

ВИАМ/2015-Тр-04-01



УДК 669.715

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-1-1

**НОВЫЙ СПЛАВ СИСТЕМЫ Al–Cu–Mn
ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Г.Г. Клочков

Ю.Ю. Клочкова

В.А. Романенко

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 669.715

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-1-1

Г.Г. Клочков¹, Ю.Ю. Клочкова¹, В.А. Романенко¹

НОВЫЙ СПЛАВ СИСТЕМЫ Al–Cu–Mn ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Приведены результаты исследований листов из нового свариваемого деформируемого сплава марки В-1208 (типа 1201) на основе системы Al–Cu–Mn, дополнительно легированного микродобавками Sc, Ag и Zr. Листы изготовлены в условиях промышленного производства ОАО «КУМЗ». Показано, что комплексное легирование серебром, скандием и цирконием приводит к повышению прочностных и ресурсных характеристик, коррозионной стойкости и свариваемости. Исследовано влияние режимов термической обработки на механические свойства листов. Проведены комплексные исследования механических, коррозионных и эксплуатационных свойств. Оценена свариваемость с помощью аргоно-дуговой сварки (ААрДЭС) и сварки трением с перемешиванием (СТП). Проведено сравнение со сплавами-аналогами 1201 и 2219.

Ключевые слова: сплав В-1208, система Al–Cu–Mn, легирование, серебро, скандий, цирконий, термическая обработка, структура, механические свойства, коррозионная стойкость, свариваемость.

G.G. Klochkov, Y.Y. Klochkova, V.A. Romanenko

NEW ALLOY OF Al–Cu–Mn SYSTEM FOR THE SPACE HARDWARE

The investigation results of the new weldable wrought alloy V-1208 based on Al–Cu–Mn system with addition of Sc, Ag and Zr are represented. Sheets from this alloy were manufactured at JSC «KUMW». It was shown that scandium, silver and zirconium complex additions increase strength and life-time characteristics, corrosion resistance and weldability. Influence of heat treatment modes on the sheets mechanical properties was studied. Complex investigations of mechanical, corrosion and operational characteristics are represented. Weldability with argon arc welding and friction stir welding are evaluated. Comparison with 1201 and 2219 alloys is carried out.

Keywords: V-1208 alloy, Al–Cu–Mn system, alloying, silver, scandium, zirconium, heat treatment, structure, mechanical properties, corrosion resistance, weldability.

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

С развитием ракетно-космической техники к выбору материала предъявляются следующие требования:

- сплав должен иметь достаточный уровень прочностных и ресурсных характеристик;
- высокая технологичность и энергосбережение при металлургическом производстве – возможность получения различных видов полуфабрикатов;
- технологичность при изготовлении деталей и сборке различных узлов конструкции, в том числе с применением сварки – один из наиболее высокопроизводительных и экономичных методов создания неразъемных соединений, который позволяет производить элементы конструкций, наиболее рациональные по формам и размерам, что делает их ремонтпригодными;
- сплав не должен содержать высокотоксичных компонентов (кадмий, свинец, ртуть, бериллий), которые испаряются при сварке [1–3].

На протяжении многих лет как в России, так и за рубежом, в конструкции изделий космической техники, где необходимо сочетание повышенных прочностных характеристик как при комнатной, повышенных, так и при криогенных температурах, успешно применяются полуфабрикаты из сплавов системы Al–Cu–Mn с дополнительными микродобавками. Эти сплавы хорошо свариваются всеми видами сварки и имеют достаточно высокий уровень прочностных характеристик при температуре жидкого водорода, что позволяет использовать их в изделиях, работающих при криогенных температурах [4–7]. В отечественном производстве для этих целей традиционно применяется сплав 1201, из которого изготовлены сварные топливные баки ракеты «Протон-М» и сварная кабина пилотов корабля «Буран». За рубежом применяется сплав-аналог марки 2219. Эти сплавы при понижении температуры вплоть до температуры жидкого водорода или гелия не только не охрупчиваются, а, наоборот, упрочняются [8; 9; 10, С. 12; 11; 12; С. 175–183] (рис. 1).

