



УДК 669.715:669.788

doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-8-8

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССОВОЙ
ДОЛИ ПОВЕРХНОСТНОГО И РАСТВОРЕННОГО
ВОДОРОДА В АЛЮМИНИИ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ МЕТОДОМ НАГРЕВА В
ТОКЕ ИНЕРТНОГО ГАЗА АРГОНА**

Е.А. Механик

Г.Ю. Растегаева

Ноябрь 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.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССОВОЙ ДОЛИ ПОВЕРХНОСТНОГО И РАСТВОРЕННОГО ВОДОРОДА В АЛЮМИНИИ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ МЕТОДОМ НАГРЕВА В ТОКЕ ИНЕРТНОГО ГАЗА АРГОНА

doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-8-8

Проведено исследование возможности одновременного определения массовой доли поверхностного и растворенного водорода в алюминии и низколегированных алюминиевых сплавах методом нагрева в токе инертного газа-носителя – аргона, в электродно-импульсной печи газоанализатора фирмы Leco RHEN-602 с последующим детектированием в кондуктометрической ячейке прибора. Подобраны режимы работы электродно-импульсной печи, позволяющие провести полное поэтапное извлечение поверхностного, а затем и растворенного водорода из алюминия и низколегированных алюминиевых сплавов. Исходя из результатов определения массовой доли поверхностного и растворенного водорода в образцах различных алюминиевых сплавов, рассчитаны метрологические характеристики разработанной методики.

Ключевые слова: *алюминиевые сплавы, определение водорода, поверхностный водород, растворенный водород, метод плавления в токе инертного газа-носителя.*

Е.А. Механик, Г.Ю. Растегаева

Development of the measurement procedure for determination of mass fraction of surface and dissolved hydrogen in aluminum and low aluminum alloys by heating in inert gas argon

Investigation of simultaneous determination of content of surface and dissolved hydrogen in aluminum and low aluminum alloys was provided by method of heating in an inert gas of argon in electrode impulse furnace of analyzer Leco RHEN-602 followed by detection in the conductivity cell. Operation modes of electrode impulse furnace, allowing complete extraction of surface hydrogen at the first step, and then extraction of dissolved hydrogen from aluminum and low aluminum alloy, were chosen. The measurement procedure was developed using the results of the determination of surface and dissolved hydrogen in different aluminum alloys.

Keywords: *aluminum alloys, hydrogen determination, surface hydrogen, dissolved hydrogen, method of melting in an inert gas.*

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

В настоящее время основную долю планера современных пассажирских и транспортных самолетов составляют алюминиевые сплавы, которые помимо авиационного назначения широко применяются в ракетостроении, автомобильной промышленности и других отраслях народного хозяйства. В ближайшие 10–20 лет перспективным направлением развития алюминиевых сплавов является разработка коррозионностойкого литейного сплава на основе системы Al–Mg с пониженной плотностью и высокопрочных литейных алюминиевых сплавов нового поколения с повышенным уровнем служебных характеристик [1–15]. В связи с этим особо актуальным становится кон-

троль содержания вредных примесей – металлических (Fe и др.) и неметаллических (H₂), повышенное содержание которых негативно сказывается на структуре и служебных характеристиках сплавов.

Водород, присутствующий в алюминии и его сплавах и составляющий 70–90% от суммарного содержания газа, оказывает отрицательное влияние на свойства и структуру изделий и полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Пористость отливок, расслоения в деформированных изделиях, пузыри на листах и тонкостенных профилях, а также снижение усталостных и эксплуатационных свойств связаны именно с высоким содержанием водорода. Водород в алюминиевых сплавах находится в виде твердого раствора внедрения, может заполнять пустоты и поры в молекулярном состоянии и образовывать химические соединения – гидриды (чаще всего с щелочными или щелочноземельными металлами), а также адсорбироваться на высокодисперсных включениях оксидов алюминия внутри металла с образованием химических комплексов. Для получения качественного металла необходимо максимально понизить содержание в нем водорода. Кроме того, крайне важно точно определить фактическое содержание водорода в металле (растворенный водород), что связано со специфическими трудностями: низким содержанием водорода в алюминиевых сплавах, наличием в сплавах легирующих компонентов с высокой упругостью пара и абсорбированной влаги на оксидной пленке, покрывающей поверхность металла.

