

ПРИМЕНЕНИЕ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ С ДОБАВКАМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

Агафонов Р.Ю.^{1*}, Вилков Ф.Е.^{1**}, Касицын А.Н.^{1***},
Предко П.Ю.^{2****}, Марченков А.Ю.^{3*****}

¹ Российские космические системы,
ул. Авиамоторная, 53, Москва, 111250, Россия

² Всероссийский институт легких сплавов,
ВИЛС, ул. Горбунова, 2, Москва, 121596, Россия

³ Национальный исследовательский университет «МЭИ»
ул. Красноказарменная, 14, Москва, 111250, Россия

* e-mail: agafonov1989@gmail.com

** e-mail: fw999@yandex.ru

*** e-mail: aleks1@list.ru

**** e-mail: predko626@gmail.com

***** e-mail: art-marchenkov@yandex.ru

Рассматривается применение в ракетно-космической отрасли новых материалов на основе алюминия с добавками редкоземельных металлов взамен традиционно используемых сплавов АМг6, АМц, Д16. Представлены исследования механических, радиационно-защитных характеристик, показывающие перспективность применения разрабатываемых сплавов в качестве конструкционного материала ракетно-космической техники.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы с добавками редкоземельных металлов, диспрозий, лантан, церий, радиационная защита космических аппаратов, ионизирующие излучения космического пространства, временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение.

Среди многочисленных факторов, влияющих на функционирование ракетно-космической техники (РКТ) при ее эксплуатации в космосе, особое значение имеет воздействие полей ионизирующего излучения космического пространства (ИИКП). Поэтому в настоящее время одной из наиболее актуальных проблем является необходимость защиты элементной базы от данного воздействия. Эффективная защита позволяет рассчитывать на увеличение функциональных возможностей аппаратуры, повышение ее надежности и срока активного существования (САС) до 15 лет.

В околоземном космическом пространстве можно выделить следующие основные естественные типы ионизирующих излучений — электроны и протоны естественных радиационных поясов Земли, протоны и ядра химических элементов космических лучей, протоны и ионы химических элементов солнечных лучей. Основными источниками воздействия ионизирующего излучения на радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) являются дозовые

эффекты, приводящие к сбоям и отказам, причем на них приходится до 50 % всех отказов аппаратуры космических аппаратов (КА) [1].

Перспективным направлением в улучшении комплекса свойств металлических материалов космического назначения, включая защитные свойства от ИИКП, является разработка высокопрочных алюминиевых сплавов с использованием добавок переходных и редкоземельных металлов. Чем выше заряд ядра (номер элемента) поглощающего вещества, тем выше величина ионизационных потерь заряженных частиц при прохождении через данный элемент, а значит, выше защитные свойства [2].

В соответствии с требованиями [3] электронная компонентная база (ЭКБ) должна быть стойкой в течение 15 и более лет к воздействиям ионизирующего излучения космического пространства, а именно: электронного излучения; протонного излучения; ионизирующего излучения низкой интенсивности.

Как показали испытания [4], сплавы на основе алюминия с добавками редкоземельных металлов (РЗМ), не превышающими 15% по массе, значительно превосходят традиционно используемые в космическом приборостроении алюминиевые сплавы типа АМг6, АМц, Д16 в части ослабления излучения. Так, для рентгеновского излучения (РИ) с низкими значениями граничных энергий, порядка 40 кэВ, лист из алюминиевого сплава с добавками РЗМ толщиной 2 мм ослабляет излучение более чем в 200 раз. Кратность ослабления падает с увеличением значений граничных энергий, что видно на рис. 1, где приведены графики отношения кратности ослабления РИ к величине граничной энергии для сплавов АМц и Al-РЗМ.