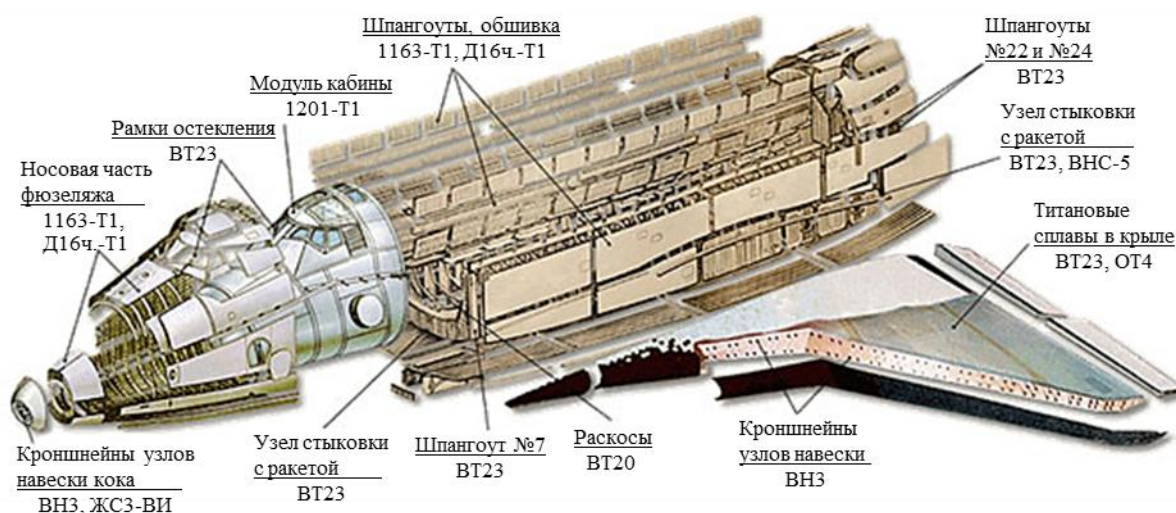


Рис. 1. Металлические материалы в конструкции корабля «Буран»

Совершенствование изделий космической техники и расширение диапазона выполняемых ими задач влекут за собой необходимость создания новых сплавов, имеющих наилучшее сочетание повышенной прочности с хорошей свариваемостью, при возможности изготовления из них широкой номенклатуры полуфабрикатов [12, С. 13–14; 13].

В связи с этим была поставлена задача разработать свариваемый сплав типа 1201 с повышенными характеристиками прочности. Специалистами ВИАМ разработан новый свариваемый деформируемый термоупрочняемый сплав В-1208 на базе системы Al–Cu–Mn с микродобавками Ag, Sc, Zr и др. К настоящему времени на серийном оборудовании ОАО «КУМЗ» освоено опытно-промышленное производство листов, а также поковок и прессованных профилей.

Основной упрочняющей фазой в сплавах этой системы является Al_2Cu . Повышение механических характеристик, улучшение свариваемости, жаропрочности и коррозионной стойкости достигается путем выбора оптимального состава и комплексного легирования (Ag, Zr, Sc), а также за счет режимов деформации и термической обработки [14–16]. Добавки серебра в небольших количествах способствуют упрочнению при искусственном старении алюминиевых сплавов, воздействуя на состав и кристаллографические ориентировки упрочняющих фаз, выделяющихся в процессе искусственного старения. Кроме того, введение серебра позволяет повысить коррозионную стойкость [17]. Комплексное легирование серебром, цирконием и скандием алюминиевых сплавов приводит к улучшению их свариваемости, повышая прочность основного материала и сварного соединения,

оказывая положительное влияние на трещиностойкость [18–23], при этом цирконий и скандий являются модификаторами литой структуры [24–28].

Материалы и методы

В данной статье представлены результаты комплексных исследований структуры и свойств листов из сплава В-1208, изготовленных на промышленном металлургическом оборудовании ОАО «КУМЗ», а также свойства сварных соединений из них.

При выборе химического состава нового сплава руководствовались данными, полученными при использовании программного комплекса Thermo-Calc (версия 4.0, база данных TTAL8). Для входных данных максимальные и минимальные значения концентраций легирующих компонентов выбирали по результатам патентных исследований, литературных научных данных и ранее проведенных исследований.

Микроструктуру листов исследовали на шлифах размером 15×15 мм при помощи металлографического микроскопа Neophot 30, оснащенного цифровой камерой фирмы Olympus. Микрошлифы протравливали на установке для электролитической полировки и травления с использованием 2%-ного водного раствора борофторводородной кислоты (НВФ) с одновременным пропусканием электрического тока ($U=15–20$ В, продолжительность от 3 до 6 мин, катод – свинец). Размер зерна определяли методом секущих.