Известен способ определения содержания водорода в алюминии и алюминиевых сплавах методом вакуум-нагрева твердой пробы металла, однако данный метод является длительным и сложным. Существенно более экспрессным методом анализа содержания водорода является метод плавления в токе газа-носителя, реализованный на газоанализаторе фирмы Leco RHEN-602. Однако аттестованной методики определения количества поверхностного и растворенного водорода в алюминии и алюминиевых сплавах в России не существует.

Целью настоящей работы является определение условий полного выделения водорода из алюминиевых сплавов (критерий – полное плавление анализируемого материала).

Материалы и методы

Измерение массовой доли водорода проводили на газоанализаторе фирмы Leco RHEN-602, оснащенный ячейкой теплопроводности для определения содержания водорода. В качестве газа-носителя использовали аргон высокой чистоты.

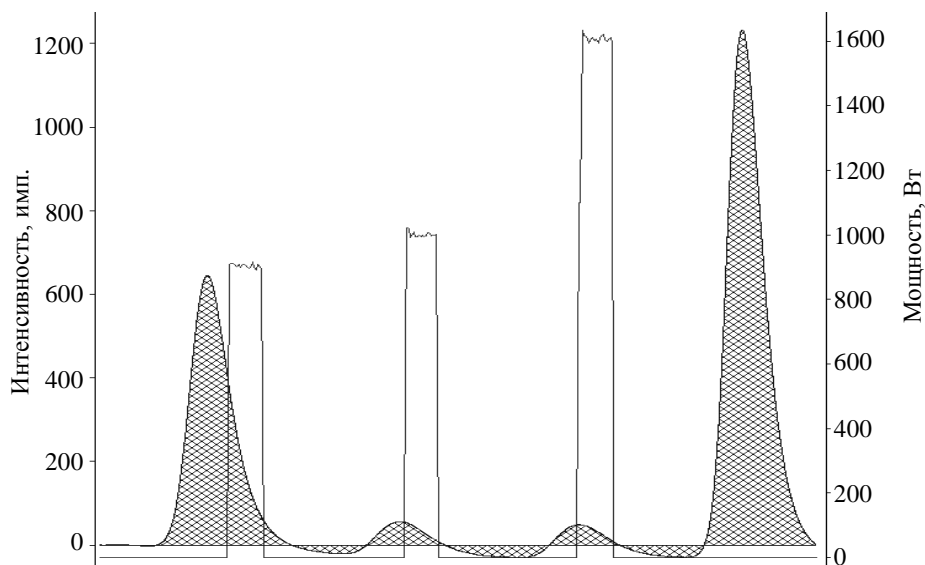
Для градуировки газоанализатора использовали стандартные образцы сталей (фирма Leco) с аттестованным содержанием водорода 0,00048% и 0,00012% (по массе). В качестве катализатора, необходимого для полного извлечения водорода из анализируемых стандартных образцов, применяли олово в виде таблеток.

Результаты

Проведена серия экспериментов, в процессе которых выполнено плавление исследуемых образцов при различной мощности печи, продолжительность нагрева при этом оставалась постоянной и составляла 30 с. Установлено, что оптимальной является мощность печи 1600 Вт (дальнейшее увеличение мощности печи приводит к выплескиванию материала из графитового тигля, а снижение не позволяет обеспечить полное расплавление анализируемой пробы).

Выбраны условия разделения поверхностного и растворенного водорода. Для этого проводили поэтапный нагрев образца (в качестве исследуемого материала использовали чистый алюминий и сплав типа ВАЛ8). Как видно из рисунка, при мощности печи 800 Вт происходит выделение поверхностного водорода, дальнейшее повы-

шение мощности не приводит к дополнительному выделению водорода вплоть до плавления образца при мощности печи 1600 Вт.



Выделение водорода при поэтапном нагреве анализируемого образца

В выбранных условиях проанализированы образцы из сплава типа ВАЛ8 с подвергнутой механической обработке поверхности с последующим промыванием в ацетоне и без нее. Содержание растворенного водорода не зависит от обработки поверхности, что косвенно подтверждает корректность выбранных условий анализа (табл. 1).

Таблица 1

Результаты определения массовой доли поверхностного и растворенного водорода в сплаве системы Al-Si (ВАЛ8)

Условный номер образца	Содержание водорода, % (по массе), в сплаве ВАЛ8			
	с необработанной поверхностью		после механической обработки	
	растворенного	поверхностного	растворенного	поверхностного
1	0,000076	0,000124	0,000086	0,000126
2	0,000081	0,000075	0,000083	0,000034
3	0,000057	0,000112	0,000069	0,000019
4	0,000064	0,000082	0,000044	0,000062
5	0,000043	0,000081	0,000085	0,000052
6	0,000088	0,000088	0,000070	0,000040
7	0,000082	0,000059	0,000043	0,000070
8	0,000080	0,000099	0,000067	0,000015
9	0,000070	0,000089	0,000058	0,000117
10	0,000072	0,000091	0,000091	0,000028
11	0,000071*	0,000090*	0,000070*	0,000056*

* Средние значения.

