



Бериллиевые сплавы – перспективное  
направление аэрокосмического  
материаловедения

И.Н. Фридляндер  
*академик РАН*

Август 2008

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ) – 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 30 научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в 4 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.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Все материалы. Энциклопедический справочник», № 1, 2009 г.

Электронная версия доступна по адресу: [www.viam.ru/public](http://www.viam.ru/public)

## **Бериллиевые сплавы – перспективное направление аэрокосмического материаловедения**

И.Н. Фридляндер

*Всероссийский институт авиационных материалов*

Быстрое развитие авиационной и ракетно-космической техники и сложные условия эксплуатации конструкций обуславливают необходимость разработки новых прогрессивных материалов, удовлетворяющих специфическим требованиям, предъявляемым к современным конструкциям летательных аппаратов. Актуальной задачей является создание легких свариваемых конструкционных сплавов, имеющих не только высокую прочность, но и, в отличие от существующих легких промышленных сплавов, высокую жесткость, характеризуемую величиной модуля упругости. Из легких металлов наиболее высокий модуль упругости имеет бериллий. Его удельный модуль упругости в 6 раз выше, чем у таких широко применяемых материалов, как алюминиевые, титановые, магниевые сплавы и стали, имеющих приблизительно одинаковый удельный модуль упругости.

Бериллий обладает также большой удельной прочностью, очень высокими теплоемкостью и теплопроводностью. Однако хрупкость бериллия является серьезным препятствием для его применения в несущих конструкциях летательных аппаратов. Более высокой вязкостью, чем бериллий, обладают высококомодульные алюминийбериллиевые сплавы.

Проблема применения эффективных алюминийбериллиевых сплавов приобрела большую научно-техническую и государственную важность к началу 60-х годов в связи с созданием новых образцов летательных аппаратов.

Целью проведенных работ являлась разработка научных основ получения новых высококомодульных алюминийбериллиевых свариваемых сплавов, отличающихся от бериллия значительно более высокой вязкостью, разработка композиций сплавов и изучение их физико-механических,

технологических и эксплуатационных свойств, разработка рекомендаций по применению новых сплавов в конструкциях летательных аппаратов.

Научная новизна проведенных работ состояла в следующем.

1. Разработка нового научного направления материаловедения, ставящего своей задачей создание теоретических основ получения и легирования высокомодульных свариваемых алюминийбериллиевых сплавов, существенно превосходящих по удельному модулю упругости все известные традиционные материалы и обладающих высокими характеристиками надежности. При этом были даны новые представления:

- о возможной основе высокопрочных деформируемых сплавов пониженной плотности, обычно представляющей твердый раствор, а в данном случае эвтектическую (или перитектическую) смесь двух разнородных фаз;

- о механизме действия легирующих элементов, вызывающих аномальный рост модуля упругости при одновременном повышении прочности и пластичности сплавов.

Установлены особенности взаимодействия компонентов основы сплавов и легирующих компонентов в многокомпонентных системах и изменения фазового состава и свойств высокомодульных сплавов системы Al–Be–Mg и Al–Be–Mg–Zn в зависимости от содержания компонентов.

Полученные закономерности положены в основу создания композиций высокомодульных сплавов в широком диапазоне концентраций бериллия.

2. В изыскании эффективных путей повышения высокотемпературных свойств алюминийбериллиевых сплавов посредством легирования элементами, образующими с алюминием наиболее высокопрочный, твердый раствор и тугоплавкий интерметаллидный упрочнитель (вторую фазу), частицы которого обеспечивают микрогетерогенизацию структуры и, являясь диффузионно-стойкими барьерами, значительно повышают жаропрочность материала.

Развитие алюминийбериллиевых сплавов легче понять, рассмотрев этапы металлохимии бериллия [1]. Воспользуемся хронологией важнейших

событий химии бериллия, отметив основные:

1798 г. – открытие Л.Н. Вокленом бериллиевой земли. Первые опыты Воклена по получению ряда соединений, образованных с помощью бериллиевой земли (карбоната, нитрата и фосфата бериллия);

1801–1803 гг. – И.Ф. Гмелин анализировал сибирские бериллы, подтвердив опыты Л.Н. Воклена;

1842 г. – И.В. Авдеев впервые высказал идею о двухвалентности бериллия, определил относительную атомную массу бериллия (9,337);

