



УДК 669.715

doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-5-5

**ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ДОБАВОК ЭЛЕМЕНТОВ С ВЫСОКОЙ  
РАСТВОРИМОСТЬЮ В АЛЮМИНИИ НА  
МИКРОСТРУКТУРУ СЛИТКОВ И ХОЛОДНОКАТАНЫХ  
ЛИСТОВ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al–Mg–Sc**

*Д.К. Рябов*

*Р.О. Вахромов*

*А.О. Иванова*

**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.

*Д.К. Рябов<sup>1</sup>, Р.О. Вахромов<sup>1</sup>, А.О. Иванова<sup>1</sup>*

## **ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ДОБАВОК ЭЛЕМЕНТОВ С ВЫСОКОЙ РАСТВОРИМОСТЬЮ В АЛЮМИНИИ НА МИКРОСТРУКТУРУ СЛИТКОВ И ХОЛОДНОКАТАНЫХ ЛИСТОВ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al–Mg–Sc**

*Для создания современных изделий авиационной и ракетно-космической техники необходимо разрабатывать новые алюминиевые сплавы, обладающие повышенными характеристиками. С целью повышения механических свойств деформируемых алюминиевых сплавов системы Al–Mg перспективной является добавка скандия, однако малые добавки элементов с высокой растворимостью также могут привести к изменениям структуры и свойств полуфабрикатов.*

*Проведено исследование влияния добавок серебра, цинка и меди в количестве, не превышающем предельную растворимость элементов, на структуру слитков и холоднокатаных листов, а также на уровень механических свойств при растяжении сплава типа В-1579.*

**Ключевые слова:** *сплав системы Al–Mg–Sc, слитки, микроструктура, легирование, скандий.*

*D.K. Ryabov, R.O. Vakhromov, A.O. Ivanova*

## **EFFECT OF SMALL ADDITION OF ALLOYING ELEMENTS WITH HIGH WITH HIGH SOLUBILITY IN ALUMINIUM ON MICROSTRUCTURE OF INGOTS AND COLD-ROLLED SHEETS OF Al–Mg–Sc ALLOY**

*For advanced aerospace application it is necessary to develop aluminium alloys of new generation with improved service characteristics. For the purpose of increasing mechanical properties of Al–Mg alloys it is purposeful to add small amount of scandium, but small additives of alloying elements with high solubility also can influence microstructure and properties of semi-products.*

*This study deals with effect of small additives of silver, zink and copper in amount not exceeding maximum solubility on microstructure of ingots and cold-rolled sheets of V-1579 type alloy and it's mechanical properties.*

**Keywords:** *Al–Mg–Sc, ingots, microstructure, alloying, scandium.*

---

<sup>1</sup>Федеральное 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

Алюминиевые сплавы в настоящее время остаются одним из основных конструкционных материалов для изделий, выпускаемых предприятиями различных отраслей промышленности. Повышение весовой эффективности изделий техники специального назначения и авиационной техники является актуальной задачей, которая в основном решается благодаря внедрению в их конструкцию новых перспективных алюминиевых сплавов [1–4].

Для изделий ракетно-космической техники актуальными являются вопросы сварки легких алюминиевых сплавов. Применение сварных конструкций позволяет существенно повысить их весовую эффективность в сравнении с традиционным клепаным вариантом на 10–15%, что в совокупности с применением сплавов пониженной плотности позволяет добиться существенного снижения массы отдельных элементов [5].

Высокими характеристиками свариваемости обладают алюминиевые термически неупрочняемые сплавы на основе системы Al–Mg, которые сочетают средний уровень прочности и высокую коррозионную стойкость. Однако необходимо отметить, что уровень прочности данных сплавов уступает уровню прочности высокопрочных алюминиевых сплавов и дюралей, что требует применения в конструкции деталей с массивными сечениями.

