



УДК 669.725

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-2-2

**ПАЙКА БЕРИЛЛИЯ СО СПЛАВОМ МОНЕЛЬ  
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ОКОН**

А.Н. Фоканов

В.С. Каськов

*кандидат технических наук*

В.Ф. Подуражная

**Август 2014**

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. Фоканов<sup>1</sup>, В.С. Каськов<sup>1</sup>, В.Ф. Подуражная<sup>1</sup>*

## **ПАЙКА БЕРИЛЛИЯ СО СПЛАВОМ МОНЕЛЬ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ОКОН**

*Приведены результаты исследований по получению паяных соединений разнородных металлов – бериллия и сплава монель серебряными припоями и разработанным в ВИАМ опытным серебросоменяющим припоем на основе меди. Приведены режимы вакуумной пайки, исследована микроструктура и вакуумная плотность паяных окон. Проведенные исследования показали возможность получения вакуум-плотных паяных соединений, обеспечивающих стойкость к воздействию термических циклов, имитирующих сварку бериллиевых окон с корпусом рентгеновской трубки, а также эксплуатационные нагревы до 500°C – при пайке припоем 72Ag–28Cu (аналог – Cusil), до 650°C – при пайке припоем 92,5Ag–7,5Cu (аналог – Sterling Silver) и опытным серебросоменяющим припоем Cu–Be–Ni на основе меди. Увеличение стойкости к воздействию термических циклов является следствием увеличения содержания серебра и температуры плавления припоя 92,5Ag–7,5Cu, повышения упругости и теплоемкости паяного шва за счет диффузии бериллия в серебросодержащие припои и наличия бериллия в припое на основе меди. Результаты исследований использованы при изготовлении опытных партий рентгеновских окон.*

**Ключевые слова:** бериллий, монель, пайка, припой, вакуумная плотность, микроструктура.

*A.N. Fokanov, V.S. Kaskov, V.F. Podurazhnaya*

## **BERYLLIUM BRAZING WITH MONEL ALLOY IN PRODUCTION X-RAY WINDOWS**

*The outcome of researches in the field of the methods of brazed joints of dissimilar metals – beryllium and monel silver-based alloy and advanced development model of silver substitution copper-based alloy, developed by Federal State Unitary Enterprise VIAM is the subject of the article. As a matter of course vacuum brazing data was cited as well as vacuum tightness of brazed windows. The researches suggested the possibility of obtaining vacuum-tight brazed joints which provide resistance of thermal*

*cycles simulating welding of beryllium windows into body of pipe and when in operating heating process up to 500°C while brazing alloy 72Ag–28Cu «Cusil», up to 650°C while brazing alloy 92,5Ag–7,5Cu «Sterling Silver» and advanced development model of silver substitution copper-based brazing alloy Cu–Be–Ni. The cause of increasing resistance to the effects of thermal cycles is the result of silver increase and alloy melting point 92,5Ag–7,5Cu, increase of elasticity and heat-absorptive capacity of brazing seam through beryllium diffusion into silver containing alloy and including beryllium into copper-based alloy. The results of the researches are used into preproduction series of beryllium x-ray windows.*

**Keywords:** *beryllium, monel, brazing, filler metal, vacuum tightness, microstructure.*

---

<sup>1</sup>Воскресенский экспериментально-технологический центр ВИАМ по специальным материалам [Voskresensk experimental and technological center on special materials] E-mail: vetc.viam.ru

## **Введение**

Высокая радиационная прозрачность бериллия (в 17 раз выше, чем у алюминия) используется в бериллиевых окнах, обеспечивающих прохождение излучения с незначительным поглощением.

Для научного и медицинского приборостроения при производстве паяных рентгеновских окон из бериллия в качестве рамы (оправы) окна используется сплав монель (монель-металл) – никель-медный сплав, легированный железом, марганцем и другими элементами. Сплав монель обладает высокой коррозионной стойкостью на воздухе, в воде, во многих кислотах и концентрированных щелочах в сочетании с высокой механической прочностью; жаростоек до 500°C. В России используется сплав монель марки НМжМц28-2,5-1,5, за рубежом – сплав Monel-400 с пониженным содержанием примеси углерода ( $C \leq 0,05\%$ ).