1869 г. – изучение атомного спектра бериллия (Т.Р. Тален). Г. Кляко определил относительную атомную массу бериллия (9,283), изучал свойства фторида бериллия. Д.И. Менделеев высказал мысль о двухвалентности бериллия и предсказал атомную относительную массу (9,1);

1882 г. – оценка Ф.А. Рыжовым атомной массы бериллия по плотности пара бериллийорганических соединений;

1884 г. – определение плотности бериллия Л.Ф. Нильсоном и О. Петерсоном (1840 кг/м<sup>3</sup>), В. Лавров получил бериллийорганические соединения – диметил- и дипропилбериллий путем реакции элементарного бериллия с метиловой и пропиловой ртутью;

1889 г. – подтверждение мнения Д.И. Менделеева о бериллии как двухвалентном элементе. Оценка Д.И. Менделеевым атомной массы бериллия, исходя из данных о его плотности пара;

1902 г. – разработка Г.Н. Вырубовым метода получения окиси бериллия;

1909 г. – Ф.А. Цандер (ученик К.Э. Циолковского) первым высказал идею возможности использования бериллия в ракетостроении;

1915 г. – в США и Германии начались одновременные разработки промышленного способа получения бериллия, его сплавов и соединений;

1916 г. – Г. Эстерхельд провел систематические исследования сплавов меди с бериллием. А. Купер (США) получил слиток бериллия, годный для промышленного применения;

1918 г. – А. Купер запатентовал сплав на алюминийбериллиевой основе;

1923 г. – первые работы по созданию отечественного промышленного способа производства бериллия;

1932 г. – был запатентован отечественный способ получения металлического бериллия (В.И. Спицын), в Гиредмете пущена электролитическая ванна производительностью 1 кг металлического бериллия в сутки;

1935 г. – первый промышленный выпуск медно-бериллиевой лигатуры в Гиредмете;

1936 г. – создание первых отечественных медных сплавов с бериллием – бериллиевых бронз типа БрБ2;

1937–1940 гг. – в лаборатории сплавов Гиредмета были разработаны способы получения лигатур систем: медь–бериллий–цирконий, медь–бериллий–хром и исследованы важнейшие участки диаграмм состояния этих систем. В МИЦМИЗе разрабатывается карбометрический метод получения медно-бериллиевых лигатур;

1941–1945 гг. – производство многокомпонентных сплавов алюминия с добавками бериллия налажено в Германии. Применение их для изготовления, отливок сложной формы для головок цилиндров авиационных моторов. Начат выпуск легких сплавов на основе бериллия в США.

Работы по технологии получения материалов на основе бериллия в нашей стране во время Великой Отечественной войны были замедлены. В послевоенные годы интенсивному развитию исследований в области химико-металлургической технологии бериллия импульс придал научно-технический прогресс, в первую очередь, в новейших областях техники – атомной, ракетной, космической и др.

1946 г. – в ВИАМ И.Н. Фридляндером и его группой выпущен научно-технический отчет по исследованию алюминийбериллиевых сплавов;

1947 г. – период усовершенствования методов обработки сырья;

1955 г. – получение различных соединений, изготовление металла повышенной чистоты и разработка прогрессивных способов плавки и литья;

1956 г. – И.Н. Фридляндером и К.П. Яценко разработан оптимальный состав алюминиевого высокомодульного сплава АБМ1;

1957–1958 гг. – проведены исследования сплавов и диаграммы состояния системы Al–Be–Mg в области, прилежащей к стороне Al–Be (И.Н. Фридляндер, К.П. Яценко, А.В. Новоселова), построен самолет конструкции П.В. Цыбина с широким применением деталей из сплава АБМ1; вес конструкции снижен на 40%; отливка слитков и прокатка листов в ВИАМ (Р.Е. Шалин);

1959 г. – разработан и внедрен способ сварки алюминийбериллиевого сплава в защитных газах методом плавления;

1960–1968 гг. – сплавы АБМ применены в опытных конструкциях КБ М.К. Янгеля и В.М. Челомея; этот период характеризуется установлением закономерностей влияния небольших добавок (от микролегирования до нескольких процентов бериллия), повышающих физико-механические свойства сплавов, преимущественно алюминиевых, магниевых, содержащих медь, никель, кобальт и др.;