Повышение прочности алюминиевых сплавов данной системы легирования можно обеспечить двумя путями: во-первых, благодаря применению холодной пластической деформации, повышающей плотность дислокаций и прочностные свойства и снижающей характеристики относительного удлинения (при данной обработке существенно снижается коррозионная стойкость материала), во-вторых – путем введения в состав сплава скандия (при этом в структуре образуются наноразмерные дисперсоиды, являющиеся естественной преградой для движения дислокаций) [6]. В связи с низкой предельной растворимостью скандия для повышения механических свойств достаточно введения его малой добавки (не более 0,5% (по массе)). Скандий существенно изменяет

микроструктуру деформированных полуфабрикатов, при этом характеристики коррозионной стойкости не снижаются [7–9].

Кроме того, актуальными являются вопросы влияния малых добавок легирующих элементов на служебные характеристики. Малые добавки растворимых элементов могут обеспечить как твердорастворное упрочнение, так и повлиять на образование метастабильных фаз, изменяя характеристики прочности и коррозионной стойкости [10, 11]. Таким образом, оптимизация состава сплава по основным легирующим элементам и микродобавкам может привести к существенному изменению комплекса служебных характеристик, что необходимо учитывать при разработке составов новых алюминиевых сплавов.

В данной работе проведено исследование влияния малых добавок серебра, цинка и меди (не более 0,8% (по массе)) на микроструктуру слитков и холоднокатаных листов.

### **Материалы и методы**

В качестве объекта исследований выбран сплав типа В-1579 системы Al–Mg–Sc. В качестве базового сплава взят сплав АМг5 с добавкой ~0,2% (по массе) Sc и малыми добавками переходных металлов. В базовую композицию вводили малые добавки легирующих элементов, хорошо растворимых в алюминиевой матрице (Cu, Ag, Zn). Содержание элементов не превышало 0,8% (по массе), что находится на уровне и/или ниже уровня минимальной растворимости данного элемента в алюминиевой матрице. В связи с тем, что равновесная растворимость меди при комнатной температуре составляет ~0,1% (по массе), то концентрация меди в сплаве несколько превышала минимальную растворимость, но при этом была значительно ниже максимальной растворимости при эвтектической температуре.

Приготовление расплава осуществляли в электрической печи сопротивления, отливку слитков проводили в полунепрерывный кристаллизатор скольжения. После отливки слитков проведены гомогенизация по режиму, принятому для сплава АМг6, и горячая прокатка на толщину 6 мм, после этого – холодная прокатка до толщины 2 мм с предварительным отжигом. Полученные листы отжигали при 300–350°C, после чего проводили правку растяжением со степенью остаточной деформации не более 1,5%.

Металлографический анализ шлифов слитков и листов проводили с применением светового микроскопа после травления раствором Келлера в течение 15 с и осветления в концентрированном растворе азотной кислоты. Затем проводили исследования

полуфабрикатов в поляризованном свете после электролитического травления в 1,5%-ном растворе тетрафторбората водорода.

Испытания при растяжении проводили при комнатной температуре по ГОСТ 1497–84 с применением универсальной сервогидравлической испытательной машины Zwick/Roell.

## Результаты

Влияние скандия и других переходных металлов на структуру и свойства алюминиевых сплавов изучалось в работе [12]. Влияние добавки скандия и других элементов на структуру и изменение механических свойств было показано в работах [7, 13–16]. Достаточно эффективное воздействие на характеристики полуфабрикатов помимо скандия могут оказывать малые добавки легирующих элементов, которые растворяются в алюминии. Данные элементы могут растворяться не только в алюминиевой матрице, но и в образующихся фазах, изменяя их структуру. Эти легирующие элементы могут влиять на рекристаллизацию деформированных полуфабрикатов в процессе термической обработки, обеспечивая ту или иную структуру в конечном изделии, что в свою очередь определяет комплекс служебных характеристик [17].

С целью определения влияния растворимых легирующих элементов на микроструктуру слитков проведены металлографические исследования. Типичная микроструктура слитков (центральной части) представлена на рис. 1.

По результатам анализа структур видно, что добавка скандия приводит к образованию в слитках недендритной структуры, что подтверждает сильное действие скандия в качестве модификатора. Средний размер зерна в сплаве без добавок составил ~37 мкм, при этом введение в состав сплава малой добавки серебра практически не повлияло на размер литого зерна. Добавки меди и цинка хоть и сохранили недендритное строение слитков, но привели к некоторому росту среднего размера зерна.

