

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Металловедение магния и его сплавов. Области применения: Справочник / Под. ред. М.Б. Альтмана, М.Е. Дрица, М.А. Тимоновой и др. Ч. 1. М.: Metallurgia. 1978. 231 с.*
2. *Волкова Е.Ф., Морозова Г.И. Структурно-фазовое состояние и свойства цирконийсодержащего магниевого сплава МА14 // Металлургия. 2006. №1. С. 24–28.*
3. *Волкова Е.Ф. Современные деформируемые сплавы и композиционные материалы на основе магния // Металлургия. 2006. № 11. С. 5–9.*
4. *Садков В.В., Лапонов Ю.Л., Агеев А.П. и др. Перспективы и условия применения магниевых сплавов в самолетах ОАО «Туполев» // Металлургия машиностроения. 2007. № 4. С. 19–23.*
5. *Волкова Е.Ф., Моисеев Н.В. Особенности деформации высокопрочных магниевых сплавов в режиме сверхпластичности / В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып. «Перспективные магниевые и титановые сплавы для авиакосмической техники». М.: ВИАМ. 2002. С. 136–142.*
6. *Мухина И.Ю., Журнов А.Д., Степанов В.В., Уридия З.П. Литейные магниевые сплавы для авиастроения / В сб.: Авиационные материалы и технологии. М.: ВИАМ. 2002. С. 71–75.*
7. *Мухина И.Ю., Степанов В.В., Уридия З.П. Влияние технологии плавки и литья на свойства магниевых сплавов / Сб. тезисов докл. «Проблемы создания новых материалов для авиакосмической отрасли в XXI веке». 2001. С. 74.*
8. *Каблов Е.Н., Мухина И.Ю., Корчагина В.А. Присадочные материалы для формовочных смесей при литье магниевых сплавов // Литейное производство. 2007. № 5. С. 15–18.*
9. *Мухина И.Ю., Уридия З.П. Магний – основа сверхлегких материалов // Металлургия машиностроения. 2005. № 6. С. 29–31.*
10. *Волкова Е.Ф., Мухина И.Ю. Новые материалы на магниевой основе и высокоресурсные технологии их производства // Технология легких сплавов. 2007. № 2. С. 28–34.*
11. *Дуюнова В.А. Новые составы и технология получения противопригарных присадочных материалов для производства магниевого литья, применительно к изделиям авиакосмической техники: Автореф. дис. на соискание ученой степени к.т.н. М. 2008. 27 с.*

В.С. КАСЬКОВ

## БЕРИЛЛИЙ И МАТЕРИАЛЫ НА ЕГО ОСНОВЕ

В настоящее время в России производство бериллия и бериллиевых сплавов существенно снизилось, что обусловлено в основном причинами исторического характера: с распадом СССР рудник принадлежит России, а производство бериллия и изделий из него, которое практически прекращено, находится в Казахстане. Сегодня осваивается производство бериллия на заводе «Базальт» (г. Саратов), что, очевидно, даст новый импульс развитию исследований в области металлургии и металлофизики бериллия. В США ~65% потребления бериллия приходится на сплавы системы Ве–Си, в которых содержится в среднем 2% Ве.

Сочетание высокой прочности, коррозионной стойкости и отсутствие ферромагнитных свойств позволяют использовать бериллиевую бронзу

как стратегический материал для электроники (упругие элементы электронных разъемов, клавиатур кнопочных контактов и др.) и электротехники (высокая твердость и отсутствие искрообразования при ударе). Стремительное развитие электроники, средств связи, автомобилестроения, горного дела, нефтяной и газовой промышленности невозможно без применения бериллиевых бронз, что привело к созданию в Казахстане (г. Усть-Каменогорск) предприятия полномасштабного производства изделий в объеме 1000 тонн в год. Первым шагом в организации такого производства стал выпуск медно-бериллиевых лигатур по наиболее экономичной технологии – методом прямого карботермического восстановления оксида бериллия  $\text{Cu} + \text{C} + \text{Be}(\text{OH})_2 = \text{CuBe}[\text{Cu}-4\% \text{Be}]$  – оборудование изготовлено в Германии с участием и по технологии США. Данный метод позволил Казахстану стать монополистом в Европе и России в области производства лигатур по ценам значительно ниже мировых, что привело к полной остановке аналогичного производства в России.