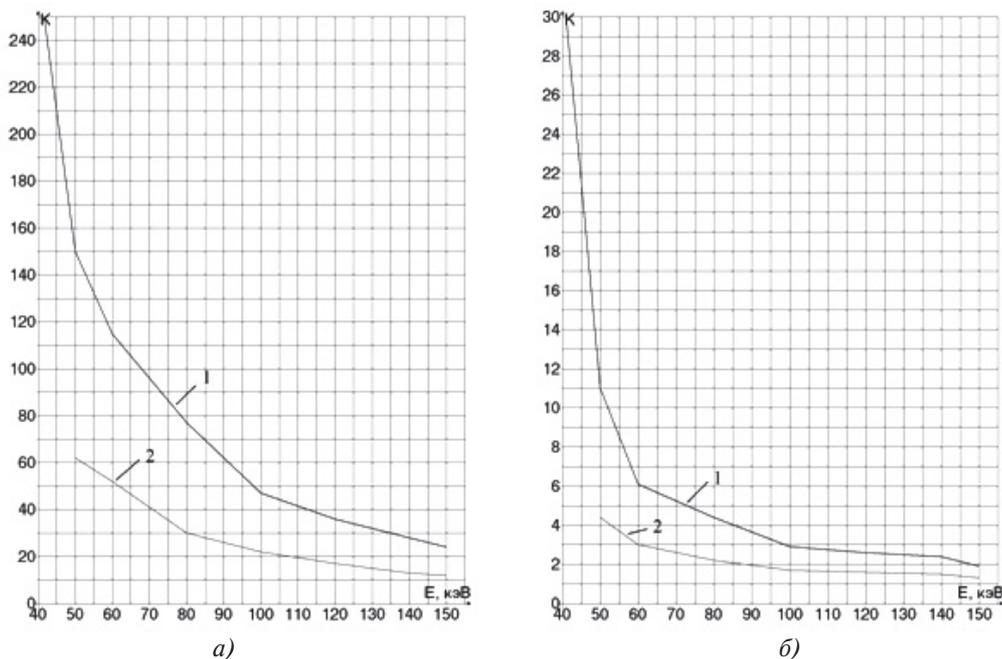


Рис. 1. Значения кратности ослабления рентгеновского излучения для однослойных поглотителей толщиной 2 мм при различной граничной энергии спектра E : 1 — Al-РЗМ; 2 — АМц (a — без фильтра; b — с фильтром [4])

Были проведены исследования защитных свойств сплавов системы Al-Ce-Cr-Zr с содержанием церия не более 15% по массе [5]. С помощью специализированной программы (моделировались защитные параметры в сравнении с защитными свойствами АМг6) была просчитана стойкость этого материала при излучении электронов, протонов и γ -квантов [5].

Результаты при излучении протонов показывают практически неразличимые защитные свойства нового материала по сравнению с АМг6. Все сплавы полностью поглощают протоны с энергиями до 17 МэВ и значительно притормаживают протоны с энергиями 19–25 МэВ. Отличие исследованного материала от стандартного АМг6 — в повышении защитных свойств на интервале энергий до 30 МэВ.

Полученные результаты при излучении электронов показывают значительное ослабление дозы всеми материалами при энергиях электронов ниже 1 МэВ.

Вторичное излучение компонентов космического излучения — γ -кванты — очень чувствительны к наличию в защитном материале элементов с высоким атомным номером, причем эта чувствительность возрастает со снижением энергии γ -квантов. Так, при энергии 0,02 МэВ новые материалы от 5 до 10 раз эффективнее традиционного АМг6. При энергии 0,05 МэВ различие снижается до 1,5 раз.

Лучшие защитные от ИИКП свойства сплавов на основе алюминия с добавками РЗМ и их невы-

сокая удельная плотность (2,9 г/см³) в сравнении с традиционно используемыми в космическом приборостроении сплавами, а также соответствующая требованиям способность к нанесению химико-гальванических покрытий являются предпосылками к применению новых сплавов в качестве конструкционного материала для изготовления корпусов приборов РЭА КА взамен традиционно используемых. Это позволит значительно увеличить защищенность ЭКБ РЭА КА от воздействия ИИКП. Но, помимо вышеперечисленных характеристик, новый сплав должен превосходить традиционно используемые по механическим свойствам и в части технологичности (свариваемость, обработка металлов резанием), что позволит повысить прочность, на-

дежность и долговечность конструкции корпусов приборов РЭА КА и, как следствие, увеличить САС.