Максимальный размер зерна выявлен у сплава, содержащего в своем составе медь (~48 мкм), что может свидетельствовать о снижении модифицирующей способности скандия в присутствии малых добавок меди.

Необходимо отметить, что площадь сечения полученных слитков составила 80 см<sup>2</sup>, что обеспечило высокую скорость охлаждения в процессе кристаллизации. При увеличении площади сечения слитков можно ожидать дальнейшего увеличения зерна в присутствии меди и цинка за счет менее эффективного теплоотвода из зоны кристаллизации.

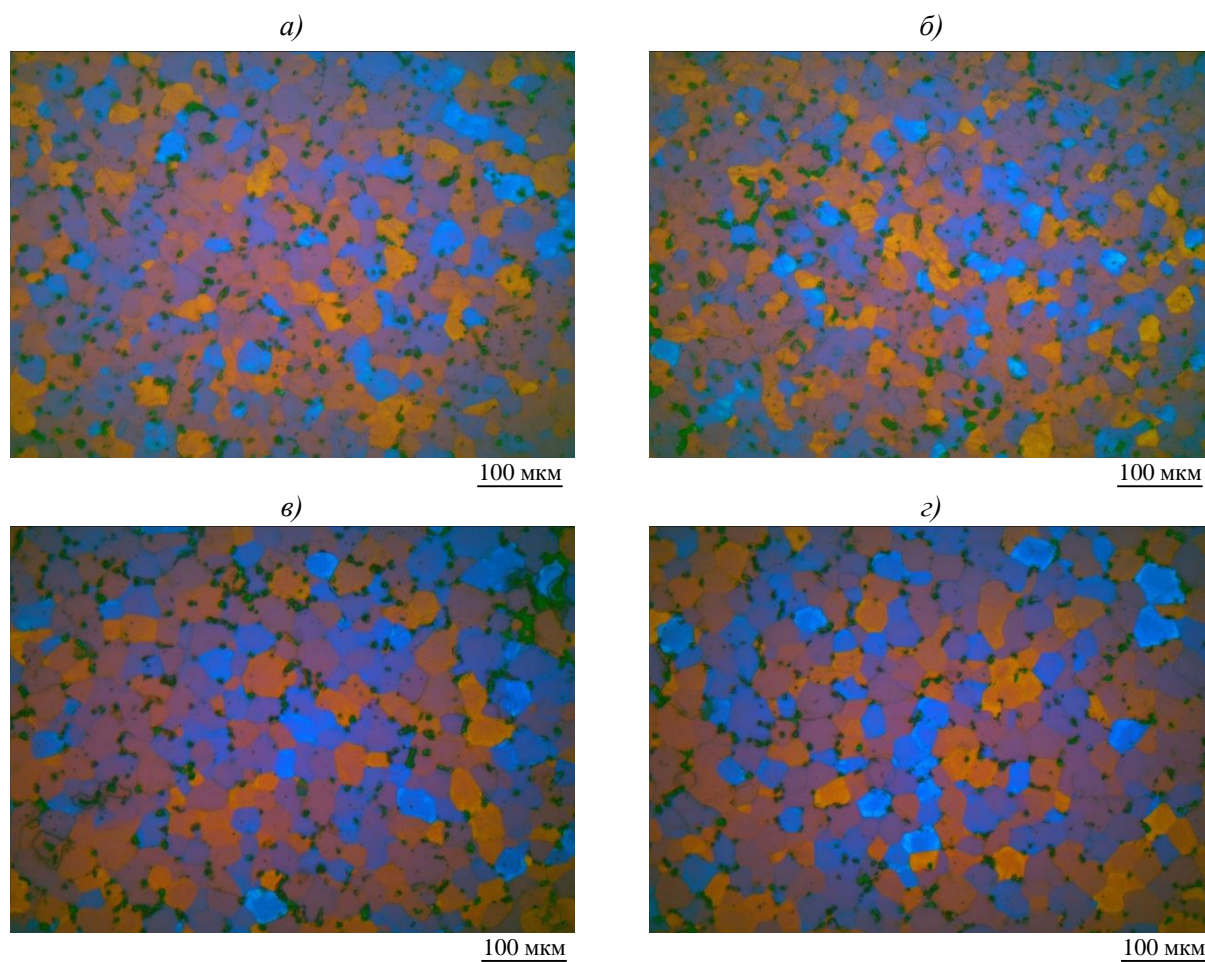


Рисунок 1. Микроструктура ( $\times 200$ ) слитков из сплавов системы Al–Mg–Sc без легирующих элементов (а) и с добавками серебра (б), меди (в) и цинка (з)