Проведена оценка правильности и прецизионности разработанной методики по МИ2336–2002 и ГОСТ Р ИСО 5725-2–2002 соответственно. Результаты эксперимента с *p*-сериями и *q*-уровнями представляют собой таблицу с *lq*-базовыми элементами, каждый из которых содержит *n* результатов измерений, которые в совокупности могут быть использованы для расчета стандартных отклонений, повторяемости и воспроизводимости.

Измеряемые объекты находились в одном и том же месте, все измерения были проведены в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 5725-2–2002 в условиях повторяемости. На каждом уровне в каждой серии было проведено по пять измерений. В

качестве уровней эксперимента использовались стандартные образцы алюминиевых сплавов с разными массовыми долями водорода. С использованием стандартных образцов проводили четыре серии по пять измерений массовой доли водорода. Результаты приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Результаты определения массовой доли растворенного водорода в алюминии и низколегированных алюминиевых сплавах

L	N	Содержание растворенного водорода, % (по массе), в сплаве			
		ВАЛ8 №9	АМц №3	АЛ45	ВАЛ2 №6
1	1	0,000079	0,000092	0,000117	0,000107
	2	0,000076	0,000092	0,000120	0,000099
	3	0,000081	0,000098	0,000126	0,000108
	4	0,000080	0,000097	0,000116	0,000108
	5	0,000078	0,000095	0,000121	0,000100
2	1	0,000077	0,000091	0,000116	0,000105
	2	0,000074	0,000090	0,000119	0,000097
	3	0,000081	0,000095	0,000126	0,000107
	4	0,000079	0,000095	0,000113	0,000107
	5	0,000077	0,000094	0,000118	0,000097
3	1	0,000078	0,000091	0,000117	0,000104
	2	0,000076	0,000090	0,000118	0,000098
	3	0,000081	0,000097	0,000126	0,000107
	4	0,000080	0,000095	0,000115	0,000104
	5	0,000077	0,000095	0,000118	0,000099
4	1	0,000077	0,000090	0,000115	0,000106
	2	0,000075	0,000090	0,000120	0,000098
	3	0,000080	0,000095	0,000123	0,000107
	4	0,000079	0,000095	0,000115	0,000106
	5	0,000078	0,000093	0,000120	0,000097

Таблица 3

Результаты определения массовой доли поверхностного водорода в алюминии и низколегированных алюминиевых сплавах

L	N	Содержание поверхностного водорода, % (по массе), в сплаве			
		ВАЛ8 №9	АМц №3	АЛ45	ВАЛ2 №6
1	1	0,000094	0,000129	0,000152	0,000054
	2	0,000082	0,000130	0,000165	0,000041
	3	0,000094	0,000116	0,000118	0,000053
	4	0,000084	0,000120	0,000138	0,000042
	5	0,000090	0,000125	0,000121	0,000044
2	1	0,000093	0,000128	0,000143	0,000048
	2	0,000081	0,000127	0,000147	0,000037
	3	0,000090	0,000110	0,000104	0,000047
	4	0,000083	0,000117	0,000135	0,000037
	5	0,000086	0,000122	0,000110	0,000039
3	1	0,000089	0,000126	0,000135	0,000053
	2	0,000079	0,000130	0,000160	0,000038
	3	0,000090	0,000113	0,000114	0,000048
	4	0,000080	0,000118	0,000128	0,000037
	5	0,000088	0,000124	0,000110	0,000040
4	1	0,000093	0,000126	0,000152	0,000052
	2	0,000077	0,000126	0,000147	0,000040

3	0,000092	0,000113	0,000112	0,000049
4	0,000084	0,000119	0,000136	0,000040
5	0,000087	0,000119	0,000118	0,000041

На основании полученных результатов оценивали показатели прецизионности методики измерений по схеме, приведенной в ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Границы погрешности (точность) оценивали по схеме, изложенной в ГОСТ Р ИСО 5725-4-2002.

Рассчитаны среднее арифметическое (X_{ml}) и выборочная дисперсия (S_{ml}^2) результатов единичного анализа содержания компонента в m -ном образце, полученных в условиях повторяемости (параллельных определений):

$$\bar{X}_{ml} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{mli}}{N},$$

$$S_{ml}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{mli} - X_{ml})^2}{N - 1},$$

где $m=1 \dots M$; $l=1 \dots L$.