Вопросы легирования алюминия РЗМ менее разработаны, чем для магния, но однотипность в строении соответствующих диаграмм состояния дает основание предполагать, что за счет легирования РЗМ в алюминиевых сплавах будет достигнут не меньший эффект, чем в сплавах на основе магния. Согласно построенным на сегодняшний день диаграммам состояния Al—РЗМ можно считать, что РЗМ мало растворяются в алюминии при нормальных условиях. При повышении температуры растворимость РЗМ в алюминии повышается незначительно, что является неблагоприятным фактором для разработки упрочняемых термической обработкой сплавов на основе алюминия. Диаграммы характеризуются образованием эвтектики со стороны алюминия. При дальнейшем увеличении содержания РЗМ образуется ряд химических соединений. Таким образом, изучение диаграммы состояния позволяет предполагать, что механизм воздействия РЗМ на деформируемые алюминиевые сплавы должен заключаться в упрочнении за счет легирования

гранул размером не более 105 мкм), а для сплава III — на специальной установке вибрационного литья (размер гранул 5—12 мм). Для каждого из трех сплавов был проведен анализ микроструктуры на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-6010PLUS/LA и определен фактический химический состав. Для системы I общее количество РЗМ не превышало 11 % по массе, для системы II — не более 7%, а в системе III — не более 9%. При этом сплав системы III отличался от систем I и II наличием в составе магния до 6%. Содержание остальных элементов в системе не превышало 0,15% для каждого из них. Размер включений, образованных РЗМ, систем I и II соизмерим и варьируется в районе 1 мкм. При этом в сплаве системы I преобладают частицы (интерметаллиды) размером в 1 и более мкм, а в сплаве системы II — менее 1 мкм. Сплав системы III обладает наиболее грубой структурой, и размер наиболее крупных элементов, образованных РЗМ, достигает 40—50 мкм. На рис. 2 приведены снимки микроструктуры исследуемых сплавов, полученные методом оптической металлографии на микроскопе Zeiss Observer Z1m, на ко-

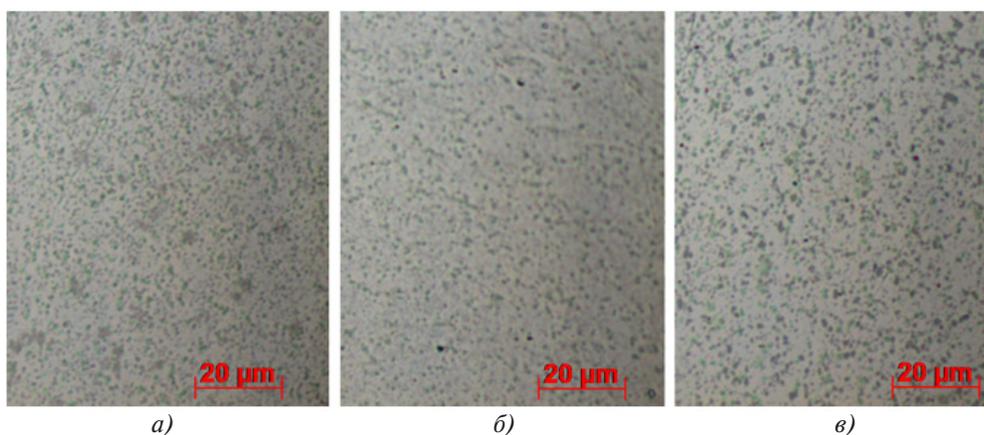


Рис. 2. Оптическая металлография образца из сплава: системы I (а); системы II (б); системы III (в)

твердого раствора или за счет выделения более твердой, мелкодисперсной второй фазы. Кроме того, большая химическая активность РЗМ обеспечивает рафинирование алюминиевых сплавов. РЗМ улучшают электропроводность и теплопроводность алюминия и повышают его механические свойства [6].

Для сравнения существующих вышеописанных сплавов по химическому составу, структуре и механическим характеристикам проводились исследования на листах толщиной 2 мм трех систем легирования: I — Al-Dy-La-Cr-Zr; II — Al-Ce-Cr-Zr; III — Al-Mg-Sc-Zr-La-Ce. Все сплавы изготавливались с применением гранульной технологии. Гранулы для сплавов систем легирования I и II получали на машине центробежного распыления (не менее 50 %

торых видна разница в размерах включений. При этом все исследуемые сплавы имеют равномерную мелкодисперсную структуру. Объемных дефектов не выявлено.

