



УДК 669.715

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-1-1

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАЛЫХ ДОБАВОК
СЕРЕБРА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА РЕСУРСНЫХ
СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al–Cu–Mg**

А.О. Иванова

Р.О. Вахромов

М.В. Григорьев

О.Г. Сенаторова

кандидат технических наук

Октябрь 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.

А.О. Иванова¹, Р.О. Вахромов¹, М.В. Григорьев¹, О.Г. Сенаторова¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАЛЫХ ДОБАВОК СЕРЕБРА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА РЕСУРСНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al–Cu–Mg

Проведен термодинамический расчет фазового состава ресурсных сплавов системы Al–Cu–Mg с добавкой серебра и без нее. Исследовано влияние малой добавки серебра на структуру и свойства листов толщиной 1,5–2,0 мм из сплавов системы Al–Cu–Mg в естественно состаренном состоянии. Показано, что серебро в количестве до 0,6% приводит к повышению характеристик прочности (до 10%), усталостной долговечности (более чем на 15%), трещиностойкости (до 10%) и стойкости к коррозионному растрескиванию при сохранении уровня относительного удлинения. Введение серебра в сплавы системы Al–Cu–Mg является перспективным способом увеличения ресурса и повышения надежности изделий авиационной техники.

Ключевые слова: *сплавы системы Al–Cu–Mg–Ag, термодинамический расчет, фазовый состав, механические свойства.*

A.O. Ivanova, R.O. Vakhromov, M.V. Grigoriev, O.G. Senatorova

INVESTIGATION OF EFFECT OF SILVER SMALL ADDITIVES ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF RESOURCE Al–Cu–Mg ALLOYS

Thermodynamic calculation of phase structure of resource Al–Cu–Mg system alloys with and without Ag additive was carried out. The effect of small additive of silver on structure and properties of 1,5–2,0 mm thickness sheets of Al–Cu–Mg alloys in naturally aged condition was investigated. It is shown that silver in amount up to 0,6 wt. % leads to increasing of strength characteristics (up to 10%), fatigue durability (more, than by 15%), crack resistance (up to 10%) and resistance to corrosion cracking with preservation of relative elongation level. Addition of silver in Al–Cu–Mg system alloys is a perspective way of increasing a service life and reliability of articles of aeronautical engineering.

Keywords: *Al–Cu–Mg–Ag alloys, thermodynamic calculation, phase composition, mechanical properties.*

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

Сплавы системы Al–Cu–Mg имеют благоприятный комплекс свойств, поэтому представляют большой интерес для зарубежных и отечественных конструкторов изделий авиационной и космической техники [1–4]. Из сплавов этой системы наиболее широкое распространение в авиационной и других отраслях промышленности получили сплавы Д16, Д16ч. и 1163 в естественно состаренном состоянии (зарубежные аналоги – 2024, 2124, 2324, 2524). Сплавы Д16ч. и 1163 являются более совершенными модификациями сплава Д16 – с более жесткими ограничениями по примесям, откорректированным соотношением легирующих элементов (Cu, Mg, Mn) и, как следствие, повышенной выносливостью и трещиностойкостью [5].

Для обеспечения конкурентоспособности на рынке и вследствие введения концепции безопасно повреждаемой конструкции, необходима постоянная оптимизация состава сплавов и режимов изготовления полуфабрикатов для получения более высоких показателей ресурса и надежности.

Применение малых добавок переходных металлов (Mn, Zr, Ti, Cr и др.) – один из способов улучшения служебных характеристик полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Дисперсные частицы, которые образуются при введении переходных металлов в алюминиевые сплавы, при термической обработке полуфабрикатов тормозят процесс рекристаллизации и являются барьерами на пути движения дислокаций, увеличивая тем самым прочность алюминиевых сплавов с незначительным снижением пластичности [5, 6]. Широко применяется добавка скандия или комплексная добавка циркония и скандия. При введении скандия в алюминиевые сплавы образуются частицы фаз Al_3Sc , $Al_3(ScZr)$ размером ~10–30 нм, благодаря чему происходит увеличение прочностных характеристик (до 30%) [5–10].

