

ВИАМ/2015-Тр-02-01



УДК 669.715:669.725

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-1-1

**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ
ИЗ АЛЮМИНИЕВО-БЕРИЛЛИЕВЫХ СПЛАВОВ
В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ (обзор)**

А.Н. Фоканов

А.В. Тебякин

Февраль 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.

А.Н. Фоканов¹, А.В. Тебякин¹

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВО-БЕРИЛЛИЕВЫХ СПЛАВОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ (обзор)

Описан опыт применения полуфабрикатов из высокомодульных алюминиево-бериллиевых сплавов системы Al–Be–Mg (АБМ) в экспериментальных конструкциях. Под научным руководством акад. И.Н. Фридляндера и д.т.н К.П. Яценко в Воскресенском филиале ВИАМ совместно с КБ им. О.К. Антонова проведены экспериментальные работы по изготовлению обшивки интерцептора крыла из сплава АБМ1 для самолета Ан-72. Совместно с КБ им. А.С. Яковлева создан отсек фюзеляжа из сплава АБМ1. В ЦНИИМВ (ныне ОАО «Композит») были изготовлены сварные конструкции из труб (сплавы типа АБМ), используемые в КБ им. С.А. Лавочкина для изготовления кронштейнов солнечных батарей космических аппаратов серий «Венера» (с 5 по 16) и «Вега».

Ключевые слова: алюминий, бериллий, сплав, слиток, пруток, лист, труба, модуль упругости, сварка.

A.N. Fokanov, A.V. Tebyakin

Experience on application of aluminium-beryllium alloy semiproducts in experimental structures (review)

The article describes experience on application of semiproducts made of high-modulus Al–Be–Mg alloys (ABM) in experimental structures. An experimental work on production of the wing spoiler skin from ABM1 alloy for An-72 aircraft was carried out under scientific supervision of Academician I.N. Friedlander and Doctor of Science (Tech.) K.P. Yatsenko at Voskresensk experimental and technological center of VIAM in cooperation with Antonov Design Bureau. A fuselage section from ABM1 alloy was produced together with A.S. Yakovlev Design Bureau. TSNIIMV (now JSC «Composite») produced ABM1 alloy pipe weldments which are used by S.A. Lavochkin Design Bureau for production of solar battery modules of «Venera» spacecraft (from 5 to 16) and «Vega» series.

Keywords: aluminum, beryllium alloy, ingot, bar, sheet, pipe, elastic modulus, welding.

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

Для обеспечения высокой жесткости конструкций, изготавливаемых из промышленных легких высокопрочных сплавов, необходимо значительно увеличить их толщину и, следовательно, существенно утяжелить.

В этом случае выгодно использовать легкие высокомодульные сплавы типа АБМ, которые благодаря удачному сочетанию свойств, высокой надежности и значительной весовой эффективности позволяют создавать жесткие и легкие конструкции. Использование этих материалов наиболее целесообразно и экономически оправдано в таких областях техники, как ракетно-космическая, авиационная, телескопы и оптические системы.

В 60–80 гг. XX века в СССР под руководством акад. И.Н. Фридляндера и д.т.н. К.П. Яценко созданы высокомодульные деформируемые свариваемые конструкционные сплавы системы Al–Be–Mg на двухфазной алюминиево-бериллиевой основе.

При разработке и исследованиях сплавов установлен механизм действия легирующих элементов, вызывающих аномальный рост модуля упругости при одновременном повышении прочности и пластичности сплавов, получивший статус открытия. Разработанные сплавы алюминия с бериллием не только лишены главного недостатка бериллия – хрупкости, но и выгодно отличаются от промышленных алюминиевых сплавов более высокими модулем упругости, усталостной прочностью и меньшей скоростью роста усталостных трещин [1–4].

В США алюминий-бериллиевые сплавы были созданы методами порошковой металлургии. Эти сплавы первоначально разрабатывали для фирмы Lockheed и назывались Lockalloy, а ныне они известны под торговой маркой AlBeMet.