Исследования механических свойств при статических и динамических нагрузках, усталостных характеристик, вязкости разрушения, коррозионных свойств листов из сплава В-1208-Т1, оценка их свариваемости проведены в соответствии с действующими стандартами и методиками РФ.

Результаты и обсуждение

Известно, что, для получения высоких механических свойств при комнатной температуре, жаропрочности, а также высокой сопротивляемости образованию кристаллизационных трещин при охлаждении, содержание меди в сплавах системы Al–Cu должно быть близким к предельной ее растворимости в алюминии. Марганец в пределах от 0,2 до 0,8% (по массе) повышает жаропрочность и тормозит рост зерна, однако присутствие его в количестве $>0,4\%$ (по массе) ухудшает свариваемость материала. На свариваемость материала сильное влияние оказывает примесь магния.

Присутствие ее в сплаве $>0,02\%$ (по массе) резко снижает сопротивляемость материала кристаллизационным трещинам при сварке [29, С. 125–135].

Для оценки влияния добавки Sc на механические свойства при растяжении при комнатной температуре проведены исследования листов двух партий – со скандием и без него (табл. 1). Значительный эффект повышения прочностных свойств наблюдается при использовании правки растяжением после закалки. В связи с этим проведена правка растяжением листов со степенью остаточной деформации от 2 до 3%, далее – искусственное старение, а затем определены механические свойства при растяжении в продольном направлении, минимальные значения которых приведены в табл. 1. Термическая обработка и правка растяжением листов проводились в лабораторных условиях.

Таблица 1

Механические свойства листов из сплава В-1208-Т1

Сплав В-1208-Т1	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ε
	МПа		%	
Без Sc	475	380	12	2–3
	450	340	11	–
С добавкой Sc	490	390	10,5	2–3
	470	360	13	–

Исследования механических свойств показали, что наилучший уровень свойств имеют листы из сплава, легированного скандием, подвергнутые правке растяжением со степенью остаточной деформации 2–3%.

Для выбора режима искусственного старения листов, обеспечивающего максимальный уровень прочности, проведено исследование влияния различных режимов на механические свойства (табл. 2). Закалка и правка растяжением ($\varepsilon \approx 2\%$) проводились в цеховых условиях, искусственное старение – в лабораторных.

Таблица 2

**Механические свойства листов из сплава В-1208-Т1
(закалка в цехе, искусственное старение в лаборатории)**

Режим старения		σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ , %
температура, °С	продолжительность выдержки	МПа		
160	Длительная	460–480	370–400	9,5–12
180	-«-	425–435	335–340	8–9,7
190	Короткая	415–425	325–335	8,9–10
	Длительная	405–415	305–315	8,4–11

Как следует из полученных результатов, наилучшим уровнем механических свойств обладают листы после искусственного старения при температуре 160°С – пре-

дел прочности и условный предел текучести выше не менее чем на 25–35 МПа в сравнении с другими исследуемыми режимами.

Микроструктура листов – рекристаллизованная, мелкозернистая с размером зерна на 20–40 мкм (рис. 2).

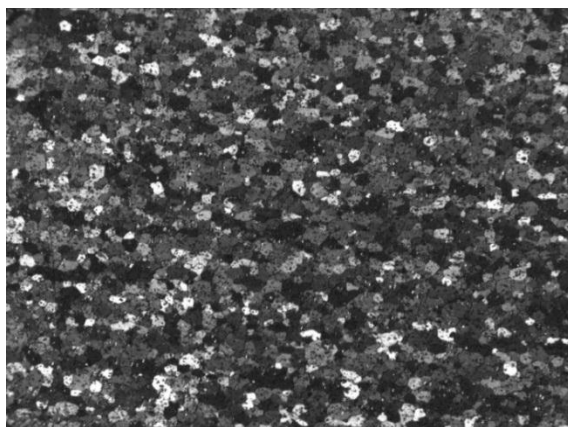


Рис. 2. Микроструктура ($\times 100$) листов из сплава В-1208-Т1

Критический коэффициент интенсивности напряжений в условиях плосконапряженного состояния (K_c^y) определен на образцах шириной 100 мм и составил $60 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$.