Из полученных слитков изготовлены холоднокатаные листы, которые были подвергнуты отжигу в конвекционной печи и разрезаны на заготовки под образцы для определения механических характеристик. Средние значения полученных механических характеристик листов при растяжении в продольном направлении представлены в таблице. Необходимо отметить, что в листах присутствует незначительная прямая анизотропия по пределам прочности и текучести, которая не превышает 10–15 МПа, и обратная анизотропия по уровню относительного удлинения.

**Механические свойства листов после отжига (средние значения)**

Система сплава	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$ , %
	МПа		
Al–Mg–Sc	440	345	16
Al–Mg–Sc–Ag	434	343	16
Al–Mg–Sc–Zn	435	355	14
Al–Mg–Sc–Cu	449	350	15,5

Повышение прочности в исследуемых сплавах было только при введении малой добавки меди, при этом происходило снижение характеристики относительного удли-

нения. Такое влияние на прочность может происходить вследствие твердорастворного упрочнения за счет разницы в атомных радиусах, а также из-за возможного образования фаз типа  $Al_2Cu$  и  $Al_2CuMg$  при отжиге и горячей деформации. Добавки цинка и серебра несколько снижают характеристики прочности.

При введении цинка повышается предел текучести сплава в сравнении с пределом текучести сплава без добавок. Кроме того, в сплаве, содержащем цинк, отсутствовала анизотропия в продольном и поперечном сечении образца. Повышение предела текучести возможно связано с несколько повышенным содержанием цинка (в сравнении с содержанием меди), так как он лучше растворяется в алюминии согласно равновесной диаграмме состояния. В процессе технологического передела возможно произошло выделение тройных фаз с алюминием и магнием, что могло повлиять на предел текучести.

Упрочнения при введении серебра не происходит, что, вероятно, связано с отсутствием совместных фаз с магнием и серебром и небольшой разницей в атомных радиусах с алюминием, и приводит к незначительному искажению кристаллической решетки алюминиевой матрицы.

Тем не менее необходимо отметить, что влияние введенных элементов на механические свойства сравнительно слабое и несоизмеримо с воздействием скандия на повышение механических свойств (уровень прочности сплава  $AMg5$  составляет 300 МПа).

Для исследования влияния данных элементов на микроструктуру катаных полуфабрикатов проведены металлографические исследования. Типичные микроструктуры листов представлены на рис. 2.

Ожидается, что введение скандия позволит полностью подавить рекристаллизацию в процессе отжига холоднодеформированного металла. Аналогичный эффект наблюдался в ряде работ [7, 18, 19]. Сформировавшаяся структура привела к анизотропии свойств в холоднокатаных листах после отжига вследствие сохранения ее деформированного волокнистого характера.

Действие серебра и меди на структуру листов из сплава системы  $Al-Mg-Sc$  слабо выражено. В случае введения малой добавки меди наблюдается незначительное утолщение деформированных волокон при сохранении их длины, что может быть связано как с действием диффузионных процессов, так и с особенностями прохождения процесса деформации в сплаве, содержащем небольшое количество меди. Наиболее выраженный эффект наблюдается при введении в состав сплава цинка. При исследуемой температуре отжига в структуре полуфабрикатов стали проявляться начальные

стадии рекристаллизации, что привело к образованию небольших зерен вытянутой в направлении прокатки формы. Следует полагать, что именно вследствие образования частично рекристаллизованной структуры в сплаве, содержащем цинк, в полуфабрикатах отсутствовала анизотропия механических свойств.

