

УДК 669.35

А.В. Тебякин¹, А.Н. Фоканов¹, В.Ф. Подуражная¹**МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МЕДНЫЕ СПЛАВЫ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-5-5

Описан опыт работы в ВИАМ с медно-бериллиевыми сплавами – от изготовления медно-бериллиевых лигатур до получения бериллиевых бронз специального назначения.

Разработан новый состав бериллиевой бронзы на основе системы Cu–Be–Ni и технология изготовления прессованных прутков с повышенным сочетанием прочностных характеристик и физических свойств с целью повышения эксплуатационного ресурса изготавливаемых из нее деталей.

Проведенные исследования показали, что высокий предел прочности (1140–1210 МПа) и твердость 42 HRC, которые прутки из бериллиевой бронзы приобретают после термической обработки, позволят повысить износостойкость изделий. Высокий уровень теплопроводности (144 Вт/(м·К)) обеспечит лучший отвод тепла от пар трения, тем самым исключая перегрев деталей и повышая их ресурс.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8.6. «Элинварные, износостойкие сплавы и высокопрочные бериллийсодержащие стали для приборов и агрегатов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: медь, бериллий, бронза, сплав, закалка, старение, прочность, твердость, теплопроводность.

The article introduces VIAM experience of work with copper-beryllium alloys: from production of copper-beryllium ligatures to obtaining beryllium bronze for special purposes.

New Cu–Be–Ni-based composition of beryllium bronze as well as the technology of producing extruded bars with improved combination of strength and physical properties to increase service life of produced products has been developed.

The research shows that the high resistance to rupture (1140–1210 MPa) and hardness index 42 HRC that beryllium bronze bars receive after heat treatment allow increasing durability of products. The high heat conductivity (144 W/(m·K)) provides better heat removal from friction couple thereby avoiding overheat of the products as well as increasing their resource.

The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 8.6. «Elinvar, wear-resistant alloys and high-strength beryllium-bearing steels for devices and units» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: copper, beryllium, bronze, alloy, hardening, ageing, strength, hardness, thermal conductivity.

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

Медные сплавы различают по следующим видам: латуни, бронзы, медно-никелевые сплавы, специальные медные сплавы; они подразделяются на деформируемые и литейные, а также термически упрочняемые и термически неупрочняемые.

Латуни – сплавы меди, в которых главным легирующим элементом является цинк.

Бронзами называют сплавы меди с оловом, алюминием, кремнием, бериллием и другими элементами. В настоящее время бронзами называют все сплавы меди кроме латуней и медно-никелевых сплавов. По основным легирующим элементам их подразделяют на оловянные, алюминиевые, бериллиевые, свинцовые, кремнистые и т. д. [2].

Полуфабрикаты из деформированных медно-бериллиевых сплавов в основном применяют для изготовления упругих элементов и пружин. Высокие сопротивление усталости, прочность, упругость, электропроводность и коррозионная стойкость, хорошая обрабатываемость резанием обеспечивают бериллиевым бронзам ряд неоспоримых преимуществ перед сталями. Упругие элементы (мембраны, сильфоны и т. п.) и пружины используют в электротехническом оборудовании, линиях электропередач, контрольно-измерительных приборах, часах. Сплавы нашли применение также для изготовления немагнитных подшипников, гироскопов, неискрящего инструмента. Изделия из этих сплавов могут эксплуатироваться в условиях Арктики и Антарктики, в тропиках, в морской воде [3, 4].

Давно известны и широко применяются высоколегированные бериллиевые бронзы с содержанием бериллия ~2%, такие как [5]:

- сплавы марок БрБ2 и БрБНТ1,9 – стандарты России;
- сплавы марок 25 (C17200) и 165 (C17000) – зарубежные спецификации.

Области их применения обусловлены уникальным набором свойств – высокой прочностью, пластичностью и упругостью, коррозионной устойчивостью, высокой прочностью при криогенных температурах и циклических нагрузках, а также ценными технологическими свойствами – хорошо штампуются, паяются, свариваются и т. д.

В разные годы в ВИАМ уже велись разработки различных бериллийсодержащих медных сплавов. Так, разработан жаропрочный высокотеплопроводный сплав марки ВБр-1 (системы Cu–Co–Ni–Be–Ti), предназначенный для деталей, от которых требуется высокая теплопрочность в сочетании с высокой теплопроводностью или электропроводностью, – например, ламели коллекторов, для работы при температурах до 400°C и для других деталей специального назначения, подвергающихся кратковременному нагреву до 600°C [6]. Выпускали проволоку из бериллиевой бронзы марки БрБ2, которая в основном используется для изготовления электронных устройств, для сварки и пайки.