Затем в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002 полученные данные проверяли на наличие выбросов с использованием критерия Кохрена.

Не исключенные из расчетов значения S_{ml}^2 считали однородными и по ним оценивали СКО, характеризующие повторяемость результатов единичного анализа (параллельных определений), полученных для содержания, соответствующего содержанию компонента в m -ном опытном образце. Эти СКО ($S_{r,m}$) рассчитывали по формуле

$$S_{r,m} = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^L S_{ml}^2}{L}}.$$

Показатель повторяемости методики анализа в виде среднего квадратического отклонения (σ_r) для содержаний, соответствующих содержанию компонента в m -ном опытном образце, устанавливали, принимая его равным $S_{r,m}$: $\sigma_r = S_{r,m}$.

Показатель повторяемости методики анализа в виде предела повторяемости ($r_{n,m}$) для содержания, соответствующего содержанию компонента в m -ном опытном образце, рассчитывали по формуле

$$r = Q(P, n) \sigma_r,$$

где n – число параллельных определений, предусмотренных методикой для получения результата анализа; $Q(P, n) = 3,18$ (при $n=3$, $P=0,95$).

Рассчитывали выборочное среднее квадратическое отклонение результатов анализа m -го опытного образца, полученных в условиях воспроизводимости, по формуле

$$S_{R,\bar{X},m} = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^L (X_{ml} - X_m)^2}{L - 1} + \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{N}\right) S_{r,m}^2}.$$

Показатель воспроизводимости методики анализа в виде среднего квадратического отклонения (σ_R) для содержаний, соответствующих содержанию компонента в m -ном опытном образце, устанавливали, принимая его равным $S_{R,m}$: $\sigma_R = S_{R,m}$.

Показатель воспроизводимости методики анализа в виде предела воспроизводимости (R_m) для содержания, соответствующего содержанию компонента в m -ном опытном образце, рассчитывали по формуле (табл. 4)

$$R_m = Q(P, 2),$$

где $Q(P, 2) = 3,18$ (при $P=0,95$).

Таблица 4

Показатели точности методики (границы относительной погрешности δ , относительное среднеквадратическое отклонение повторяемости σ_r , относительное среднеквадратическое отклонение воспроизводимости σ_R)

Водород	Диапазон измеряемых значений, % (по массе)	Значения показателя, %			Предел повторяемости r , % (при $P=0,95, n=3$)
		точности $\pm\delta$ (при $P=0,95$)	повторяемости σ_r	воспроизводимости σ_R	
Растворенный	От 0,00005 до 0,001 (включ.)	20	4	10	15
Поверхностный	От 0,00005 до 0,001 (включ.)	40	13	25	35

Значение критической разности $CD_{0,95}$ при условии $n_1=n_2=2$ (где n_1, n_2 – число параллельных определений в первой и второй лаборатории) рассчитывали по формуле

$$CD_{0,95} = 2,77 \sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_r^2 \cdot \frac{1}{2}},$$

где 2,77 – коэффициент критического диапазона для двух параллельных определений (по ГОСТ Р ИСО 5725-6).

Показатель точности в виде абсолютной погрешности (Δ) находили по формуле $\Delta=1,96\sigma_R$.

Показатель точности в виде границы относительной погрешности ($\pm\delta$) находили по формуле

$$\delta=(1,96\sigma_{c,m})/C_m \cdot 100 [\%].$$

Экспериментальное исследование методики измерений массовой доли поверхностного и растворенного водорода в алюминии и низколегированных алюминиевых сплавах с использованием газоанализатора фирмы Leco RHEN-602 показало, что данная методика обладает следующими метрологическими характеристиками, представленными в табл. 4.

Обсуждение и заключения

Подобраны режимы работы прибора, позволяющие провести полное поэтапное извлечение вначале поверхностного, а затем растворенного водорода из алюминия и низколегированных алюминиевых сплавов. Исходя из результатов определения массовой доли поверхностного и растворенного водорода в образцах различных алюминиевых сплавов, рассчитаны метрологические характеристики разработанной методики. Методика аттестована во ФГУП «ВНИИОФИ» и внесена в федеральный реестр.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 20–26.
2. 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.
3. Корнышева И.С., Волкова Е.Ф., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. Перспективы применения магниевых и литевых алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 212–222.

4. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 157–167.
5. 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).
6. Гончаренко Е.С., Трапезников А.В., Огородов Д.В. Литейные алюминиевые сплавы (к 100-летию со дня рождения М.Б. Альтмана) //Труды ВИАМ. 2014. №4. Ст. 02 (viam-works.ru).
7. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 167–182.
8. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь //Наука и жизнь. 2012. №11. С. 16–21.
9. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
10. Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 5–6.
11. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Алюминий-литиевые сплавы /В сб.: 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный научн.-техн. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 163–171.
12. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
13. 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.
14. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминийлитиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 183–195.
15. Клочкова Ю.Ю., Грушко О.Е., Ланцова Л.П., Бурляева И.П., Овсянников Б.В. Освоение в промышленном производстве полуфабрикатов из перспективного алюминийлитиевого сплава В-1469 //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 8–12.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Osnovnye itogi i napravleniya razvitiya materialov dlya perspektivnoj aviacionnoj tehniki [The main results and the directions of development of materials for the perspective aircraft equipment] /V sb. 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007: Jubilejnyj nauch.-tehnic. sb. M.: VIAM. 2007. S. 20–26.
2. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitiya materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period until 2030»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2015. №1 (34). S. 3–33.
3. Kornysheva I.S., Volkova E.F., Goncharenko E.S., Muhina I.Ju. Perspektivy primeneniya magnievyyh i litejnyh alyuminievyyh splavov [Prospects of application of magnesian and foundry aluminum alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 212–222.
4. Antipov V.V. Strategiya razvitiya titanovyh, magnievyyh, berillievyyh i alyuminievyyh splavov [Strategy of development of titanic, magnesian, beryllium and aluminum alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 157–167.
5. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemelnye elementy – materialy sovremennyh i budushhih vysokih tehnologij [Rare metals and rare-earth elements – materials for modern and future high technologies] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
6. Goncharenko E.S., Trapeznikov A.V., Ogorodov D.V. Litejnye alyuminievye splavy (k 100-letiju so dnja rozhdenija M.B. Altmana) [Aluminum casting alloys (on the 100th anniversary of the birth of M. B. Altman)] //Trudy VIAM. 2014. №4. St. 02 (viam-works.ru).

7. Antipov V.V., Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Vahromov R.O. Alyuminievye deformiruemye splavy [Aluminum deformable alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 167–182.
8. Kablov E.N. Korroziya ili zhizn [Corrosion or life] //Nauka i zhizn. 2012. №11. S. 16–21.
9. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialivedenie [Aerospace materials science] //Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik. 2008. №3. S. 2–14.
10. Tarasov Yu.M., Antipov V.V. Novye materialy VIAM – dlya perspektivnoj aviacionnoj tehniky proizvodstva OAO «OAK» [The VIAM new materials – for perspective aviation engineering of production of JSC «OAK»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 5–6.
11. Fridlyander I.N., Grushko O.E., Antipov V.V., Kolobnev N.I., Hokhlatova L.B. Aluminiy-litievye splavy [Aluminum-lithium alloys] /V kn.: 75 let Aviatsionnye materialy. Izbrannye Trudy «VIAM» 1932–2007: Yubileyni nauch.-tehnich. sb. M.: VIAM. 2007. S. 163–171.
12. Kablov E.N. Sovremennye materialy – osnova innovatsionnoy modernizatsii Rossii [Modern materials – basis of innovative modernization of Russia] //Metally Evrazii. 2012. №3. S. 10–15.
13. Kablov E.N., Lukin V.I., Zhegina I.P., Ioda E.N., Loskutov V.M. Osobennosti i perspektivy svar-ki alyuminiy-litievyyh splavov [Features and perspectives of welding of alyuminiylitievyy alloys] /V sb. Aviatsionnye materialy i tehnologii. Vyp.: «Tehnologiya proizvodstva aviatsionnykh metalli-cheskikh materilov». M.: VIAM. 2002. S. 3–12.
14. Antipov V.V., Kolobnev N.I., Hohlatova L.B. Razvitie alyuminijlitievyyh splavov i mnogostupen-chatyyh rezhimov termicheskoy obrabotki [Development aluminum lithium alloys and multistage modes of thermal processing] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 183–195.
15. Klochkova Ju.Ju., Grushko O.E., Lancova L.P., Burlyaeva I.P., Ovsyannikov B.V. Osvoenie v promyshlennom proizvodstve polufabrikatov iz perspektivnogo aljuminijlitievogo splava V-1469 [Development in industrial production of semi-finished products from perspective alyumini-ylitievyy alloy V-1469] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №1. S. 8–12.