Проведены также испытания механических свойств при повышенных и отрицательных температурах (табл. 3).

Таблица 3

Механические свойства листов из сплава В-1208-Т1 при различных температурах						
Характеристика	Значения характеристики при температуре испытания, °С					
	-196	-70	+20	+125	+150	+175
σ_b , МПа	510–525	480–485	465	425–430	390–395	365–375
$\sigma_{0,2}$, МПа	425–450	395–410	395–400	375	350–355	330–340
δ , %	8–8,5	10–13	10–12,5	17–18	21–23	22–23
KCU , кДж/м ²	–	180–202	169–180	–	–	–

При отрицательных температурах испытания прочностные свойства повышаются на 5–10%; при повышении температуры испытания от 125 до 175°С, монотонно снижаясь, – остаются на достаточно высоком уровне. Ударная вязкость при отрицательной температуре повышается на 6%.

Определена статическая чувствительность листов к отверстию ($\sigma_{в.отв}/\sigma_{в}$) при растяжении при 20°C ($K_I=2,6$). Листы практически не чувствительны к концентратору, отношение $\sigma_{в.отв}/\sigma_{в}$ составляет ~ 1 .

Механические свойства после эксплуатационных нагревов в течение 100 и 1000 ч при температуре 125°C ($\sigma_{в}=460\text{--}470$ МПа после выдержки в течение 100 ч, $\sigma_{в}=455\text{--}460$ МПа – после 1000 ч) находятся на уровне с исходными значениями, а при 150°C ($\sigma_{в}=445\text{--}460$ МПа – после 100 ч, $\sigma_{в}=420\text{--}430$ МПа – после 1000 ч) и 175°C ($\sigma_{в}=415\text{--}425$ МПа – после 100 ч, $\sigma_{в}=390\text{--}395$ МПа – после 1000 ч) незначительно снижаются.

Исследования коррозионной стойкости листов показали следующие результаты: глубина межкристаллитной коррозии (МКК) – до 0,16 мм, расслаивающая коррозия (РСК): 3 балл. При определении склонности к коррозионному растрескиванию (КР) на установке «Сигнал» образцы простояли >45 сут без разрушения при напряжении 270 МПа в поперечном направлении относительно оси прокатки.

Исследована свариваемость листов из сплава В-1208-Т1. Сварку проводили поперек направления прокатки листа. Сплав хорошо сваривается автоматической аргонодуговой сваркой (ААрДЭС) и сваркой трением с перемешиванием (СТП). ААрДЭС осуществляется с применением присадочной проволоки Св-1201. Прочность сварных соединений после различных режимов термической обработки приведена в табл. 4.

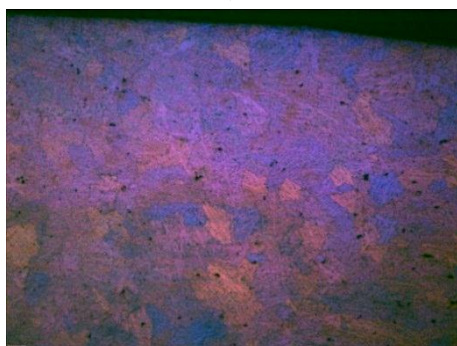
Таблица 4

Свойства сварных соединений листов из сплава В-1208

Вид сварки	Режим термообработки	$\sigma_{в.св}/\sigma_{в}$	Угол изгиба α , град	$KCU_{шов}$, кДж/м ²
Автоматическая аргоно-дуговая (ААрДЭС)	Закалка+сварка+искусственное старение	0,75	60	260
	Закалка+искусственное старение+сварка	0,70	60	270
	То же+ искусственное старение	0,80	35	185
Трением с перемешиванием (СТП)	Закалка+сварка+искусственное старение	0,70	80	130
	Закалка+искусственное старение+сварка	0,80	95	295
	То же+ искусственное старение	0,80	150	320

Исследования показали, что применение дополнительной термической обработки (искусственного старения) после сварки повышает прочностные свойства сварных соединений, при сохранении характеристик пластичности (α) и ударной вязкости на достаточно высоком уровне.