В ВЭТЦ ВИАМ также разработан припой на основе меди с добавкой бериллия, позволяющий заменить серебряные припои в конструкциях, в которых используется соединение бериллия с конструкционными сплавами – нержавеющей сталью и монелем, применяемых в качестве оправ при изготовлении рентгеновских окон и других контрольно-измерительных приборов [7, 8].

По механической прочности, износостойкости и коррозионной устойчивости бериллиевую бронзу считают одним из лучших материалов для опор скольжения, эксплуатируемых в морской воде (насосное, буровое и прочее оборудование при разработке и эксплуатации шельфовых месторождений), в содержащих абразивные и коррозионные вещества пульпах (материковые нефтегазовые и другие месторождения), а также при изготовлении опор и втулок шасси самолетов и другого высоконадежного оборудования и машин.

В настоящее время предприятия отрасли для изготовления деталей опор скольжения и ответственных узлов трения используют отечественную бериллиевую бронзу марки БрБ2, но для повышения ресурса узлов и агрегатов авиационной техники требуются сочетания более высоких прочностных характеристик и физических свойств бронз.

Материалы и методы

В данной статье рассмотрены медные сплавы, содержащие в качестве легирующего элемента бериллий от 0,4–0,7 до 2–2,5%, – так называемые бериллиевые бронзы. Сплавы с пониженным содержанием бериллия используют как высокоэлектропроводные, а с большей концентрацией – как высокопрочные с повышенной электропроводностью [9].

Бериллиевые бронзы относятся к классу так называемых дисперсионно-упрочняемых сплавов, особенностью которых является зависимость растворимости легирующих компонентов от температуры, что позволяет управлять свойствами бронз как при производстве полуфабрикатов, так и при изготовлении изделий [10].

Задача заключалась в разработке нового состава сплава, а также технологии изготовления прессованных прутков из бериллиевой бронзы с повышенным сочетанием прочностных характеристик и физических свойств для изготовления деталей опор скольжения и ответственных узлов трения с целью повышения их эксплуатационного ресурса.

Увеличение содержания бериллия в меди сопровождается повышением твердости и прочности [11]. Оптимальным сочетанием этих свойств обладают сплавы с 2–2,5% бериллия. При содержании бериллия >3% резко снижаются ударная вязкость и пластичность. Бериллий, помимо упрочнения твердого раствора, способствует модифицированию слитков, заметно измельчая зерно. Добиться улучшения свойств этих сплавов можно путем микролегирования. При применении этого метода повышается плотность распределения основного легирующего компонента за счет роста дисперсности, а также равномерность распределения в пределах объема кристаллитов и их границ. Важным достоинством метода микролегирования является то, что при его использовании практически не изменяется технология получения сплавов – от выплавки и пластической деформации до изготовления изделий и их обработки [9].

По результатам обзора научно-технической литературы и ранее проведенных в ВИАМ патентных исследований выбрана базовая композиция бериллиевой бронзы системы Cu–Be–Ni–La и основные направления ее легирования.

Никель, бериллий и другие легирующие элементы, вводимые для повышения механических свойств, снижают электропроводность и теплопроводность сплава системы Cu–Be–Ni. Известно, что небольшие добавки лантана в виде миш-металла увеличивают пластичность и деформируемость сплавов, способствуют увеличению теплопроводности и электропроводности. Во всех случаях эта добавка – сильный раскислитель и превосходный дегазатор. Таким образом, наличие лантана в сплаве системы Cu–Be–Ni уже в литом состоянии будет способствовать получению более однородной структуры.

Для изготовления бериллиевых бронз выплавляли медно-бериллиевую лигатуру (рис. 1), а также применяли медные лигатуры с другими легирующими элементами, составляющими композиции сплава. Целесообразность применения лигатур обусловлена необходимостью надежного воспроизведения заданного состава сплава от плавки к плавке независимо от снижения температуры перегрева расплава, что означает сокращение энергетических затрат, уменьшение цикла плавки, а следовательно, увеличение производительности процесса и снижение угара легирующих элементов.

Обычно сплавы с небольшим содержанием бериллия получают в открытых индукционных печах, но, несмотря на относительно невысокое содержание бериллия, его оксиды интенсивно выделяются в воздух из-за высокой температуры плавления [12]. В Воскресенском экспериментально-технологическом Центре по специальным материалам (ВЭТЦ ВИАМ) – филиале ФГУП «ВИАМ» – все сплавы выплавляют в вакуумно-индукционных печах, что способствует защите рабочих от вредного воздействия

бериллия, а также позволяет получать более качественные сплавы (без насыщения газами) и снижать потери металла при плавке [13].



Рис. 1. Медно-бериллиевая лигатура

По произведенному расчету шихты выплавлены пять экспериментальных композиций бериллиевой бронзы. Исследование их химического состава проводили с помощью метода атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) в сочетании с микроволновой подготовкой, проведены также испытания на определение механических и теплофизических свойств [14].