В последние десятилетия в отечественной и зарубежной научной литературе опубликованы работы по исследованию влияния серебра на алюминиевые сплавы. Проведенный анализ [11] показал, что серебро – один из перспективных легирующих элементов, который положительно влияет на свойства алюминиевых сплавов. Система Al–Cu–Mg является основой композиций жаропрочных алюминиевых сплавов, применяемых для изделий авиационной и ракетно-космической техники [12]. Введение серебра в жаропрочные сплавы системы Al–Cu–Mg, обеспечивающее образование при искусственном старении Ω' -фазы, влияет на повышение прочностных свойств полуфабрикатов, способствует увеличению их жаропрочности, вязкости разрушения и других характеристик [5, 12–15]. Изменение режимов искусственного старения алюминиевых сплавов

позволяет варьировать фазовым составом и, как следствие, свойствами полуфабриката [15, 17, 18]. В ВИАМ разработаны новый жаропрочный сплав В-1213 с Ag и технологии получения из него различных полуфабрикатов [19].

Материалы и методы

В качестве объектов исследований выбраны ресурсные сплавы системы Al–Cu–Mg с различным соотношением Cu/Mg, содержащие малые добавки переходных металлов Mn, Zr, Ti, Sc, Cr, а также добавку Ag в количестве до 0,6%.

Исследование влияния серебра на свойства алюминиевых сплавов проводили на экспериментальных листах толщиной 2 мм, полученных из слитков $\varnothing 100$ мм, и толщиной 1,5 мм, полученных в условиях ОАО «КУМЗ» из крупногабаритных слитков толщиной 300 мм.

Результаты

Опираясь на положительный опыт эффективного применения серебра в сплавах системы Al–Cu–Mg при разработке жаропрочного сплава В-1213 и на данные из литературных источников, проведены исследования по влиянию серебра на ресурсные сплавы системы Al–Cu–Mg.

Для определения оптимального химического состава, обеспечивающего высокие характеристики прочности и пластичности, проведены термодинамические расчеты фазового состава сплавов системы Al–Cu–Mg–Mn–Ag с использованием программного комплекса Thermo-Calc (версия 3.1, база данных TCAL2). Построены и проанализированы политермические и изотермические сечения системы Al–Cu–Mg–Mn–Ag, определен фазовый состав и состав твердого раствора при температуре закалки. Из изотермических сечений видно, что серебро в количестве до 0,6% в сплаве типа 1163 не образует отдельных фаз и полностью входит в состав твердого раствора при температуре закалки (рис. 1).

После анализа данных, полученных с помощью программного комплекса Thermo-Calc, для подробного исследования в экспериментальных условиях были выбраны три состава сплавов (сплавы 1, 2 и 3) с соотношением Cu/Mg – от 2,7 до 4,5 и содержанием Mn – от 0,3 до 0,5%. Исходные составы сплавов дополнительно легировали добавкой Ag в количестве до 0,6% (сплавы 1А, 2А и 3А).

Сплавы состава 1 при температуре закалки находятся на границе фазовых областей (Al)+ γ (AlCuMn) и (Al)+ γ (AlCuMn)+ θ (Al₂Cu), сплавы состава 2 – преимущественно в фазовой области (Al)+ γ (AlCuMn), в то время как сплавы состава 3 – в фазовой области (Al)+ γ (AlCuMn)+ θ (Al₂Cu) (рис. 1 и 2).

Согласно проведенным термодинамическим расчетам в программном комплексе Thermo-Calc, добавка серебра не приводит к значительному количественному изменению фазового состава (табл. 1).