Внедрение в авиационную промышленность сплавов типа АБМ (20–70% Ве) не нашло широкого применения из-за особой вредности производства и ремонта изделий из таких сплавов, хотя свойства сплавов достаточно высокие (см. таблицу). Разработанный сплав системы  $\text{Al}-(2-4\%)\text{Be}-\text{Mg}-\text{Li}$ , имеющий в своем составе 2,5% В (обработка сплава разрешена в общих цехах), свойства на уровне:  $d = 2,5 \text{ г/м}^3$ ,  $E = 85 \text{ ГПа}$ ,  $\sigma_{\text{в}} = 460-470 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{0,2} = 315-330 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 9-11\%$  и превосходящий сплав 1441 по жесткости на 7–8%, не доведен до получения паспортных данных.

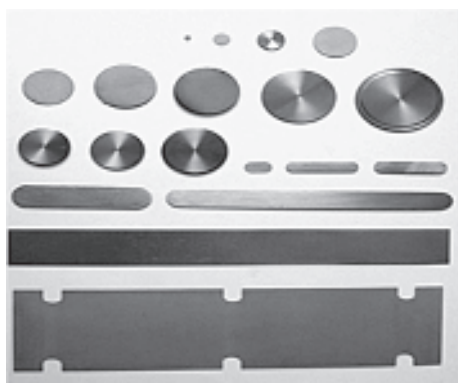
**Сравнительные свойства высокомодульных алюминийбериллиевых сплавов и алюминиевого сплава Д16-Т**

Характеристики сплава	Значения характеристик	Квоты преимуществ*
Плотность $d$ , $\text{г/см}^3$	2,35–2,05	0,85–0,75
Удельный модуль упругости $E/d$ , м (усл. ед.)	$(5,0-10,5) \cdot 10^{-7}$	2,3–4,2
Удельная прочность $\sigma_{\text{в}}/d$ , км (усл. ед.)	20–30	1,2–1,9
Удельная усталостная прочность $\sigma_{-1}/d$ , км (усл. ед.)	7,6–13,1	1,4–2,4
Акустическая выносливость при $\sigma = 34 \text{ МПа}$ , цикл	$4,4 \cdot 10^8$	50
Удельная теплоемкость $c_p$ , кДж (кг · К)	1,13–1,75	1,25–1,9

\* Величина, характеризующая отношение параметра сплава типа АБМ к аналогичному параметру сплава Д16-Т.

В связи с отсутствием развернутого производства бериллия в России в 2000 г. произошла переориентация Воскресенского филиала ФГУП «ВИАМ» на выпуск высокотехнологичной продукции из бериллия, занимающей определенную нишу в ассортименте изделий из него.

Применяемая впервые в массовом производстве эрозионная резка бериллия (вместо фрезеровальных работ) позволила наладить серийный выпуск дисков и пластин толщиной >200 мкм для промышленности, что резко сократило расход бериллия и трудоемкость процесса.



**Рис. 1.** Пластины и диски из бериллия для ЗАО «Светлана-Рентген»

- эрозионной резки бериллия и его сплавов на станках с ЧПУ ЭВС-100 и СВЭИ-2 (размеры вырезаемых деталей  $190 \times 60 \times (\geq 0,1)$  мм и  $\varnothing 80$  мм (толщина  $\geq 0,1$  мм));
- гальваники.

Все технологическое оборудование, задействованное в процессе, было сертифицировано. На все процессы оформлено большое количество технологических рекомендаций и инструкций.

Разработаны директивные технологические процессы пайки рентгеновских бериллиевых окон (4 вида) с монелем, нержавеющей сталью, медью с серебросодержащим и бессеребряным припоем. На бессеребряный припой получен патент.

Пайка таким припоем обеспечивает:

- герметичность паяных окон  $10^{-9}$ – $10^{-10}$  (мбар·л)/с;
- исключает охрупчивание сварных соединений;
- термическую стойкость паяных соединений до  $800^{\circ}\text{C}$ .



**Рис. 2.** Паяные рентгеновские бериллиевые окна с рамой из монеля с защитным покрытием (а) и с рамой из меди для компьютерного томографа, выпускаемого фирмой «Philips Medical Systems DMC GmbH» (б), а также с рамой из нержавеющей стали с защитным покрытием (в)

На рис. 2 представлены паяные бериллиевые окна с рамой из различных материалов. Была разработана и внедрена система защитных покрытий, обеспечивающая выпуск экологически чистого продукта – рентгеновских вакуум-плотных бериллиевых окон. Эта работа была отмечена серебряной (Франция) и бронзовой медалями (Китай) на международных выставках.

В 2008 г. завершился цикл работ по разработке технологии диффузионной сварки разнородных соединений технического спеченного бериллия с монелем, медью и нержавеющей сталью (без подслоя и с промежуточным подслоем) с получением вакуум-плотных соединений ( $\sigma_B \geq 350$  МПа).