Из пяти экспериментальных составов в результате проведенных исследований по совокупности свойств (прочности, твердости и теплопроводности) выбран опытный состав сплава системы Cu–Be–Ni–Co–La (рис. 2).



Рис. 2. Обточенный слиток из бериллиевой бронзы системы Cu–Be–Ni–Co–La

Из диаграммы состояния системы Cu–Be известно, что в структуре бериллиевых бронз типа БрБ2 присутствует γ -фаза, которая отрицательно влияет на их деформационную способность [15]. Для определения режима термообработки (температуры закалки) перед проведением горячей деформации (прессования) с целью устранения данной фазы, методом дифференциального термического анализа (ДТА) определена температура ее растворения. Температуры фазовых превращений определяли в диапазоне температур от 20 до 900°C при нагреве со скоростью 20°C/мин в среде гелия методом ДТА (табл. 1).

Таблица 1

**Температуры фазовых превращений выплавленных композиций,
определенные методом ДТА**

Температура, характеризующая изменение фазового состояния	Значение температуры, °С
Температура превращения $\gamma \rightarrow \beta$	636–639
Температура солидус	827–856
Температура плавления эвтектики	859–863

Кроме того, для выбора режима прессования заготовок из бериллиевой бронзы системы Cu–Be–Ni–Co–La определены температуры солидус и плавления эвтектик с целью установления температуры, при которой обеспечивается оптимальная деформационная способность материала в твердом состоянии.

Растворение γ -фазы происходит при температуре 636–639°C, допускающей проведение рекристаллизационного отжига по режиму, применяемому для бериллиевых бронз типа БрБ2 (при температуре 600–650°C), в процессе которого окисление поверхности заготовки и рост зерна ниже, чем при закалке. Однако бронзы, обработанные по данному режиму, характеризуются более низкой пластичностью по сравнению с бронзами, подвергнутыми закалке при температуре 770–790°C, вследствие получения двухфазной структуры. Поэтому для гарантированного обеспечения однофазной структуры выбран следующий режим термообработки бериллиевой бронзы системы Cu–Be–Ni–Co–La: закалка при температуре 790±10°C с охлаждением в воде.

Прессование проводили на вертикальном гидравлическом прессе с усилием 600 тс. Нагрев пресс-инструмента осуществляли в печи электросопротивления. Отработку деформации (прессования) заготовок $\varnothing 68$ мм проводили в матрицу $\varnothing 34$ мм со степенью деформации 50%. После деформации проведена закалка (охлаждение в воде) и старение полученных прутков в печи электросопротивления.



Рис. 3. Прессованный пруток из бериллиевой бронзы системы Cu–Be–Ni–Co–La

Из термообработанных прутков (рис. 3) бериллиевой бронзы изготовлены образцы для испытаний и исследованы прочностные характеристики при температуре испытания 20°C.

Результаты

Исследование механических свойств (предел прочности и модуль упругости при растяжении, твердость, ударная вязкость, износостойкость) показало, что образцы прессованных прутков из бериллиевой бронзы опытного состава системы Cu–Be–Ni–Co–La после термической обработки имеют следующий уровень свойств:

Предел прочности, МПа	1140–1210
Модуль упругости, ГПа	129
Твердость	42 HRC
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	144.

Установлено, что температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) прутков из бериллиевой бронзы опытного состава составляет $16,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Полученное

значение близко к значению ТКЛР для инструментальных сталей, поэтому это будет способствовать их надежной работе в одном узле.

Анализ дифрактограмм показал, что в сплаве наблюдается твердый раствор на основе Cu, γ -фаза на основе интерметаллида CuBe+фаза BeNi и следы фазы $Co_{13}La$. Все фазы имеют кубическую структуру.

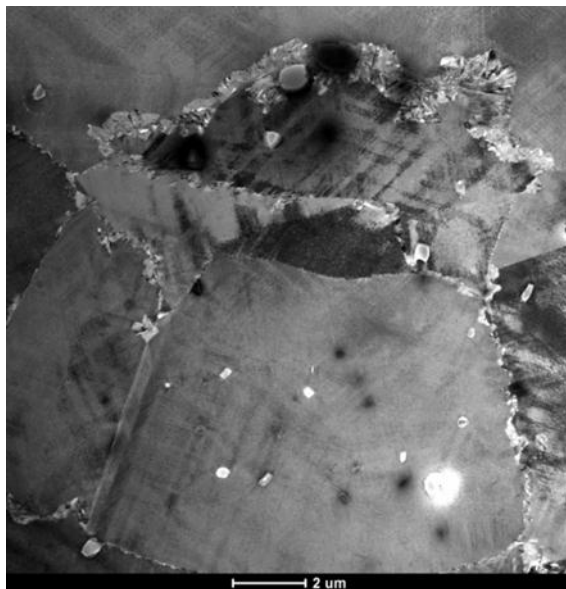


Рис. 4. Светлопольное изображение участка образца с преимущественно рекристаллизованной структурой

Исследование методами просвечивающей электронной микроскопии показало, что образцы пресованных прутков из бериллиевой бронзы имеют структуру преимущественно рекристаллизованную с размером зерна от 5 до 15 мкм. Рекристаллизованные, равноосные зерна разделены высокоугловыми границами, вокруг которых сохраняются области нерекристаллизованного объема. Вблизи границ наблюдаются крупные включения размером до 1 мкм (рис. 4).