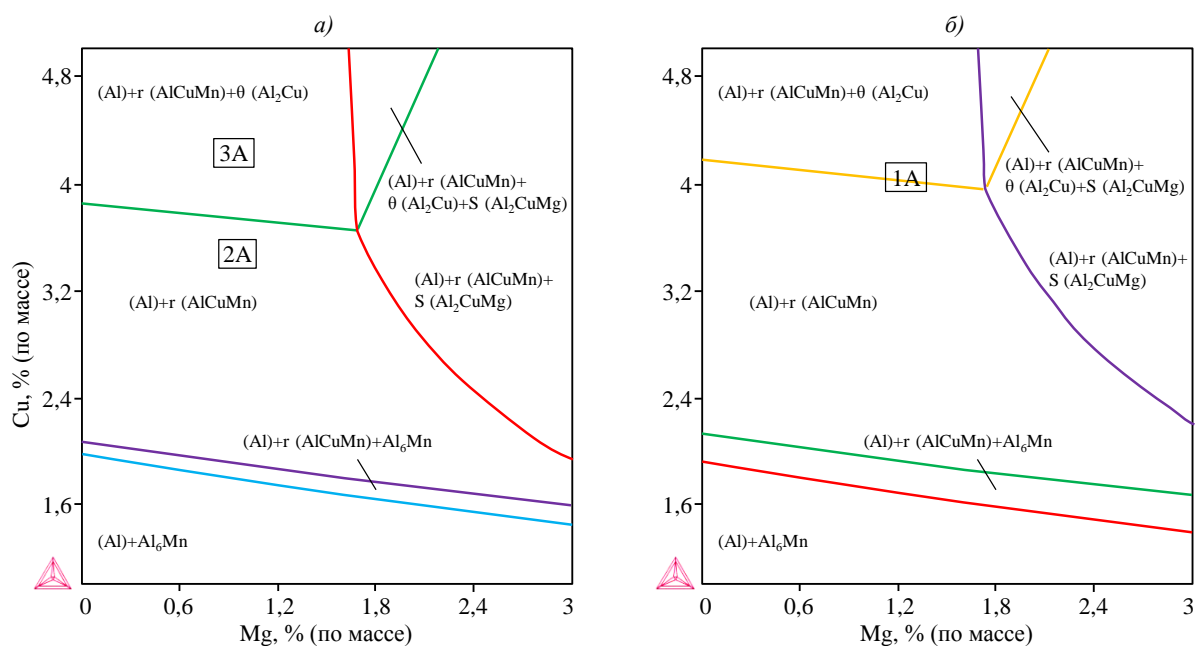


Рисунок 1. Изотермические сечения диаграммы систем Al–Cu–Mg–0,3Mn–Ag (а) и Al–Cu–Mg–0,5Mn–Ag (б) при температуре закалки

Таблица 1

Фазовый состав сплавов и состав твердого раствора по основным легирующим элементам (Cu и Mg) при температуре закалки

Условный номер сплава	Состав, %				
	фазовый			твердого раствора	
	(Al)	r (AlCuMn)	θ (Al ₂ Cu)	Cu	Mg
1	98,23	0,97	0,80	3,60	1,43
2	99,43	0,38	0,19	3,59	1,21
3	97,90	0,36	1,70	3,62	0,82
1A	98,28	0,97	0,75	3,61	1,43
2A	99,48	0,38	0,14	3,61	1,21
3A	97,95	0,37	1,68	3,65	0,82

Для оценки влияния соотношения Cu/Mg и добавки серебра на свойства алюминиевых сплавов проведены статические испытания при растяжении при комнатной температуре образцов, вырезанных из листов исследуемых сплавов в поперечном направлении (табл. 2).

Видно, что сплавы состава 1 обладают преимуществом по прочностным свойствам перед остальными сплавами. Это можно связать с тем, что при температуре закалки в этих сплавах наблюдается самое высокое содержание меди и магния в твердом растворе в сравнении со сплавами составов 2 и 3 (см. табл. 1). Соответственно, эффект от

естественного старения оказался выше. Такая же зависимость наблюдается между сплавами составов 2 и 3.