Разработки в области соединения бериллия с медным сплавом соответствуют современным достижениям зарубежных фирм «Brush Wellman» (США) и «Sandia National Laboratories» (США), которые используют для получения соединений горячее изостатическое прессование (ГИП) бериллия марки S-65C ( $\sigma_B = 289$  МПа) с медным сплавом системы Cu–Cr–Zr, промежуточные материалы (Al–Be, Ni, Cu) с температурой сварки  $\leq 700^\circ\text{C}$ , снижающие образование хрупких интерметаллидов, и получают свойства сварных соединений на уровне основного металла бериллия. В зоне соединения бериллия с нержавеющей сталью 12X18H10T и монелем использованы известные промежуточные материалы (бериллиевая бронза БрБНТ1,9; БрБ2 и Ni–Cu подслои), что позволило получить прочность сварных соединений на уровне основного металла бериллия. Соединения с помощью диффузионной сварки бериллия с монелем с прочностью сварного соединения  $\sigma_B^{20^\circ} \geq 350$  МПа и вакуумной плотностью, определенной масс-спектрометрическим методом по натеканию гелия  $\mu_{\text{He}} \leq 1,3 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ , получены впервые.

При диффузионной сварке использован эффект разности температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) свариваемых материалов и специального приспособления, что позволило выполнять сварку образцов и конструктивных элементов в печах с высоким вакуумом, снизило окисление свариваемых поверхностей и привело к повышению механических характеристик и вакуумной плотности сварных соединений. Применение защитных покрытий на бериллии обеспечило повышение коррозионной стойкости и экологической безопасности изделий при их эксплуатации.

Рекомендуемое применение разработанных технологий – вакуум-плотные сварные соединения деталей авиационных приборов, теплообменников и агрегатов, дефектоскопических, научных и медицинских приборов – позволяет заменить пайку серебросодержащими припоями, сократить затраты на производство, обеспечивает повышение надежности изделий, конкурентоспособности высокотехнологичной продукции (приборов), которая может экспортироваться.

С 2009 г. в Воскресенском филиале начата разработка технологии изготовления радиационно-прозрачной бериллиевой фольги толщиной 10–150 мкм повышенной чистоты и технологии изготовления вакуум-плотных окон из бериллия с защитным покрытием. В работе было использовано несколько передовых научных идей, благодаря которым при прокатке заготовок из бериллия получены и серийно выпускаются опытные партии вакуум-плотных фольг толщиной от 10 до 100 мкм, диаметром 3–40 мм. По разработанной технологии получены вакуум-плотные бериллиевые фольги, реализация которых возможна по приемлемым ценам.

Технологические параметры таких фольг (монополист фирма «Brush Wellman» в США) являются коммерческой тайной, приводятся лишь характеристики товарной продукции. Полученные вакуум-плотные фольги с защитным покрытием стоят намного меньше (квадрат  $25 \times 25$  мм толщиной 25 мкм стоит ~1000 долларов – лаборатория в Кембридже), чем их импортные аналоги.



**Рис. 3.** Рентгеновские вакуум-плотные фольги разного диаметра с защитным покрытием и без него



**Рис. 4.** Бериллиевые детали с нанесенным комплексным покрытием ВЭС-5П (пассивная пленка в сочетании с силикатной эмалью)

но несколько договоров с предприятиями атомной промышленности, получено два патента.

В перспективе планируется приобретение современного прокатного оборудования, печей (вакуумных и термических) и обрабатывающего центра, которые позволят Воскресенскому филиалу ФГУП «ВИАМ» выйти на передовые позиции по выпуску вакуум-плотных бериллиевых фольг толщиной <math><150\text{ мкм}</math>, пластин, дисков, рентгеновских паяных окон с защитным покрытием и изделий из бериллия.

*В.В. АНТИПОВ, О.Г. СЕНАТОРОВА, Н.Ф. ЛУКИНА,  
В.В. СИДЕЛЬНИКОВ, В.В. ШЕСТОВ*

### **СЛОИСТЫЕ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

СИАЛ (стеклопластик и алюминий) – перспективный конструкционный слоистый гибридный материал, состоящий из тонких (0,3–0,5 мм) листов алюминиевых конструкционных сплавов (Al–Li сплава пониженной плотности 1441, дуралюминов 1163, Д16ч., высокопрочных сплавов В95п.ч., В95о.ч.) и прослойки пластика (0,2–0,5 мм) на основе клеевых препрегов, армированных высокопрочными стеклонеполните-