Преимущества сплавов системы Al–Be–Mg (АБМ) перед алюминиевыми сплавами вызвали большой интерес у конструкторов авиационной и космической техники. Наибольшее применение получил сплав АБМ1 (Al–30Be–5Mg). Работы по освоению технологий производства полуфабрикатов (слитки, листы, прутки, трубы) из сплавов типа АБМ первоначально начаты в ВИАМ и были продолжены в ВИЛС, ЦНИИМВ, Ульяновском металлургическом заводе (УМЗ, г. Усть-Каменогорск).

Особенности создания конструкций из высокомодульных сплавов типа АБМ нашли отражение при разработке рекомендаций, промышленных технологий и инструкций по их применению, гигиене труда и технике безопасности при работе с бериллиевыми сплавами. В ВИАМ разработана производственная инструкция по применению высокомодульных сплавов системы Al–Be–Mg и изготовлению изделий из них [5].

В 1978 г. были начаты работы по бериллиевым сплавам, расширению производства и изготовлению изделий из сплавов типа АБМ под научным руководством акад. И.Н. Фридляндера и д.т.н. К.П. Яценко в введенном в эксплуатацию Воскресенском филиале ВИАМ с целью внедрения их в изделия авиационной и космической техники.

Были поставлены задачи по увеличению массы слитков из сплавов типа АБМ до 80–100 кг для изготовления крупногабаритных листов, по получению деформированных полуфабрикатов (профили стесненного изгиба), а также по разработке технологий сварки (ААрДС, ТКС, ЭЛС) и антикоррозионных защитных покрытий, которые решали совместно с головными лабораториями ВИАМ. Проводили также анализ и изучение опыта предприятий (ВИЛС, ЦНИИМВ, УМЗ), работавших по этой тематике [6–8].

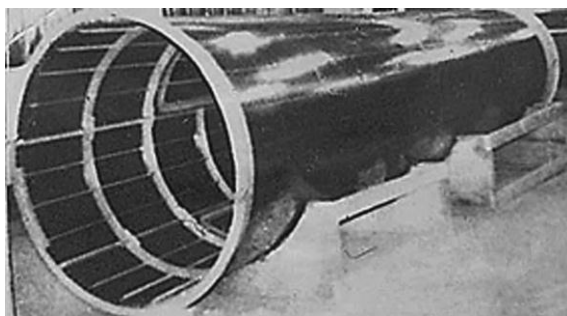


Рис. 1. Отсек из сплава АБМ1, изготовленный для КБ им. А.С. Яковлева

Совместно с киевским КБ им. О.К. Антонова в Воскресенском филиале ВИАМ были проведены экспериментальные работы по изготовлению обшивки интерцептора крыла из сплава АБМ1 для самолета АН-72. Совместно с КБ им. А.С. Яковлева был создан отсек фюзеляжа из этого же сплава для проведения испытаний (рис. 1). В ЦНИИМВ (ныне ОАО «Композит») были изготовлены сварные конструкции из труб (сплавы типа АБМ), используемые в КБ им. С.А. Лавочкина для изготовления кронштейнов солнечных батарей космических аппаратов серий «Венера» (с 5 по 16) и «Ве-

га» (рис. 2). Применение сплава АБМ1 рассматривали в Институте космических исследований – при разработке конструкции наземного радиотелескопа и во ФГУП ГКНПЦ им. М.В. Хруничева – при создании разгонного блока «Бриз» для вывода полезного груза на геостационарную орбиту ракетой-носителем «Протон».