а)



б)

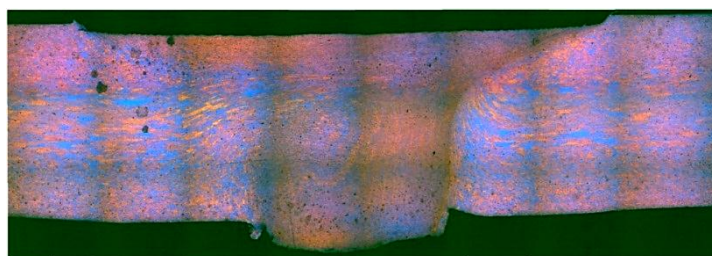


Рис. 3. Микроструктура сварных соединений листов из сплава В-1208:
a – ААрДЭС, $\times 200$; *б* – СТП, $\times 50$

На рис. 3 представлена микроструктура сварных соединений листов, выполненных ААрДЭС (рис. 3, *a*) и СТП (рис. 3, *б*). В сварных соединениях отсутствуют дефекты. Из-за больших скоростей охлаждения наблюдается резкий переход от сварного шва к основному металлу.

Листы из сплава В-1208-Т1 превосходят листы из отечественного 1201-Т1 и зарубежного 2219-Т8 (США) сплавов-аналогов по прочностным и пластическим характеристикам (табл. 5).

Таблица 5

Сравнительные характеристики листов из сплавов В-1208-Т1, 1201-Т1, 2219-Т8

Сплав	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %	E , ГПа	K_{CU} , кДж/м ²
	МПа				
В-1208-Т1	460	360	9,5	72	169–180
1201-Т1	412	314	11	70	120
2219-Т8	420	330	8	72	–

Заключение

Разработан новый сплав В-1208-Т1 системы Al–Cu–Mn. Отмечена его высокая технологическая пластичность при промышленном изготовлении полуфабрикатов. К настоящему времени на серийном оборудовании ОАО «КУМЗ» освоено опытно-промышленное производство листов, а также поковок и прессованных профилей.

Листы из сплава В-1208-Т1, дополнительно легированного Ag, Sc и Zr, имеют повышенные прочностные характеристики как основного материала, так и сварного соединения, по сравнению с серийными сплавами-аналогами (1201-Т1, 2219-Т8). Правка растяжением после закалки способствует повышению прочностных характеристик, практически не снижая пластичности.

Сплав В-1208-Т1 сваривается основными методами сварки ААрДЭС и СТП. Прочность сварных соединений при 20°С составляет 0,7–0,8 от прочности основного металла.

Листы из сплава В-1208-Т1 обладают высокими прочностными характеристиками при комнатной, повышенных и отрицательных температурах и рекомендуются к применению для сварных и несварных конструкций (топливные баки) изделий косми-

ческой техники, работающих длительно в интервале температур от -196 до $+150^{\circ}\text{C}$, кратковременно – до $+175^{\circ}\text{C}$, взамен аналогичных полуфабрикатов из сплава 1201-Т1, что позволит повысить прочность и надежность конструкции.

Авторы статьи выражают благодарность ведущему инженеру ВИАМ Е.Н. Иоде, а также специалистам ОАО «КУМЗ» Б.В. Овсянникову и В.И. Попову, которые внесли неоценимый вклад в проведенную работу.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Сплав на основе алюминия: пат. 2447173 Рос. Федерация; опубл. 05.04.2011.
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. Клочков Г.Г., Плотников А.Д. Применение новых сплавов в ракетно-космической технике //Цветные металлы. 2013. №9. С. 54–57.
5. Фридляндер И.Н., Антипов В.В., Колобнев Н.И., Якимова Е.Г. Конструкционные жаропрочные алюминиевые сплавы /В кн. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный. науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 172–180.
6. Rioja R.J., Denzer D.K., Mooy D., Venema G. Lighter and Stiffer Materials for Use in Space Vehicles /Proceedings of the 13-th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-13). 2012. P. 593–598.
7. Polmear I.J. Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals //Elsevier Butterworth-Heinemann. U.K. 2006. 132 p.
8. Сенаторова О.Г., Колобнев Н.И., Ткаченко Е.А. И.Н. Фридляндер и его сплавы //Цветные металлы. 2013. №9. С. 28–30.
9. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. №51. С. 3–9.
10. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» /Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Фонд «Наука и жизнь». 2013. С. 127.
11. Мохов В. Модуль для Бурана //Новости космонавтики. 1998. №23/24.
12. Фридляндер И.Н. Воспоминания о создании авиакосмической и атомной техники из алюминиевых сплавов. М.: Наука. 2005. 277 с.
13. Anil K.S., Raja K.M., Anirban M., Ahmet A. Vehicle lightweighting: challenges and opportunities with aluminum /Proceedings of the 13-th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-13). 2012. P. 609–622.
14. Елагин В.И. Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами. М.: Metallurgia. 1975. 248 с.