1969 г. – исследована кристаллизация сплавов системы Al–Be–Mg–Zn и построено сечение этой диаграммы состояния, соответствующее содержанию алюминия и бериллия 70 и 20% (И.Н. Фридляндер, К.П. Яценко, А.В. Новоселова), показано, что четырехкомпонентные сплавы в отличие от сплавов Al–Mg–Be являются стареющими;

1970–1977 гг. – установлены закономерности изменения структуры и свойств сплавов типа АБМ с учетом легирования компонентами, взаимодействующими с бериллием в пределах их растворимости в алюминии в твердом состоянии; разработаны (в 1971 г.) сплавы АБМ2 и АБМ3, предложен состав сплава типа АБМ, легированного литием; Воскресенским ЭТЦ ВИАМ совместно с ОКБ О.К. Антонова налажен выпуск панелей из сплава АБМ1 для самолета О.К. Антонова; сплавы АБМ применены в опытных самолетах КБ О.К. Антонова и КБ А.С. Яковлева;

1978–1980 гг. – систематизированы и обобщены результаты исследований и

применения сплава АБМ1, выпущены справочный материал и паспорт на сплав и освоено промышленное производство полуфабрикатов из этого сплава, получены слитки массой 80 кг, разработан новый сплав АБМ 40-3 (1979 г.);

1981–1985 гг. – оптимизирован состав ванны для химического фрезерования сплавов АБМ (1981 г.), предложен новый сплав АБМ4 (1984 г.), разработана технология изготовления вакуум-плотной фольги (1982 г.) и получения листовых профилей стесненным изгибом в сочетании волочения с прокаткой (1983 г.) из сплавов типа АБМ. Проведен сравнительный анализ технологичности и физико-механических свойств литых и деформированных сплавов типа АБМ, рекомендованы пути получения оптимального сочетания прочности и пластичности: содержание бериллия и магния должно изменяться в пределах 30–50% и 3–5% соответственно, причем определенному содержанию бериллия должно соответствовать регламентированное содержание магния. В этот период за рубежом создан ряд порошковых сплавов Ве–Аl-марок Lx-62 (62% Ве), Lx-43 (43% Ве), известных под названием «Локаллоу». Значительно позже отечественных сплавов на основе систем Al–Ве–Mg и Al–Ве–Mg–Zn за рубежом появились также трехкомпонентные «Локаллоу» системы Al–Ве–Mg марок Lx-59-3 (59% Ве, 3% Mg), Lx-40-3 (40% Ве, 3% Mg);

1986–1990 гг. – разработана технология нанесения защитных покрытий (1986 г.) и окраски деталей и агрегатов (1987 г.), соединение элементов конструкций из сплавов типа АБМ методом низкотемпературной пайки (1989 г.). Получены пресованные профили из гранулированных бериллийалюминиевых сплавов (1988 г.), а также трубы из сплавов типа АБМ методом ротационной раскатки (1990 г.) диаметром до 200 мм и со стенкой толщиной 1 мм. Установленная И.Н. Фридляндером, К.П. Яценко и А.В. Новоселовой закономерность увеличения жесткости (высокий модуль в сочетании с высокой пластичностью) в сплавах на основе систем Al–Ве при введении в них Mg (с очень низким модулем) зарегистрирована как научное

открытие №396 (1988 г.);

1991–1994 гг. – предложен новый сплав типа АБМ, легированный переходными металлами (1991 г.), полуфабрикаты из этого материала плотностью  $2,1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  обладают  $\sigma_B < 620$ ,  $\sigma_{0,2} < 490$ ,  $\sigma_B^{400} < 320$ ,  $\sigma_{0,2}^{400} < 270$  МПа. Продолжены исследования по применению сплавов АБМ в конструкциях сверхлегких летательных аппаратов, гоночных велосипедов, судов.

Обладая непревзойденным среди традиционных материалов удельным модулем упругости, сплавы АБМ существенно превосходят по эффективности применения в несущих оболочковых конструкциях алюминиевые, титановые сплавы и стали.

На ряд сплавов выпущены паспорта ВИАМ №293 (АБМ1), №500 (АБМ2), №1060 (АБМ3), №1552 (АБМ4). Из алюминийбериллиевых сплавов АБМ1 и АБМ1-1 освоено производство полуфабрикатов широкой номенклатуры – прутков, труб, листов, поковок, штамповок и др.