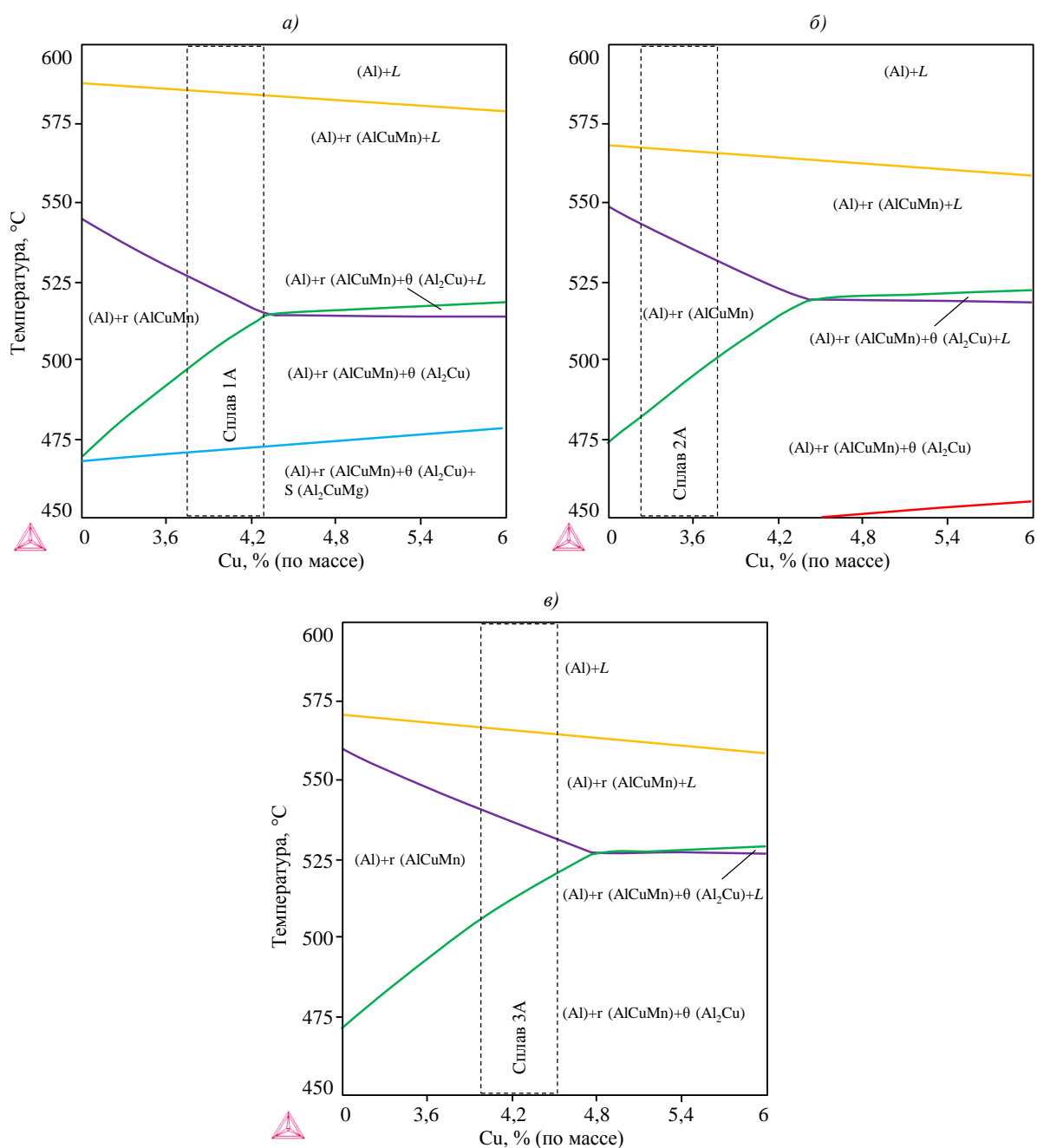


Рисунок 2. Политермические сечения систем Al-1,4Mg-0,5Mn-Ag-Cu (а); Al-1,2Mg-0,3Mn-Ag-Cu (б) и Al-0,9Mg-0,3Mn-Ag-Cu (в)

Сплавы составов 2 и 2А имеют некоторое преимущество по относительному удлинению в сравнении со сплавами составов 1, 1А, 3 и 3А, что может быть связано с меньшей долей избыточных фаз кристаллизационного происхождения (см. табл. 1).