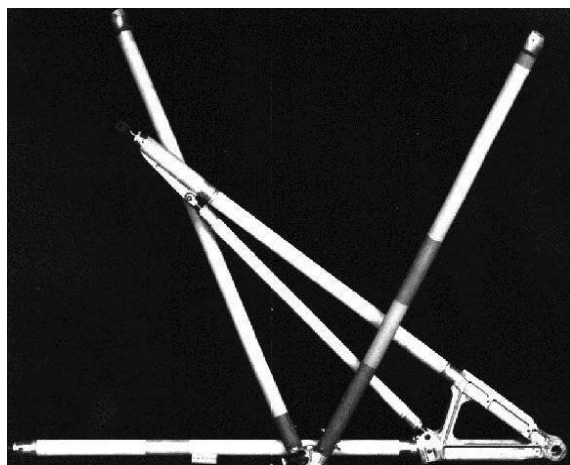
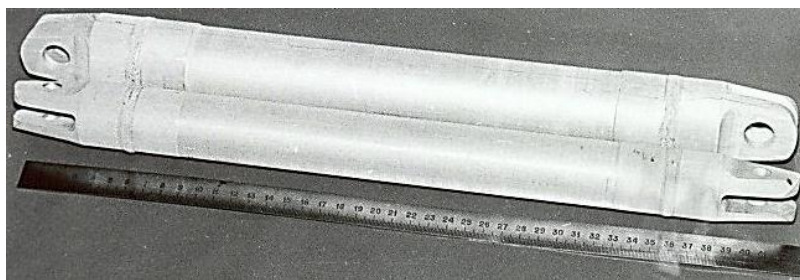


Рис. 2. Кронштейны солнечных батарей КА «Венера» и «Вега», изготовленные в ОАО «Композит»

При создании ВКС «Буран» предложено использовать обладающий высоким модулем упругости сплав АБМ1 в сварных раскосах крыла и ферменных конструкциях шпангоутов фюзеляжа, работающих в области упругих деформаций при растяжении–сжатии при напряжениях, достигающих предела пропорциональности ($\sigma_{пл}$). В Воскресенском филиале ВИАМ совместно с ТМЗ и НИАТ разработаны технологии изготовления и сварки (ААрДС) раскосов для ферменной конструкции из труб, прутков и листа из сплава АБМ1 (рис. 3) с использованием присадочных материалов из сплавов Св.АМгб и АБМ1 [9, 10].

а)



б)



Рис. 3. Сварные раскосы из алюминиево-бериллиевого сплава АБМ1:
а – из трубы с прутком; *б* – из листа с прутком

Проведенные в ОАО «НПО „Молния”» испытания сварных раскосов показали, что сварные соединения выдержали расчетные нагрузки при статических испытаниях при растяжении и сжатии. Однако характеристики предела пропорциональности для сплава АБМ1, полученные на трубах, оказались недостаточными и имели значительный разброс

значений. В ЦАГИ проведены испытания сварных раскосов, изготовленных из листа толщиной 2 мм, и сварных конструктивных элементов, вырезанных из этих раскосов, где также подтвердили разброс значений предела пропорциональности для сплава АБМ1. Сплав АБМ1 предлагали использовать также в конструкции балансировочного щитка и трансмиссионных валов, работающих при кручении.

В Воскресенском филиале ВИАМ совместно с НИАТ разработана технология изготовления стрингеров из сплава АБМ1 методом стесненного изгиба, а также изготовлены клепаные и сварные панели из этого сплава (рис. 4). Испытания панелей со стрингерами из сплава АБМ1 показали возможность снижения массы конструкций на 30% в сравнении с панелями из алюминиевого сплава Д16.

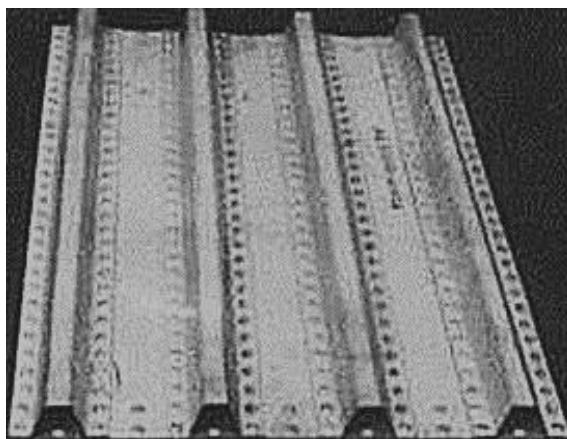


Рис. 4. Панель из сплава АБМ1 со стрингерами, полученными методом стесненного изгиба

По результатам испытаний выявлена необходимость разработки деформируемого сплава пониженной плотности системы Al–Be–Mg с большим содержанием бериллия (40%) и повышенными механическими характеристиками для применения в космической технике. В ВИАМ были проведены разработка и паспортизация нового сплава АБМ4, обладающего более благоприятным сочетанием физико-механических характеристик.