Высокомодульные сплавы типа АБМ использованы в различных агрегатах опытных самолетов П.В. Цыбина, О.К. Антонова, А.С. Яковлева: кильях, горизонтальном и вертикальном оперении, рулях, интерцепторах и др.

Кроме того, эти сплавы нашли широкое применение в изделиях (в т. ч. штатных) ракетно-космической техники. Из них изготавливались силовые корпуса, фермы крепления, кронштейны, подкосы, переходные отсеки и другие элементы конструкций. Данные о применении этих сплавов в конструкциях ракетно-космической техники на первом этапе исследований приведены на основе результатов совместных работ ВИАМ с КБ М.К. Янгеля и В.М. Челомея, а также на основании сведений о дальнейшем использовании сплавов в конструкциях этого типа, осуществленных ЦНИИМВ, заводом им. Лавочкина и другими предприятиями отрасли [2].

Успешному применению сплавов АБМ в данных конструкциях способствует их хорошая свариваемость, высокая пластичность и прочность сварных соединений, достигающая  $0,8–0,9\sigma_B$  основного материала.

К числу космических объектов, в которых сплав АБМ1 использован для изготовления ферм крепления панелей солнечных батарей в виде 22 сварных трубчатых узлов, относится серия межпланетных автоматических станций «Венера», начиная с «Венеры-9» и др. Узлы из сплава АБМ1 нормально функционировали в составе межпланетных станций «Венера» на всех стадиях полета к планете Венера и во время работы в качестве ее искусственных спутников. С помощью межпланетных станций «Венера» осуществлялась долгосрочная программа исследований космического пространства.

В результате применения высокомодульных сплавов в объектах ракетно-космической техники масса элементов конструкций снижена на 15–40%, обеспечена их высокая жесткость, уменьшены нежелательные колебания космических аппаратов при выполнении маневров и расширены возможности исследования космического пространства.

В таблице приводятся данные о видах полуфабрикатов, выпускаемых из высокомодульных сплавов, и их применении в конструкциях авиационной и ракетно-космической техники.

Сплавы типа АБМ испытаны и применены в несущих конструкциях самолетов, ракет и межпланетных автоматических станций, что обеспечило значительное повышение весовой отдачи и эксплуатационной надежности.

Сравнительно широкое применение бериллиевые сплавы нашли в космическом корабле «Буран». Помимо теплопоглощающих элементов для тормозов, из бериллия изготовлены все рамки остекления, а из сплава АБМ – трубчатые тяги для ферменных конструкций фюзеляжа.

**Применение высокомодульных сплавов АБМ  
в авиационной и ракетно-космической технике**

Основные параметры сплавов	По отношению к промышленному алюминиевому сплаву Д16Т	Виды выпускаемых полуфабрикатов (сплавы АБМ1, АБМ1-1)	Целесообразные элементы конструкций, в том числе сварные $\frac{\sigma_{свар}}{\sigma_B} = 0,7-0,9$	Эффективность применения
$d = 2,35-2,05 \text{ г/см}^3$ $E/d = 5,7 \cdot 10^3 - 10,5 \cdot 10^3 \text{ км}$  $\sigma_B/d = 20-30 \text{ км}$ $\sigma_{-1}/d = 7,6-13,1 \text{ км}$  Акустическая выносливость $N_{цикл} = 4,4 \cdot 10^8$ (при $\sigma_B = 34 \text{ МПа}$ ) $C_M = 1,13-1,75 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$	0,85—0,75  2,3—4,2  1,2—1,9 1,4—2,4  40—50  1,25—1,9	Листы  Прессованные изделия (прутки, полосы, сварочная проволока)  Профили стесненного изгиба (опытные) Штамповки  Поковки	Элероны Горизонтальное оперение Вертикальное оперение Интерцепторы Подкосы крыла Отсеки фюзеляжа Стрингеры Силовые корпуса Фермы крепления солнечных батарей Кронштейны Переходные отсеки Раскосы Оболочковые конструкции типа цельносварных емкостей Детали крепежа и др.	1. Снижение массы на 15—40 % 2. Повышение жесткости и эксплуатационной надежности

**Список литературы:**

1. Капустинская К.А., Макареня А.А. Металл из «Камня надежды». – М.: Энергоиздат, 1982. С. 56–83.
2. История металлургии легких сплавов в СССР. 1945–1987 / Под ред. Ф.И. Квасова, Н.К. Ламана. – М.: Наука, 1988. 440 с.