15. 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).
16. Григорьев М.В., Антипов В.В., Вахромов Р.О. и др. Структура и свойства слитков из сплава системы Al–Cu–Mg с микродобавками серебра //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 3–6.
17. Иванова А.О., Вахромов Р.О., Григорьев М.В., Сенаторова О.Г. Исследование влияния малых добавок серебра на структуру и свойства ресурсных сплавов системы Al–Cu–Mg //Труды ВИАМ. 2014. №10. Ст. 01 (viam-works.ru).
18. Davydov V.G., Rostova T.D., Zakharov V.V. Scientific principles of making an alloying addition of scandium to aluminium alloys //Material Science and Engineering. A 280. 2000. P. 30–36.
19. Royset J., Ryum N. Scandium in aluminium alloys //International Material Reviews. 2005. V. 50. №1. P. 19–44.
20. Sawtell R.R., Jensen C.L. Mechanical properties and microstructures of Al–Mg–Sc alloys //Metallurgical and Material Transactions A. 1990. V. 21. №1. P. 421–430.
21. Ocenasek V., Slamova M. Effect of Sc and Zr on the structure and properties of Al–Mn1.5 alloy //Material Characteristics. 2001. V. 47. P. 157–162.
22. Fuller C.B., Seidman D.N., Dunand D.C. Evolution of nanoscale precipitates in Al microalloyed with Sc and Er //Acta Materialia. 2003. V. 51. P. 4803–4814.
23. Mondol S., Praveen G., Kumar S. et al. Effect of Addition of Sc and Mg on 2219 Al Alloy /Proceedings of the 12-th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-12). 2010. P. 447–452.
24. Lee Y.Y. Scandium Effect on Mechanical and Physical Properties for 2x19 Al Alloy /Proceedings of the 12-th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-12). 2010. P. 2281–2286.
25. Nikulin I., Kipelova A., Gazizov M. et al. Novel Al–Cu–Mg–Ag Alloy for High Temperature Applications /Proceedings of the 12-th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-12). 2010. P. 2303–2308.
26. Vural M., Caro J. Experimental analysis and constitutive modeling for the newly developed 2139-T8 alloy //J. Material Sci. Eng. 2009. V. 520. №1–2. P. 56–65.
27. Pouget G., Sigli C. Thermal Stability of Al–Cu–Mg Alloys /Proceedings of the 14-th ICAA. 2014. P. 691–696.
28. Захаров В.В. Особенности кристаллизации алюминиевых сплавов, легированных скандием //МиТОМ. 2011. №9. С. 12–18.
29. Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. М.: Металлургия. 1979. 208 с.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Splav na osnove aljuminija [Alloy on the basis of aluminum]: pat. 2447173 Ros. Federacija; opubl. 05.04.2011.
3. Antipov V.V., Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Vahromov R.O. Aljuminievye deformiruemye splavy [Aluminum deformable alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 167–182.
4. Klochkov G.G., Plotnikov A.D. Primenenie novyh splavov v raketno-kosmicheskoj tehnikе [Application of new alloys in space-rocket equipment] //Cvetnye metally. 2013. №9. S. 54–57.
5. Fridljander I.N., Antipov V.V., Kolobnev N.I., Jakimova E.G. Konstrukcionnye zharoprochnye aljuminievye splavy [Structural heat resisting aluminum alloys] /V kn. 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007: Jubilejnyj. nauch.-tehnič. sb. M.: VIAM. 2007. S. 172–180.
6. Rioja R.J., Denzer D.K., Mooy D., Venema G. Lighter and Stiffer Materials for Use in Space Vehicles /Proceedings of the 13-th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-13). 2012. P. 593–598.
7. Polmear I.J. Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals //Elsevier Butterworth-Heinemann. U.K. 2006. 132 p.
8. Senatorova O.G., Kolobnev N.I., Tkachenko E.A., I.N. Fridljander i ego splavy [Fridlyander and his alloys] //Cvetnye metally. 2013. №9. S. 28–30.
9. Kablov E.N. Materialy dlja izdelija «Buran» – innovacionnye reshenija formirovanija shestogo tehnologičeskogo uklada [Materials for the product «Buran» – innovative solutions of forming of the sixth technological way] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S1. S. 3–9.
10. Dospēhi dlja «Burana». Materialy i tehnologii VIAM dlja MKS «Jenergija–Buran» [Armor for «Buran». Materials and VIAM technologies for ISS of «Energiya–Buran»] /Pod obshh. red. E.N. Kablova. M.: Fond «Nauka i zhizn'». 2013. S. 127.
11. Mohov V. Modul' dlja Burana [The module for the Buran] //Novosti kosmonavtiki. 1998. №23/24.
12. Fridljander I.N. Vospominanija o sozdanii aviakosmicheskoj i atomnoj tehniky iz aljuminievych splavov [Memories of creation of aerospace and nuclear equipment from aluminum alloys]. M.: Nauka. 2005. 277 s.
13. Anil K.S., Raja K.M., Anirban M., Ahmet A. Vehicle lightweighting: challenges and opportunities with aluminum /Proceedings of the 13-th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-13). 2012. P. 609–622.
14. Elagin V.I. Legirovanie deformiruemyh aljuminievych splavov perehodnymi metallami [Alloying of deformable aluminum alloys transition metals]. M.: Metallurgija. 1975. 248 s.
15. Chirkov E.F. Temp razuprochnenija pri nagrevah – kriterij ocenki zharoprochnosti konstrukcionnyh splavov sistem Al–Cu–Mg i Al–Cu [Rate of loss of strength when heatings – criterion