Для определения в исследуемых сплавах и их сварных соединениях значений временного сопротивления σ_B , условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ и относительного удлинения после разрыва δ_k проводились испытания методом растяжения в соответствии с [7] на сервогидравлической испытательной машине «Instron 8801». Образцы изготавливались из листов толщиной 2 мм из основного металла и из сваренных «встык» методом электронно-лучевой сварки (ЭЛС). На рис. 3 приведены условные

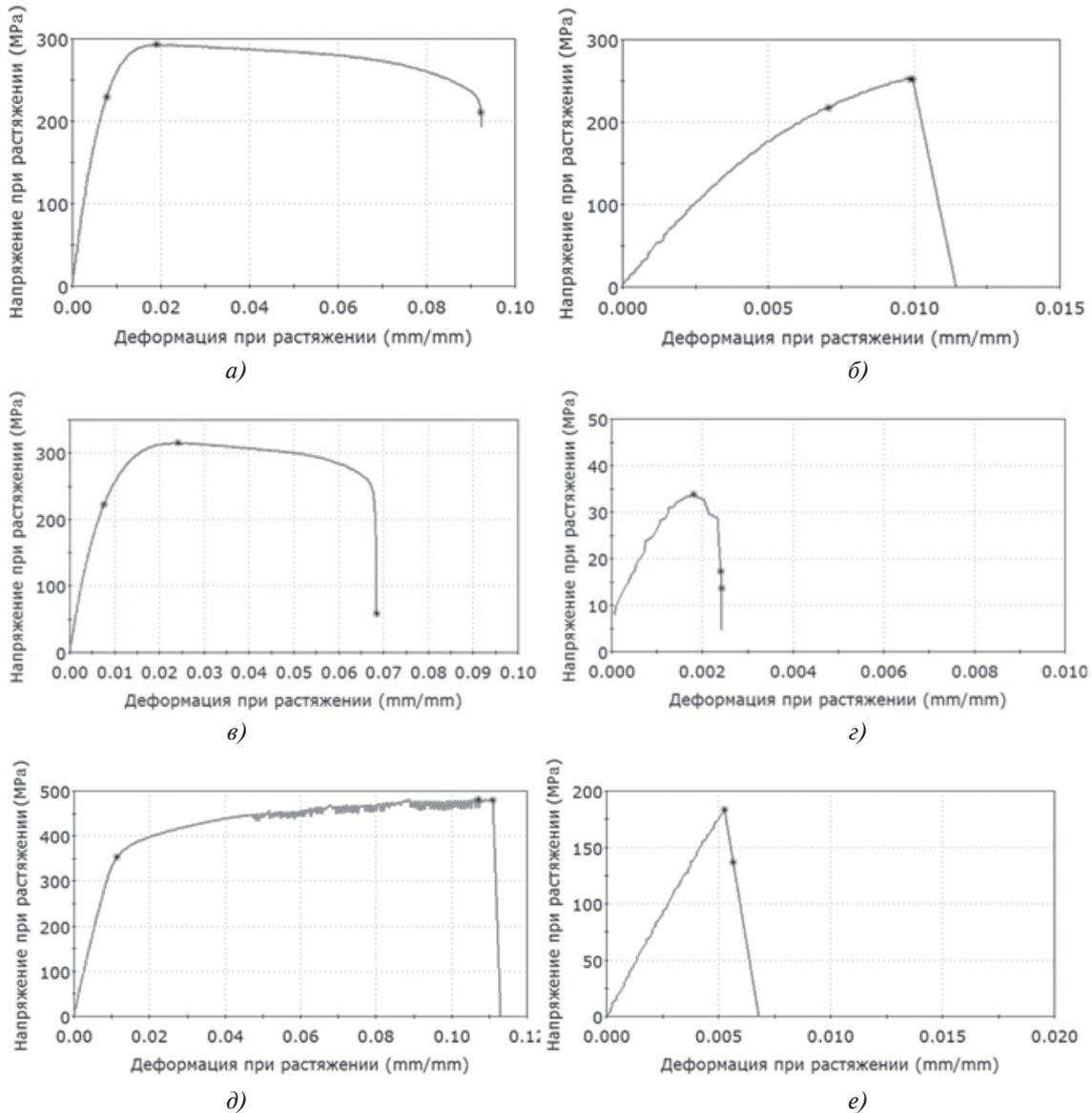


Рис. 3. Условные диаграммы растяжения образцов из основного металла систем I (а), II (в) III (д) и сварных образцов систем I (б), II (г); III (е)

диаграммы растяжения образцов из исследуемых сплавов.

Согласно результатам испытаний, приведенным в таблице, наилучшими механическими характеристиками среди образцов из основного металла исследуемых сплавов обладает сплав системы III. Временное сопротивление $\sigma_B = 480$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 350$ МПа, относительное удлинение после разрыва $\delta_k = 11,09\%$.