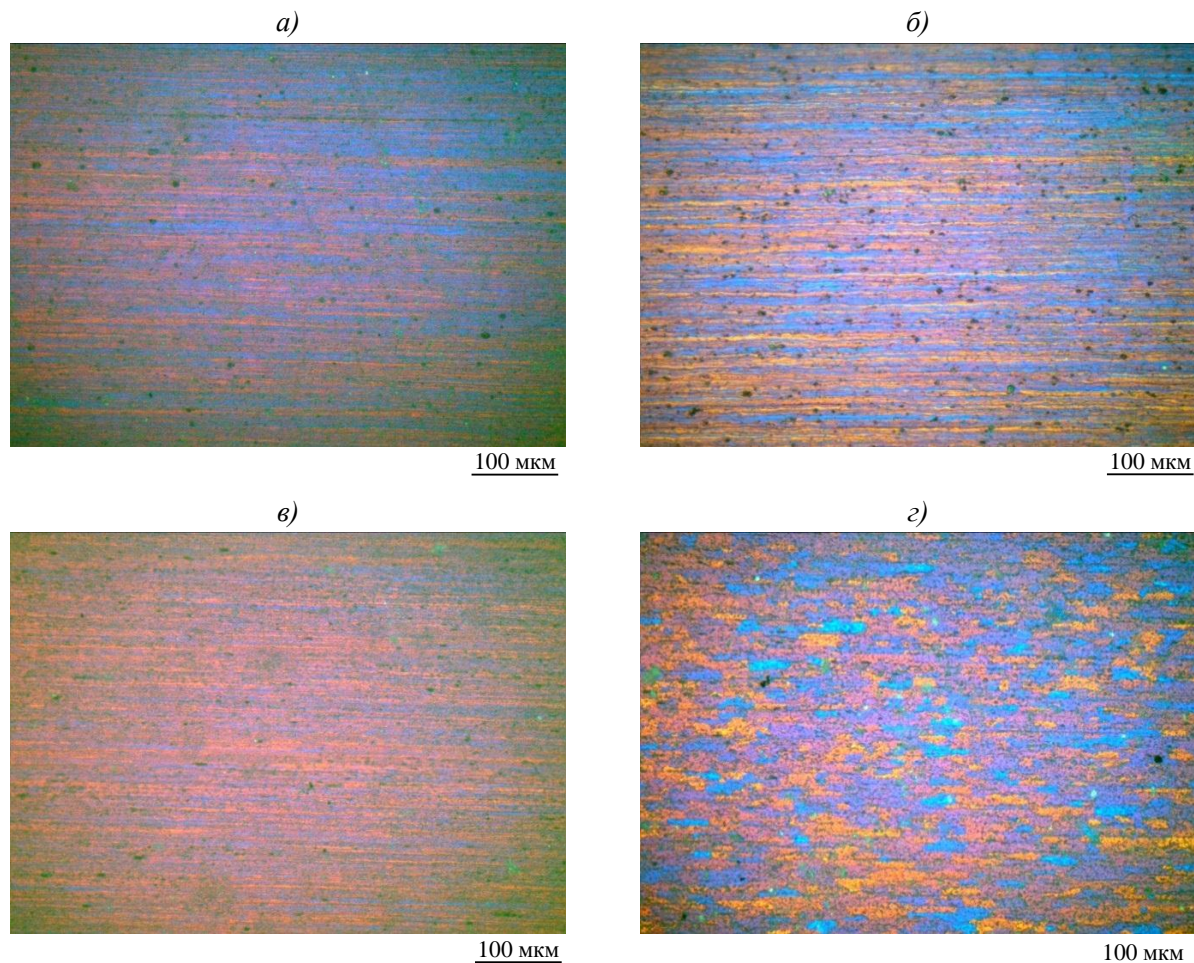


Рисунок 2. Микроструктура ( $\times 200$ ) листов из сплава системы Al–Mg–Sc без легирующих элементов (а) и с добавками меди (б), серебра (в) и цинка (з) после отжига

Из полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности введения добавки цинка в сплавы системы Al–Mg–Sc. Однако с учетом того, что к материалам предъявляются требования по целому комплексу служебных и технологических свойств, необходимо более детальное исследование характеристик коррозионной стойкости и свариваемости.