В связи с токсичностью сплавов типа АБМ при механической обработке и для исключения его обработки при сборке конструкций в общецеховых условиях разработана технология сварки сплава АБМ1 с алюминиевыми сплавами АМг6 (1560) и 1201. Технология сварки труб из сплава АБМ1 с законцовками из сплава АМг6 и нанесения защитного покрытия была использована во ФГУП ГКНПЦ им. М.В. Хруничева при создании макета орбитального телескопа [11–13].

Уникальные свойства алюминиево-бериллиевых сплавов не остались без внимания зарубежных фирм. Для зарубежных заказчиков были изготовлены рамы для спортивных гоночных велосипедов (рис. 5).



Рис. 5. Рама спортивного велосипеда из сплава АБМ1, изготовленная в ОАО «Композит» по заказу фирмы Brush Wellman (США)

Окончание «холодной войны», распад СССР и последующая экономическая нестабильность привели к резкому падению спроса на изделия из бериллия и его сплавов в высокотехнологичных отраслях промышленности. Metallургический завод по производству бериллия (АО «УМЗ») оказался на территории другого государства – в республике Казахстан (г. Усть-Каменогорск), хотя рудная сырьевая база оказалась на территории России. Возрождение спроса на бериллиевую продукцию началось только в 2004–2005 гг., причем по показателям качества продукция заметно уступала продукции советского периода. При этом цены на бериллиевую продукцию выросли до уровня мировых [14].

В этих условиях возникла необходимость пересмотра концепции развития этого направления и были начаты исследования в области создания сплавов, содержащих меньшее количество бериллия и легированных другими элементами.

Многолетний опыт применения бериллиевых бронз, содержащих до 4% бериллия и обладающих уникальным комплексом свойств, позволил применить алюминий-литиевые сплавы, содержащие до 3% бериллия, в конструкции планера. Наличие в структуре сплавов бериллия наряду с литием и магнием обеспечивает более низкое значение плотности по сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами средней прочности, что позволяет заметно снизить массу конструкции [15].

На основе системы Al–Be–Mg–Li–Cu разработан деформируемый, термоупрочняемый конструкционный сплав ВАБ-1 пониженной плотности, содержащий 2,5% бериллия. За базовый аналог был принят сплав 1441, но в предложенном сплаве лития и магния в 2 раза больше, а меди – в 4 раза меньше. Полуфабрикаты из сплава, содержащего в 10 раз меньше бериллия, чем АБМ1, не уступают ему по прочности и обладают жесткостью (модуль упругости) $E=85$ ГПа (термообработанные по режиму: закалка и двухступенчатое старение), что превышает значения жесткости для сплавов системы Al–Mg–Li–Cu–Zr (см. таблицу) [16–20].

Механические свойства сплавов

Сплав	$d, \text{ г/см}^3$	$E, \text{ ГПа}$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
			МПа		
АБМ1	2,35	135	450	300	16
1440	2,56	80	460	400	8
1441	2,60	80	460	350	6,8
ВАБ-1	2,60	85	455	400	9,5