Анализ данных, полученных в результате проведения испытаний при растяжении, позволяет сделать вывод, что добавка серебра в количестве до 0,6% приводит к увели-

чению прочностных свойств (до 10%) при сохранении величины относительного удлинения.

Таблица 2

Механические свойства исследуемых сплавов в состоянии Т (при 20°C)

Условный номер сплава	Механические свойства (средние значения)			
	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %	Долговечность при МЦУ*, кцикл
	МПа			
<i>1</i>	455	300	24	$\frac{124-163}{158}$
<i>1A</i>	490	320	24	$\frac{143-262}{209}$
<i>2</i>	430	285	26	$\frac{126-300}{177}$
<i>2A</i>	475	310	25	$\frac{124-280}{202}$
<i>3</i>	415	290	23	$\frac{105-128}{120}$
<i>3A</i>	450	305	22	$\frac{188-220}{202}$

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

Введение серебра в алюминиевые сплавы привело к увеличению долговечности при малоциклового усталости – более чем на 15% (см. табл. 2).

На основании проведенных исследований выбран сплав состава *1* для оценки влияния серебра на структуру и свойства катаных полуфабрикатов из ресурсных сплавов системы Al–Cu–Mg, изготовленных в промышленных условиях. Отлиты крупногабаритные слитки двух составов (с добавкой Ag и без нее), содержащие помимо основных легирующих элементов (Cu и Mg) добавки Mn, Zr, Ti, Cr и Sc. После гомогенизационного отжига слитки подвергали горячей и холодной прокатке до получения листов толщиной 1,5 мм, закалке и естественному старению.

Исследование микроструктуры листов из сплавов с серебром и без него показало, что введение Ag в сплав не оказало влияния на зеренную структуру катаных полуфабрикатов. Структура листов двух составов однородная, практически равноосная, рекристаллизованная (рис. 3). Для двух составов средний размер зерна составил 21–23 мкм.

Механические свойства исследуемых полуфабрикатов представлены в табл. 3. Видно, что легирование добавкой серебра привело к небольшому увеличению прочностных характеристик при сохранении относительного удлинения, как и в случае с экспериментальной плавкой.