Сварные образцы сплавов систем II и III разрушились хрупко при низких нагрузках. Наиболее прочным оказался сварной образец из сплава системы I. Количество пор, присутствующих в изломе сварных образцов, тем выше, чем меньше содержание в составе основного металла РЗМ, что оказывает влияние на механические характеристики.

Как было указано ранее, большая химическая активность РЗМ обеспечивает рафинирование алюминиевых сплавов. То есть увеличение содержания РЗМ способствует повышению технологичности сплавов на основе алюминия в части ЭЛС и улучшению механических характеристик их сварных соединений.

Прочность сварных соединений в изделиях РКТ имеет большое значение, так как сварные соединения испытывают те же нагрузки, что и основной металл при эксплуатации.

Выводы

Каждый из исследуемых сплавов, рассматриваемых как потенциальный конструкционный материал для РКТ, обладает рядом достоинств и недостатков. При увеличении содержания РЗМ в составе сплавов на основе алюминия можно добиться как

Результаты испытаний на растяжение образцов из исследуемых сплавов и их сварных соединений
(ОМ — образец из основного металла, СО — сварной образец)

№ системы легирования	$\sigma_{0,2}$		σ_B		δ_k , %	Содержание РЗМ, % по массе
	МПа	кг/мм ²	МПа	кг/мм ²		
I – ОМ	210	21,43	294	30,00	9,23	11
I – СО	218	22,24	253	25,82	0,99	11 (по ОМ)
II – ОМ	218	22,24	322	32,86	6,85	7
II – СО	17,4	1,78	33,9	3,46	0,24	7 (по ОМ)
III – ОМ	353	36,03	481	49,08	11,1	9
III – СО	137	13,95	183	18,69	0,527	9 (по ОМ)

лучших защитных свойств от воздействия ИИКП, так и улучшения свариваемости, но при этом будет повышаться плотность сплавов. Поэтому необходимо уделить особое внимание повышению значений механических свойств основного металла и сварных соединений для предотвращения увеличения массогабаритных характеристик конструкций. Повышение механических свойств при снижении плотности может в определенной степени быть достигнуто за счет диспергирования фаз алюминидов РЗМ и повышения плотности их распределения в матрице сплава.

Библиографический список

1. Анашин В.С., Ишутин И.О., Улимов В.Н., Емельянов В.В. Методы контроля стойкости специализированных СБИС к естественным ионизирующим излучениям космического пространства // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем-2010. Сборник трудов / Под общ. ред. академика А.Л. Стемпковского. — М.: ИППМ РАН, 2010. С. 233-236.
2. Зинченко В.Ф. Расчет поглощенных доз электронного и протонного излучений внутри космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. — Лыткарино, ФГУП «НИИП». 2002. Вып. №4. С. 87-95.
3. ГОСТ РВ 20.39.414.1-97 Комплексная система общих технических требований. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические изделия военного назначения. Классификация по условиям применения и требования стойкости к внешним воздействующим факторам. — М.: Госстандарт России. — 10 с.
4. Демин В.М., Крамер-Агеев Е.А., Камнев В.А. Испытания защитных свойств опытных образцов защитных корпусов из сплавов АМц и АСВ-РЗ: пояснительная записка. — М.: НИЯУ МИФИ, 2015. — 110 с.
5. Щекотурова О.Е., Бреев Е.Н. Использование новых композиционных материалов с улучшенными свойствами как способ комплексной защиты электронной элементной базы // Мехатроника, автоматизация, управление. Управление и информатика в авиакосмических системах. 2007. №5. С. 33-37.
6. Саввицкий Е.М., Терехова В.Ф., Буров И.В. и др. Сплавы редкоземельных металлов. — М.: Изд-во Академия наук СССР, 1962. — 270 с.
7. ГОСТ 11701-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент. — М.: Изд-во стандартов, 1993. — 13 с.
8. Казьмин А.И. Фазорный метод измерения электрофизических параметров и дефектоскопии радиопоглощающих и композиционных материалов и измерительно-вычислительная система для его реализации // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. №2. С. 149-159.