Дальнейшая работа будет направлена на получение стабильных прочностных характеристик полуфабрикатов из сплава ВАБ-1, соответствующих паспортным данным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фридляндер И.Н., Яценко К.П., Терентьева Т.Е., Хилковский-Сергеев Н.А. Бериллий – материал современной техники: Справ. изд. М.: Металлургия. 1992. 128 с.
2. Фридляндер И.Н., Яценко К.П., Быков В.М., Матвеев О.В., Молчанова Л.В., Фоканов А.Н. Бериллиево-алюминиевые сплавы и их физико-механические и эксплуатационные свойства /В сб. тезисов докладов I Всесоюзного совещания «Металлооптические элементы из бериллия». Киев. 1985. С. 11–12.
3. Богданов Б.В., Проскураков Г.В., Колганов И.Н., Фоканов А.Н. О возможности использования сплава АБМ1 в силовых конструкциях изделий //Авиационная промышленность. 1988. №8. С. 12.
4. Fridlyander I.N., Sister V.G., Grushko O.E., Berstenev V.V., Sheveleva L.M., Ivanova L.A. Aluminum alloys: promising materials in the automotive industry //Metal Science and Heat Treatment. 2002. Т. 44. №9–10. P. 365–370.
5. Фридляндер И.Н. Бериллиевые сплавы – перспективное направление аэрокосмического материаловедения //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. №1. С. 6–10.
6. Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Каськов В.С. Комплексная система защиты бериллия от окисления //Авиационные материалы и технологии. 2010. №1. С. 12–16.
7. Розененкова В.А., Солнцев С.С., Миронова Н.А. Комплексная защита бериллиевых сплавов от окисления и сублимации токсичных паров бериллия //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 03 (viam-works.ru).
8. Каблов Е.Н., Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А. Композиционные стеклометаллические покрытия для защиты бериллия при высоких температурах //Стекло и керамика. 2012. №4. С. 12–15.
9. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» /Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Фонд «Наука и жизнь». 2013. 128 с.
10. Каськов В.С. Бериллий – конструкционный материал для многофазовой космической системы //Труды ВИАМ. 2013. №3. Ст. 03 (viam-works.ru).
11. Фоканов А.Н. Изготовление сварной конструкции из сплава АБМ1 //Авиационная промышленность. 1987. №7. С. 60–61.
12. Фоканов А.Н., Кузнецова Е.А., Попов В.Д., Курочко Р.С. Свариваемость сплава АБМ1 со сплавом 1201 //Сварочное производство. 1984. №1. С. 17–19.
13. Фоканов А.Н., Пастух М.Н., Курочко Р.С. Свариваемость сплава АБМ1 со сплавом АМг6 //Сварочное производство. 1982. №9. С. 22–24.
14. Каськов В.С. Бериллий и материалы на его основе //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 222–226.
15. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
16. Каськов В.С., Илюшин В.Н., Тебякин А.В. Стабильность прочностных характеристик сплава ВАБ-1, полученного суспензионным литьем //Металлургия машиностроения. 2008. №6. С. 44–47.
17. 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.
18. Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л., Колобнев Н.И., Коваль Ю.Н. Алюминийлитиевые сплавы. Структура и свойства. К.: Наукова думка. 1992.
19. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 167–182.
20. Горбунов П.З., Тебякин А.В. Критерии аэромобильности бералметов – материалов авиакосмической техники. М.: Полиграф сервис. 2008. 84 с.

