Fridljander I.N. Vospominaniya o sozdanii aviakosmicheskoy i atomnoj tehniki iz aljuminievyh splavov [Memories of creating aerospace and nuclear technology of aluminum alloys]. М.: Nauka. 2005. 277 s.
2. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.

3. Antipov V.V., Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Vahromov R.O. Aljuminievye deformiruemye splavy [Aluminium wrought alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 167–182.
4. Fridljander I.N., Grushko O.E., Antipov V.V., Kolobnev N.I., Hohlatova L.B. Aljuminijlitievye splavy [Aluminium-lithium alloys] /V sb. 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007: Jubilejnyj nauchn.-tehn. sb. M.: VIAM. 2007. S. 163–171.
5. Rioja R.J., Denzer D.K., Mooy D., Venema G. Lighter and Stiffer Materials for Use in Space Vehicles /In: Proceedings of the 13-th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-13). 2012. P. 593–598.
6. Rioja R., Liu J. The evolution of Al–Li base products for aerospace and space applications //Metallurgical and Materials Transactions A. 2012. V. 43. №9. P. 3325–3337.
7. Na J., Xiang G., Zheng Z.Q. Microstructure evolution of aluminum-lithium alloy 2195 undergoing commercial product //Transactions of nonferrous metals society of China. 2010. P. 740–745.
8. Mukhopadhyay A.K. Compositional Characterization of Cu-Rich Phase Particles Present in As-Cast Al–Cu–Mg (Li) Alloys Containing Ag //Metallurgical and materials transactions A. 1999. V. 30a. №7. P. 1693–1704.
9. Zheng Z.Q., Chen X.Z., Chen Z.G., Li S.C., Wei X.Y. The element effects on microstructure and mechanical properties in Al–Cu–Li alloy after thermal exposure /In: Proceedings of the 10-th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-10). 2006. P. 1931–1936.
10. Bakavos D., Prangnell P.B., Bes B., Eberl F. The effect of silver on microstructural evolution in two 2xxx series Al-alloys with a high Cu: Mg ratio during aging to a T8 temper //Mat. Sci. Eng. 2008. V. 491. P. 214–223.
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 splava sistemy Al–Cu–Li, legirovannogo serebrom [Structural state of the material compacts and alloy sheets of Al–Cu–Li, doped with 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 /In: The 12-th International Conference of Aluminium Alloys (ICAA-12). 2010. P. 2141–2146.
13. 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 of industrial production of semi-finished alloy in

- perspective alyuminiylitievogo-1469] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №1. S. 8–12.
14. Antipov V.V., Kolobnev N.I., Hohlatova L.B. Razvitie aljuminijlitievyyh splavov i mnogostupenchatykh rezhimov termicheskoy obrabotki [Development alyuminiylitievyyh alloys and multi-heat treatment] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 183–195.
 15. Fridljander I.N., Grushko O.E., Shamraj V.F., Klochkov G.G. Vysokoprochnyj konstrukcionnyj Al–Cu–Li–Mg splav ponizhennoj plotnosti, legirovannyj serebrom [High strength structural Al–Cu–Li–Mg alloy reduced density doped silver] //MiTOM. 2007. №6(624). S. 3–7.
 16. Kablov E.N., Antipov V.V., Senatorova O.G., Lukina N.F. Novyj klass sloistykh aljumostrukturnykh plastikov na osnove aljuminij-litievogo splava 1441 s ponizhennoj plotnost'ju [New class of layered alyumostekloplastikov based on aluminum-lithium alloy 1441 with a reduced density] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 174–183.
 17. Kablov E.N., Antipov V.V., Senatorova O.G. Sloistye aljumostrukturnykh plastiki SIAL-1441 i sotrudnichestvo s Airbus i TU Delft [Layered alyumostekloplastiki Sial-1441 and cooperation with Airbus and TU Delft] //Cvetnye metally. 2013. №9 (849). S. 50–53.
 18. Antipov V.V., Senatorova O.G., Sidel'nikov V.V. Issledovanie pozharostojkosti sloistykh gibridnykh aljumostrukturnykh plastikov klassa SIAL [Flammability Study of layered hybrid class alyumostekloplastikov Sial] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №3. S. 36–41.
 19. Erasov V.S., Nuzhnyj G.A., Grinevich A.V., Terehin A.L. Treshhinostojkost' aviacionnykh materialov v processe ispytaniya na ustalost' [Fracture toughness of aircraft materials during fatigue test] //Trudy VIAM. 2013. №10. St. 06 (viam-works.ru).
 20. Magnusen P.E., Mooy D.C., Yocum L.A., Rioja R.J. Development of high toughness sheet and extruded products for airplane fuselage structures /In: Proceedings of the 13-th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-13). 2012. P. 535–540.
 21. Karabin L.M., Bray G.H., Rioja R.J., Venema G. Al–Li–Cu–Mg (Ag) products for lower wing skin applications /In: Proceedings of the 12-th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-12). 2012. P. 529–534.
 22. Elagin V.I. Sostojanie i puti povysheniya treshhinostojkosti vysokoprochnyyh aljuminievykh splavov [Condition and ways to improve fracture toughness of high-strength aluminum alloys] //MiTOM. 2002. №9. S. 10–15.

23. Polmear I.J. Aluminium alloys – a century of age hardening //Materials forum. 2004. V. 28. P. 1–14.
24. Kolobnev N.I., Hohlatova L.B., Oglodkov M.S., Klochkova Ju.Ju. Vysokoprochnye splavy sistemy Al–Cu–Li s povyshennoj vjazkost'ju razrushenija dlja samoletnyh konstrukcij [High-strength alloys of Al–Cu–Li with high fracture toughness for aircraft structures] //Cvetnye metally. 2013. №9. S. 66–71.
25. Cheng Y., Feng Y.D., Xiang Y.X. Solution Treatment on Mechanical Properties and Microstructures of Al–Li–Cu Alloy //J. Material Sci. Eng. 2012. V. 1. P. 1–5.
26. Lukina E.A., Alekseev A.A., Antipov V.V., Zajcev D.V., Klochkova Ju.Ju. Primenenie diagramm fazovyh prevrashhenij pri starenii dlja optimizacii rezhimov starenija v Al–Li splavah V-1469, 1441 //Metally. 2009. №6. S. 60–67.
27. Lukina E.A., Alekseev A.A., Antipov V.V., Zaitsev D.V., Klochkova Y.Y. Application of the Diagrams of Phase Transformations during Aging for Optimizing the Aging Conditions for V-1469 and 1441 Al–Li Alloys [Application diagrams of phase transformations during aging for optimization of aging in Al–Li alloys B-1469, 1441] /In: Proceedings of the 12-th International Conference of Aluminium Alloys (ICAA-12). 2010. P. 1984–1989.