ALUMINUM BASED ALLOYS WITH RARE-EARTH METALS ADDITIVES APPLICATION FOR ROCKET-AND-SPACE ENGINEERING

Agafonov R.Yu.^{1*}, Vilkov F.E.^{1**}, Kasitsyn A.N.^{1***},
Predko P.Yu.^{2****}, Marchenkov A.Yu.^{3*****}

¹ Russian Space Systems,

53, Aviamotornaya str., Moscow, 111250, Russia

² All-Russian Institute of Light Alloys,

2, Gorbunova str., Moscow, 121596, Russia

³ National Research University «MPEI»,

14, Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russia

* e-mail: agafonov1989@gmail.com

** e-mail: fw999@yandex.ru

*** e-mail: aleks1@list.ru

**** e-mail: predko626@gmail.com

***** e-mail: art-marchenkov@yandex.ru

Abstract

Nowadays “AMg6”, “D16” and “AMn” aluminum alloys are traditionally used for space technology. Application of new advanced aluminum-based materials with of rare-earths additives instead of traditionally used alloys would enhance the electronic components protection from the space ionizing radiation due to alloying with high radiation absorbing elements. Whereas chemical composition manufacturing technique optimization will improve, alloys’ mechanical properties compared to conventionally used, which will allow decrease weight and size parameters of the design.

Tests carried out by Russia’s space industry leading organizations revealed significant preeminence of new alloys compared to conventionally used with regard to protection against outer space ionizing radiation properties, and corresponding to them ability to chemical electroplating. Aluminum based alloys specific mass with rare-earth additives is 2.9 g/cm³ on the average.

This paper is focused on the study of the three different alloying systems: 1 - Al-Dy-La-Cr-Zr, 2 - Al-Ce-Cr-Zr, 3 - Al-Mg-Sc-Zr-La-Ce; with rare-earths content not exceeding 11%, 7% and 9% by weight respectively. Each of the studied alloys, regarded as a material for spacecraft electronic equipment casing has a number of advantages and disadvantages. Increasing the rare-earth metals content in the alloy we can attain both better protective characteristics against space ionizing radiation, and aluminum based alloys with rare-earth additives welding properties improvement. Tough their density herewith will increase. Thus, it is necessary to pay special attention to improve mechanical properties of the basic metal and welding joints to prevent weight

and size parameters of the design. Mechanical properties improvement with density reduction may, in some degree, be achieved by rare-earth aluminide phases’ dispergating and increasing their density distribution in the alloy groundmass.

Keywords: aluminum alloys with rare-earth metals additives, dysprosium, lanthanum, cerium, spacecraft radiation protection, space ionizing radiation, tensile strength, yield strength, elongation.

References

1. Anashin V.S., Ishutin I.O., Ulimov V.N., Emel’yanov V.V. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem. Sbornik statei*, Moscow, IPPM RAN, 2010, pp. 233-236.
2. Zinchenko V.F. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdeistviya na radioelektronnyuyu apparaturu*, 2002, no. 4, pp. 87-95.
3. Demin V.M., Kramer-Ageev E.A., Kamnev V.A. *I Ispytaniya zashchitnykh svoistv opytnykh obraztsov zashchitnykh korpusov iz splavov AMts i ASV-RZ (Protective properties tests of protective enclosures prototypes made of AMC alloys and ASV-RZ)*, Moscow, NIYaU MIFI, 2015, 110 p.
4. Shchekoturova O.E., Breev E.N. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. Upravlenie i informatika v aviakosmicheskikh sistemakh*. 2007, no. 5, pp. 33-37.
5. Savvitskii E.M., Terekhova V.F., Burov I.V. *Splavy redkozemel’nykh metallov (Rare-earth metals alloys)*, Moscow, Izd-vo Akademiya nauk USSR, 1962, 270 p.
6. *Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie tonkikh listov i lent. GOST 11701-84 (Metals. Thin sheets and strips tensile strength test methods, State Standard 11701-84)*, Moscow, Standarty, 1993, 13 p.

7. *Kompleksnaya sistema obshchikh tekhnicheskikh trebovaniy. Izdeliya elektronnoi tekhniki, kvantovoi elektroniki i elektrotekhnicheskie voennogo naznacheniya. Klassifikatsiya po usloviyam primeneniya i trebovaniya stoikosti k vneshnim vozddeystvuyushchim faktoram, GOST RV 20.39.414.1-97* (A comprehensive system of common technical requirements. Electronic products, quantum electronics and electrical engineering for military purposes. Classification under the terms of the application and the requirements of resistance to external factors, State Standard RV 20.39.414.1-97), Moscow, Standarty, 1997, 13 p.
8. Kaz'min A.I. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 2, pp.149-159.