REFERENCES LIST

1. Fridljander I.N., Jacenko K.P., Terent'eva T.E., Hilkovskij-Sergeev N.A. Berillij – material sovremennoj tehniki [Beryllium – the material of modern technology]: Sprav. izd. M.: Metallurgija. 1992. 128 s.
2. Fridljander I.N., Jacenko K.P., Bykov V.M., Matveev O.V., Molchanova L.V., Fokanov A.N. Berillievo-aljuminievye splavy i ih fiziko-mehaničeskie i jekspluatacionnye svojstva [Beryllium-aluminum alloys, and their physical, mechanical and performance properties] /V sb. tezisov dokladov I Vsesojuznogo soveshhanija «Metallooptičeskie jelementy iz berillija». Kiev. 1985. S. 11–12.
3. Bogdanov B.V., Proskurjakov G.V., Kolganov I.N., Fokanov A.N. O vozmožnosti ispol'zovanija splava ABM1 v silovyh konstrukcijah izdelij [The possibility of using the alloy ABM1 in power product design] //Aviacionnaja promyšlennost'. 1988. №8. S. 12.
4. Fridljander I.N., Sister V.G., Grushko O.E., Berstenev V.V., Sheveleva L.M., Ivanova L.A. Aluminum alloys: promising materials in the automotive industry //Metal Science and Heat Treatment. 2002. T. 44. №9–10. P. 365–370.
5. Fridljander I.N. Berillievye splavy – perspektivnoe napravlenie ajerokosmičeskogo materialovedenija [Beryllium alloys – a promising direction of Aerospace Materials] //Vse materialy. Jenciklopedičeskij spravocnik. 2009. №1. S. 6–10.
6. Solncev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Kas'kov V.S. Kompleksnaja sistema zashhity berillija ot okislenija [A comprehensive system of protection against oxidation of beryllium] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №1. S. 12–16.
7. Rozenenkova V.A., Solncev S.S., Mironova N.A. Kompleksnaja zashhita berillievych splavov ot okislenija i sublimacii toksichnyh parov berillija [Comprehensive protection against oxidation of beryllium alloys and beryllium sublimation toxic fumes] //Trudy VIAM. 2013. №5. St. 03 (viam-works.ru).
8. Kablov E.N., Solncev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A. Kompozicionnye steklometallicheskie pokrytija dlja zashhity berillija pri vysokih temperaturah [Glass-metal composite coating to protect the beryllium at high temperatures] //Steklo i keramika. 2012. №4. S. 12–15.
9. Dospėhi dlja «Burana». Materialy i tehnologii VIAM dlja MKS «Jenergija–Buran» [Armor for "Buran". Materials and technologies for the ISS VIAM «Energia–Buran»] /Pod obshh. red. E.N. Kablova. M.: Fond «Nauka i zhizn'». 2013. 128 s.
10. Kas'kov V.S. Berillij – konstrukcionnyj material dlja mnogorazovoj kosmičeskoj sistemy [Beryllium – construction material for reusable space system] //Trudy VIAM. 2013. №3. St. 03 (viam-works.ru).
11. Fokanov A.N. Izgotovlenie svarnoj konstrukcii iz splava ABM1 [Manufacturing of welded alloy ABM1] //Aviacionnaja promyšlennost'. 1987. №7. S. 60–61.
12. Fokanov A.N., Kuznecova E.A., Popov V.D., Kurochko R.S. Svarivaemost' splava ABM1 so splavom 1201 [Weldability ABM1 alloy to alloy 1201] //Svarocnoe proizvodstvo. 1984. №1. S. 17–19.
13. Fokanov A.N., Pastuh M.N., Kurochko R.S. Svarivaemost' splava ABM1 so splavom AMg6 [Weldability of the alloy to alloy ABM1 AMg6] //Svarocnoe proizvodstvo. 1982. №9. S. 22–24.
14. Kas'kov V.S. Berillij i materialy na ego osnove [Beryllium and materials on its basis] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 222–226.
15. Kablov E.N. Strategičeskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
16. Kas'kov V.S., Iljushin V.N., Tebjakin A.V. Stabil'nost' prochnostnyh harakteristik splava VAB-1, poluchennogo suspenzionnym lit'em [The stability of the strength characteristics of the alloy of the PSA-1 prepared by casting a slurry] //Metallurgija mashinostroenija. 2008. №6. S. 44–47.
17. Antipov V.V., Kolobnev N.I., Hohlatova L.B. Razvitie aljuminijlitievych splavov i mnogostupenčatyh rezhimov termičeskoj obrabotki [Development aljuminijlitievych alloys and multi-heat treatment] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 183–195.
18. Fridljander I.N., Chuistov K.V., Berezina A.L., Kolobnev N.I., Koval' Ju.N. Aljuminij-litievye splavy. Struktura i svojstva [Aluminum-lithium alloys. Structure and Properties]. K.: Naukova dumka. 1992.

19. Antipov V.V., Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Vahromov R.O. Aljuminievye deformiruemye splavy [Aluminium wrought alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 167–182.
20. Gorbunov P.Z., Tebjakin A.V. Kriterii ajeromobil'nosti beralmetov – materialov aviakosmicheskoj tehniki [Criteria airmobile beralmetov - aerospace materials]. M.: Poligraf servis. 2008. 84 s.