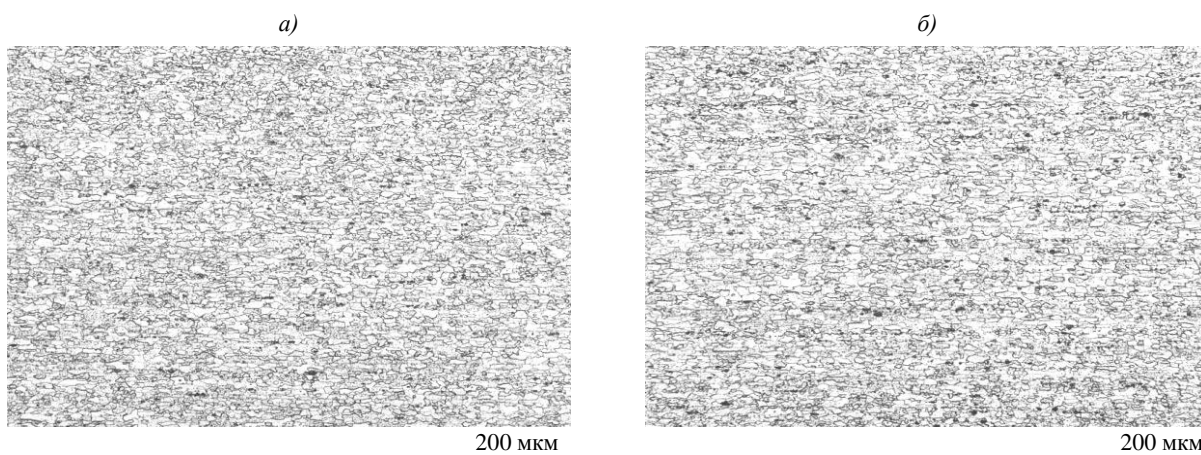


Рисунок 3. Микроструктура листов толщиной 1,5 мм из алюминиевого сплава состава *I* без (а) и с Ag (б)

Испытания на вязкость разрушения (K_c^y) плоских образцов шириной 400 мм и выносливость при малоциклового усталости показали, что сплав состава *I* с Ag имеет преимущество по показателям трещиностойкости (на 10%) и усталости (на 20%) в сравнении со сплавом без серебра (см. табл. 3).

Таблица 3

Механические свойства (средние значения) листов из сплава состава *I* в состоянии T (при 20°C)

Свойства	Направление вырезки образца	Значения свойств для сплава состава <i>I</i>	
		без Ag	с Ag
σ_b , МПа	П	460	480
$\sigma_{0,2}$, МПа	П	315	340
δ , %	П	24	23
$N_{ср}$, кцикл (при $\sigma_{max}=157$ МПа; $K_I=2,6$)	Д	150	180
K_c^y , МПа $\sqrt{м}$ (при $B=400$ мм)	ДП	104	115

Кроме того, введение Ag приводит к увеличению стойкости сплава к коррозионному растрескиванию (КР) и расслаивающей коррозии (РСК) при отсутствии склонности к межкристаллитной коррозии (МКК) (табл. 4).

Таблица 4

Коррозионные свойства листов исследуемых сплавов с добавкой серебра и без нее

Свойства	Значения свойств для сплава состава <i>I</i>	
	без Ag	с Ag
МКК, мм	Нет	Нет
РСК, балл	4	3
КР ($\sigma_{кр}$), МПа	200 (>45 сут)	260 (>45 сут)

Обсуждение и заключения

На основании проведенных термодинамических расчетов в программном комплексе Thermo-Calc построены и проанализированы политермические и изотермические сечения алюминиевых сплавов системы Al–Cu–Mg–Mn–Ag, проведена оценка фазового состава и состава твердого раствора при температуре закалки.

Показано, что введение добавок серебра в количестве до 0,6% в сплавы системы Al–Cu–Mg приводит к увеличению прочностных характеристик (до 10%) при практическом сохранении относительного удлинения, усталостной долговечности (более чем на 15%), трещиностойкости (до 10%) и стойкости к коррозионному растрескиванию, что благоприятно влияет на ресурс и надежность изделий авиационной техники. Таким образом, можно сделать вывод о перспективности введения добавки серебра в сплавы системы Al–Cu–Mg, что реализовано при разработке нового сплава В-1167.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы: Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
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. Kaigorodova L.I., Sel'nikhina E.I., Tkachenko E.A., Senatorova O.G. Effect of small additions of Sc and Zr on the structure and mechanical properties of an Al–Zn–Mg–Cu alloy //The Physics of Metals and Metallography. 1996. V. 81. №5. P. 513–519.
5. Новиков И.И., Золоторевский В.С., Портной В.К. и др. Металловедение. Т. 2. М.: МИСиС. 2009. С. 262–312.
6. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. Энциклопедия /Под ред. И.Н. Фридляндера, Е.Н. Каблова. М.: Машиностроение. 2001. С. 57–91.
7. Рохлин Л.Л., Бочвар Н.Р., Добаткина Т.В. Совместное влияние некоторых переходных металлов на изменение фазового состава и рекристаллизацию алюминия //Технология легких сплавов. 2009. №2. С. 20–27.

8. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
9. Захаров В.В., Елагин В.И., Ростова Т.Д., Филатов Ю.А. Металловедческие принципы легирования алюминиевых сплавов скандием //Технология легких сплавов. 2010. №1. С. 67–73.
10. Ryabov D.K., Kolobnev N.I., Samohvalov S.V. Effect of scandium addition on mechanical properties and corrosion resistance of medium strength Al–Zn–Mg(–Cu) alloy //Materials Science Forum. 2014. V. 794–796. P. 241–246.
11. Телешов В.В., Головлева А.П. Влияние малых добавок серебра и параметров технологии изготовления на структуру и свойства полуфабрикатов из сплавов системы Al–Cu–Mg–Ag–X_i //Технология легких сплавов. 2006. №1–2. С. 99–119.
12. Чирков Е.Ф. Темп разупрочнения при нагревах – критерий оценки жаропрочности конструкционных сплавов систем Al–Cu–Mg и Al–Cu //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 02 (viam-works.ru).
13. Song Bai, Zhiyi Liu, Yanxia Gu, Xuanwei Zhou, Sumin Zeng. Microstructures and fatigue fracture behavior of an Al–Cu–Mg–Ag alloy with a low Cu/Mg ratio //Materials Science and Engineering A. 2011. №530. P. 473–480.
14. Xiao Yan Liu, Qing Lin Pan, Cong Ge Lu, Yun Bin He, Wen Bin Li, Wen Jie Liang. Microstructure and mechanical properties of Al–Cu–Mg–Mn–Zr alloy with trace amounts Ag //Materials Science and Engineering A. 2009. №525. P. 128–132.
15. Antipov V.V., Vakhromov R.O., Phedorenko T.P., Lukina E.A. Structure and Properties of Semiproducts from Al–Cu–Mg–Ag V-1213 Alloy /In: 12-th International Conference on Aluminium Alloy. Yokohama: The Japan Institute of Light Metals. 2010. P. 2405–2410.
16. Григорьев М.В., Антипов В.В., Вахромов Р.О., Сенаторова О.Г., Овсянников Б.В. Структура и свойства слитков из сплава системы Al–Cu–Mg с микродобавками серебра //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 3–6.
17. Рябов Д.К., Колобнев Н.И. Изменение механических свойств сплава 1913 при двухступенчатом искусственном старении //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 3–7.
18. Рябов Д.К., Колобнев Н.И., Самохвалов С.В., Махсидов В.В. Влияние предварительного естественного старения на свойства сплава 1913 в искусственно состаренном состоянии //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 8–11.

19. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него: пат. 2278179 Рос. Федерация; опубл. 20.06.2006. Бюл. №17.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials] //Vse materialy: Jenciklopedicheskij spravochnik. 2008. №3. S. 2–14.
2. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija 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 [Aluminum wrought alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 167–182.
4. Kaigorodova L.I., Sel'nikhina E.I., Tkachenko E.A., Senatorova O.G. Effect of small additions of Sc and Zr on the structure and mechanical properties of an Al–Zn–Mg–Cu alloy //The Physics of Metals and Metallography. 1996. V. 81. №5. P. 513–519.
5. Novikov I.I., Zolotarevskij V.S., Portnoj V.K. i dr. Metallovedenie [Metallography]. T. 2. M.: MISiS. 2009. S. 262–312.
6. Cvetnye metally i splavy. Kompozicionnye metallicheskie materialy [Non-ferrous metals and alloys. Composite Metallic Materials]: Jenciklopedija /Pod red. I.N. Fridljandera, E.N. Kablova. M.: Mashinostroenie. 2001. S. 57–91.
7. Rohlin L.L., Bochvar N.R., Dobatkina T.V. Sovmestnoe vlijanie nekotoryh perehodnyh metallov na izmenenie fazovogo sostava i rekristallizaciju aljuminija [The joint effect of some transition metals on the change in the phase composition and recrystallization of aluminum] //Tehnologija legkih splavov. 2009. №2. S. 20–27.
8. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye jelementy – materialy sovremennyh i budushhih vysokih tehnologij [Rare metals and rare-earth elements – materials for current and future high-tech] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
9. Zaharov V.V., Elagin V.I., Rostova T.D., Filatov Ju.A. Metallovedcheskie principy legirovanija aljuminievyh splavov skandiem [Metalscience principles alloying of aluminum alloys with scandium] //Tehnologija legkih splavov. 2010. №1. S. 67–73.