Обсуждение и заключения

Значения свойств прутков из бериллиевой бронзы системы Cu–Be–Ni–Co–La в сравнении с аналогами представлены в табл. 2.

Таблица 2

Уровень свойств прутков из бериллиевой бронзы системы Cu–Be–Ni–Co–La в сравнении с аналогами

Свойства	Средние значения свойств	
	бериллиевая бронза системы Cu–Be–Ni–Co–La	БрБ2 (Россия)/ С17200 (США)
Предел прочности при растяжении, МПа	1175	1000/1010
Твердость HRC	42	33/36
Износостойкость (коэффициент трения)	0,64	–
Модуль упругости при растяжении, ГПа	129	130/131
Ударная вязкость KCU, кДж/м ²	168	125
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	144	104/105

Более высокие значения предела прочности при растяжении позволят повысить износостойкость опор скольжения и ответственных узлов трения, изготовленных из разработанной бериллиевой бронзы.

Вследствие большой твердости, которую прутки из бериллиевой бронзы приобретают после термической обработки, они обладают высоким сопротивлением износу – коэффициент трения составляет 0,64.

Более высокий уровень теплопроводности обеспечит лучший отвод тепла от пар трения, тем самым исключая перегрев деталей и повышая их ресурс.

В последнее время все более широкое распространение как на мировом, так и на российском рынке, находят также низколегированные бериллиевые бронзы с содержанием бериллия до 0,7%, стоимость изготовления которых, как правило, в 2–3 раза ниже чем высоколегированных, но при этом их свойства остаются на достаточно высоком уровне.

В связи с имеющимися потребностями в сплавах, предназначенных для комплектования радиоэлектронных блоков изделий авиационной техники, которые наряду с высокой твердостью будут сочетать высокую тепло- и электропроводность при повышенных температурах эксплуатации, дальнейшие исследования необходимо направить на разработку состава сплава с малым содержанием дефицитного и дорогостоящего бериллия путем дополнительного легирования и микролегирования другими элементами.

Многообразие всевозможных направлений использования полуфабрикатов из бериллиевых бронз позволяет называть их поистине многофункциональными сплавами благодаря возможности управлять свойствами дисперсионно-твердеющих сплавов при производстве полуфабрикатов, а также при изготовлении изделий широкого назначения – от электронного и приборного оборудования до высоконагруженных и силовых конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Машиностроение: энциклопедия. М.: Машиностроение, 2001. Т. II-3. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы / под ред. И.Н. Фридляндера, Е.Н. Каблова. 880 с.
3. Папилов И.И. Бериллий в сплавах: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 147.
4. Каськов В.С. Бериллий и материалы на его основе // Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. С. 222–226.
5. Авиационные материалы и технологии: науч.-технич. сб. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2000. Вып.: Бериллий – конструкционный материал XXI века. 136 с.
6. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. С. 173–180.
7. Фоканов А.Н., Каськов В.С., Подуражная В.Ф. Пайка бериллия со сплавом монель при изготовлении рентгеновских окон // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №8. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-2-2.
8. Припой на основе меди: пат. 2279957 Рос. Федерация; заявл. 21.12.04; опубл. 20.07.06. Бюл. №20.
9. Пастухова Ж.П., Рахштадт А.Г. Пружинные сплавы цветных металлов. 2-е изд. М.: Металлургия, 1983. С. 15.
10. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. С. 7–17.

11. Каськов В.С., Жирнов А.Д. Изготовление конструкционных изделий из бериллия в ВЭТЦ ВИАМ и их применение в различных отраслях науки и техники // *Авиационные материалы и технологии: науч.-технич. сб.* М.: ВИАМ, 2000. Вып. Бериллий – конструкционный материал XXI века. С. 19–22.
12. Фридляндер И.Н., Яценко К.П., Терентьева Т.Е., Хелковский-Сергеев Н.А. Бериллий – материал современной техники. М.: *Металлургия*, 1992. С. 115.
13. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №8. С. 157–167.
14. Дворецков Р.М., Волкова О.С., Радзиковская В.Н., Бурова В.Н. Определение бериллия в современных авиационных материалах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №4. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-5-5.
15. Берман С.И. Меднобериллиевые сплавы. М.: *Металлургия*, 1966. С. 10.