### **Выводы**

Введение малых добавок серебра, цинка и меди практически не влияет на структуру слитков из сплава системы Al–Mg–Sc. Влияние скандия на изменение структуры

слитков гораздо более выраженное и приводит к образованию равноосных зерен вместо дендритов.

Малые добавки растворимых в алюминии элементов в сплавы системы Al–Mg–Sc приводят к незначительному изменению механических свойств: введение серебра практически не изменяет характеристики материала при растяжении, меди – обеспечивает повышение прочности и текучести, цинка – приводит лишь к повышению предела текучести и исчезновению прямой анизотропии по пределам прочности и текучести. Влияние скандия на повышение механических свойств выражено гораздо сильнее.

Введение цинка приводит к развитию процессов рекристаллизации при отжиге холоднокатаных листов, что обеспечивает отсутствие анизотропии механических свойств при растяжении. Добавки меди и серебра не приводят к значительному изменению микроструктуры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
2. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
3. 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.
4. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 167–182.
5. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Жегина И.П., Иода Е.Н., Лоскутов В.М. Особенности и перспективы сварки алюминийлитиевых сплавов /В сб. Авиационные материалы и технологии. Вып. «Технология производства авиационных металлических материалов». М.: ВИАМ. 2002. С. 3–12.
6. 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)
7. Рыбин В.В., Андреев Г.Н., Барахтина Н.Н., Осокин Е.П. Некоторые аспекты создания современных морских высокопрочных алюминиевых сплавов со скандием //Вопросы материаловедения. 2006. №1. С. 92–102.

8. Захаров В.В., Ростова Т.Д. Упрочнение алюминиевых сплавов при легировании их скандием //МиТОМ. 2013. №12 (702). С. 24–29.
9. Захаров В.В. О совместном легировании алюминиевых сплавов скандием и цирконием //МиТОМ. 2014. №6 (708). С. 3–8.
10. Ana Alil, Miljana Popović, Tamara Radetić, Milorad Zrilić, Endre Romhanji. Influence of annealing temperature on the baking response and corrosion properties of an Al–4,6 wt% Mg alloy with 0,54 wt% Cu //Journal of Alloys and Compounds. 2015. V. 625. P. 76–84.
11. Masahiro Kubota, Barry C. Muddle Effect of Trace Additions of Ag on Precipitation in Al–Mg Alloys //Materials Transactions. 2005. V. 46. №12. P. 2968–2974.
12. Елагин В.И. Легирование деформированных алюминиевых сплавов переходными металлами. М.: Металлургия. 1975. 321 с.
13. 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.
14. Рябов Д.К., Колобнев Н.И., Самохвалов С.В., Вахромов О.В. Изменение механических и коррозионных свойств сплава 1913 при искусственном старении //Вопросы материаловедения. 2013. №4 (76). С. 24–29.
15. Колобнев Н.И., Махсидов В.В., Самохвалов С.В., Рябов Д.К. Влияние содержания антирекристаллизаторов на структуру и свойства листов из сплава 1370 системы Al–Mg–Si–Cu–Zn //Технология легких сплавов. 2012. №1. С. 18–24.
16. Рябов Д.К., Колобнев Н.И., Кочубей А.Я., Заводов А.В. Изменение механических свойств листов из сплава 1913 при введении скандия //Авиационные материалы и технологии. 2014. №4. С. 3–8.
17. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: Металлургия. 1967. 405 с.
18. Филатов Ю.А. Сплавы системы Al–Mg–Sc как особая группа деформируемых алюминиевых сплавов //Технология легких сплавов. 2014. №2. С. 34–41.
19. Ryabov D., Kolobnev N., Samohvalov S. 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.

#### REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Sovremennye materialy – osnova innovacionnoj modernizacii Rossii [Modern materials – basis of innovative modernization of Russia] //Metally Evrazii. 2012. №3. S. 10–15.

2. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials science] //Vse materialy. Jenciklopedicheskiy spravochnik. 2008. №3. S. 2–14.
3. 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 till 2030»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2015. №1 (34). S. 3–33.
4. 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.
5. Kablov E.N., Lukin V.I., Zhegina I.P., Ioda E.N., Loskutov V.M. Osobennosti i perspektivy svarki aljuminijlitiyevykh splavov [Features and perspectives of welding of aluminum alloys] /V sb. Aviacionnye materialy i tehnologii. Vyp. «Tehnologija proizvodstva aviacionnykh metallicheskiykh materialov». M.: VIAM. 2002. S. 3–12.
6. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye jelementy – materialy sovremennykh i budushhiykh vysokikh tehnologiy [Rare metals and rare earth elements – materials of modern and future high technologies] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
7. Rybin V.V., Andreev G.N., Barahina N.N., Osokin E.P. Nekotorye aspekty sozdaniya sovremennykh morskikh vysokoprochnykh aljuminievyykh splavov so skandiyem [Some aspects of creation of modern sea high-strength aluminum alloys with scandium] //Voprosy materialovedeniya. 2006. №1. S. 92–102.
8. Zaharov V.V., Rostova T.D. Uprochnenie aljuminievyykh splavov pri legirovanii ih skandiyem [Hardening of aluminum alloys at alloying their scandium] //MiTOM. 2013. №12 (702). S. 24–29.
9. Zaharov V.V. O sovместnom legirovanii aljuminievyykh splavov skandiyem i cirkoniyem [About joint alloying of aluminum alloys scandium and zirconium] //MiTOM. 2014. №6 (708). S. 3–8.
10. Ana Alil, Miljana Popović, Tamara Radetić, Milorad Zrilić, Endre Romhanji. Influence of annealing temperature on the baking response and corrosion properties of an Al–4,6 wt% Mg alloy with 0,54 wt% Cu //Journal of Alloys and Compounds. 2015. V. 625. P. 76–84.
11. Masahiro Kubota, Barry C. Muddle Effect of Trace Additions of Ag on Precipitation in Al–Mg Alloys //Materials Transactions. 2005. V. 46. №12. P. 2968–2974.

12. Elagin V.I. Legirovanie deformirovannyh aljuminievyh splavov perehodnymi metallami [Alloying of the deformed aluminum alloys transition metals]. M.: Metallurgija. 1975. 321 s.
13. 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 [Influence of preliminary natural aging on properties of alloy 1913 in artificially made old condition] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №2. S. 8–11.
14. Rjabov D.K., Kolobnev N.I., Samohvalov S.V., Vahromov O.V. Izmenenie mehanicheskikh i korrozionnyh svojstv splava 1913 pri iskusstvennom starenii [Change of mechanical and corrosion properties of alloy 1913 at artificial aging] //Voprosy materialovedenija. 2013. №4 (76). C. 24–29.
15. Kolobnev N.I., Mahsidov V.V., Samohvalov S.V., Rjabov D.K. Vlijanie sodержanija antirekristallizatorov na strukturu i svojstva listov iz splava 1370 sistemy Al–Mg–Si–Cu–Zn [Influence of the maintenance of antirekristallizator on structure and property of sheets from alloy of the 1370th system Al–Mg–Si–Cu–Zn] //Tehnologija legkih splavov. 2012. №1. S. 18–24.
16. Rjabov D.K., Kolobnev N.I., Kochubej A.Ja., Zavodov A.V. Izmenenie mehanicheskikh svojstv listov iz splava 1913 pri vvedenii skandija [Change of mechanical properties of sheets from alloy 1913 at scandium introduction] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №4. S. 3–8.
17. Gorelik S.S. Rekristallizacija metallov i splavov [Rekristallizatsiya of metals and alloys]. M.: Metallurgija. 1967. 405 s.
18. Filatov Ju.A. Splavy sistemy Al–Mg–Sc kak osobaja gruppa deformiruemyh aljuminievyh splavov [Al–Mg–Sc system alloys as special group of deformable aluminum alloys] //Tehnologija legkih splavov. 2014. №2. S. 34–41.
19. Ryabov D., Kolobnev N., Samohvalov S. 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.