10. Ryabov D.K., Kolobnev N.I., Samohvalov S.V. Effect of scandium addition on mechanical properties and corrosion resistance of medium strength Al–Zn–Mg(–Cu) alloy //Materials Science Forum. 2014. V. 794–796. P. 241–246.
11. Teleshov V.V., Golovleva A.P. Vlijanie malyh dobavok srebra i parametrov tehnologii izgotovlenija na strukturu i svojstva polufabrikatov iz splavov sistemy Al–Cu–Mg–Ag–Xi [The influence of small additions of silver and manufacturing technology parameters on the structure and properties of semi-finished products of alloy systems Al–Cu–Mg–Ag–Xi] //Tehnologija legkih splavov. 2006. №1–2. S. 99–119.
12. Chirkov E.F. Temp razuprochnenija pri nagrevah – kriterij ocenki zharoprochnosti konstrukcionnyh splavov sistem Al–Cu–Mg i Al–Cu [Pace of softening when heated - evaluation criterion of heat resistance of structural alloys systems Al–Cu–Mg and Al–Cu] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 02 (viam-works.ru).
13. Song Bai, Zhiyi Liu, Yanxia Gu, Xuanwei Zhou, Sumin Zeng. Microstructures and fatigue fracture behavior of an Al–Cu–Mg–Ag alloy with a low Cu/Mg ratio //Materials Science and Engineering A. 2011. №530. P. 473–480.
14. Xiao Yan Liu, Qing Lin Pan, Cong Ge Lu, Yun Bin He, Wen Bin Li, Wen Jie Liang. Microstructure and mechanical properties of Al–Cu–Mg–Mn–Zr alloy with trace amounts Ag //Materials Science and Engineering A. 2009. №525. P. 128–132.
15. Antipov V.V., Vakhromov R.O., Phedorenko T.P., Lukina E.A. Structure and Properties of Semiproducts from Al–Cu–Mg–Ag V-1213 Alloy /In: 12-th International Conference on Aluminium Alloy. Yokohama: The Japan Institute of Light Metals. 2010. P. 2405–2410.
16. Grigor'ev M.V., Antipov V.V., Vahromov R.O., Senatorova O.G., Ovsjannikov B.V. Struktura i svojstva slitkov iz splava sistemy Al–Cu–Mg s mikrodobavkami srebra [Structure and properties of alloy ingots of Al–Cu–Mg with micro silver] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №3. S. 3–6.
17. Rjabov D.K., Kolobnev N.I. Izmenenie mehanicheskikh svojstv splava 1913 pri dvuhstupenchatom iskusstvennom starenii [Changes in mechanical properties of alloy 1913 with a two-stage artificial aging] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №4. S. 3–7.
18. Rjabov D.K., Kolobnev N.I., Samohvalov S.V., Mahsidov V.V. Vlijanie predvaritel'nogo estestvennogo starenija na svojstva splava 1913 v iskusstvenno sostarennom sostojanii [Effect of prior natural aging on the properties of the alloy 1913, artificially aged condition] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №2. S. 8–11.
19. Splav na osnove aljuminija i izdelie, vypolnennoe iz nego [Aluminum-based alloy and article made therefrom]: pat. 2278179 Ros. Federacija; opubl. 20.06.2006. Bjul. №17.