- of assessment of thermal stability of structural alloys of Al–Cu–Mg and Al–Cu systems] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 02 (viam-works.ru).
16. Grigor'ev M.V., Antipov V.V., Vahromov R.O. i dr. Struktura i svojstva slitkov iz splava sistemy Al–Cu–Mg s mikrodozvokami serebra [Structure and properties of ingots from Al–Cu–Mg system alloy with silver microadditives] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №3. S. 3–6.
 17. Ivanova A.O., Vahromov R.O., Grigor'ev M.V., Senatorova O.G. Issledovanie vlijaniya malyh dozvok serebra na strukturu i svojstva resursnyh splavov sistemy Al–Cu–Mg [Research of influence of small additives of silver on structure and properties of resource alloys of Al-Cu-Mg system] //Trudy VIAM. 2014. №10. St. 01 (viam-works.ru).
 18. Davydov V.G., Rostova T.D., Zakharov V.V. Scientific principles of making an alloying addition of scandium to aluminium alloys //Material Science and Engineering. A 280. 2000. P. 30–36.
 19. Royset J., Ryum N. Scandium in aluminium alloys //International Material Reviews. 2005. V. 50. №1. P. 19–44.
 20. Sawtell R.R., Jensen C.L. Mechanical properties and microstructures of Al–Mg–Sc alloys //Metallurgical and Material Transactions A. 1990. V. 21. №1. P. 421–430.
 21. Ocenasek V., Slamova M. Effect of Sc and Zr on the structure and properties of Al–Mn1.5 alloy //Material Characteristics. 2001. V. 47. P. 157–162.
 22. Fuller C.B., Seidman D.N., Dunand D.C. Evolution of nanoscale precipitates in Al microalloyed with Sc and Er //Acta Materialia. 2003. V. 51. P. 4803–4814.
 23. Mondol S., Praveen G., Kumar S. et al. Effect of Addition of Sc and Mg on 2219 Al Alloy /Proceedings of the 12-th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-12). 2010. P. 447–452.
 24. Lee Y.Y. Scandium Effect on Mechanical and Physical Properties for 2x19 Al Alloy /Proceedings of the 12-th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-12). 2010. P. 2281–2286.
 25. Nikulin I., Kipelova A., Gazizov M. et al. Novel Al–Cu–Mg–Ag Alloy for High Temperature Applications /Proceedings of the 12-th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA-12). 2010. P. 2303–2308.
 26. Vural M., Caro J. Experimental analysis and constitutive modeling for the newly developed 2139-T8 alloy //J. Material Sci. Eng. 2009. V. 520. №1–2. P. 56–65.
 27. Pouget G., Sigli C. Thermal Stability of Al–Cu–Mg Alloys /Proceedings of the 14-th ICAA. 2014. P. 691–696.