Исследования по пайке бериллия со сплавом монель серебряными припоями проводили в США. Для пайки применяли припой марки ВAg-8 (72Ag–28Cu) с нанесением на бериллий в области пайки порошка гидрида титана или напыление титана для улучшения смачивания бериллия. При металлографическом анализе на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) в области спаев отмечено формирование хрупкой Cu–Be фазы при комбинации высокой температуры и содержащего медь жидкого металла. Чистое серебро или припой с меньшим содержанием меди марки ВAg-17 (Ag–30Cu–10Sn) рекомендовались в качестве альтернативы для пайки указанных разнородных соединений [1].

Серебряные припои с содержанием 72–92% Ag обычно применяют при пайке разнородных соединений металлов с бериллием, работающих при 20°C. Конструкционный бериллий, получаемый методами порошковой металлургии, содержит значительное количество оксида BeO (до 2%), затрудняющего его смачивание припоями. Сплав монель охрупчивается в контакте с жидкими серебрясодержащими припоями. Пайку сплава монель рекомендуется проводить в отожженном состоянии при отсутствии внутренних и внешних растягивающих напряжений. Для пайки изделий из бериллия, работающих при высоких температурах, припоями служат сплавы бериллия с серебром, титаном или цирконием [2].

В данной статье приведены результаты исследований по пайке бериллия с монелем серебряными припоями и разработанным в ВИАМ опытным серебрязамещающим припоем на основе меди [3]. Исследования выполнены совместно с фирмой Philips Medical Systems (далее – фирма PMS) GmbH DMC (Германия) и ЗАО «Светлана–Рентген» (Россия, г. Санкт-Петербург).

### **Материалы и методы**

В соответствии с техническими требованиями заказчиков, узел содержащий бериллиевый диск, предназначается для работы в рентгеновской трубке для выхода рентгеновского излучения. Способ соединения бериллиевого диска с ободкой (оправой) – пайка твердым припоем. Узел должен быть вакуум-плотным (герметичным). Допустимый поток гелия при испытании на гелиевом масс-спектрометрическом течеискателе через неплотности паяного узла должен быть не более  $1 \cdot 10^{-10}$  Па·м<sup>3</sup>/с. Узел должен быть термостойким и обеспечивать вакуумную плотность после нагрева, имитирующего эксплуатационный, в зависимости от типа трубки и толщины бериллиевого диска:

- 1 цикл – нагрев до 500°C, выдержка в течение 3 ч, охлаждение до 20°C;
- 3 цикла – нагрев до 600°C, выдержка в течение 1 ч, охлаждение до 20°C;
- 1 цикл – нагрев до 650°C, выдержка в течение 0,5 ч, охлаждение до 20°C.

При изготовлении рамки (оправы) рентгеновских окон для ЗАО «Светлана-Рентген» использовали сплав монель марки НМжМц28-2,5-1,5 в виде прутка с химическим составом по ГОСТ 492–73; для фирмы PMS – рамки в виде штамповок из листа сплава Monel-400 толщиной 0,5 мм. Химический состав сплава монель приведен в табл. 1 и 2.

Таблица 1

**Химический состав сплава монель марки НМЖМц28-2,5-1,5%**

Содержание элементов, % (по массе)						
Fe	Mn	Cu	Ni+Co	Mg	Si	Pb
2,0–3,0	1,20–1,81	27,0–29,0	Остальное	0,10	0,05	0,002
S	C	P	Bi	As	Sb	Сумма примесей
не более						
0,01	0,20	0,005	0,002	0,010	0,002	0,60

Таблица 2

**Химический состав сплава Monel-400**

Содержание элементов, % (по массе)								
Fe	Ni+Co	Cu	Mn	Al	C	S	Si	P
2,5	63*	28,0–34,0	1,25	0,03	0,05**	0,024**	0,2	0,006

\* Минимальное значение.

\*\* Максимальное значение.

Бериллиевые диски нарезают электроэрозионной резкой из прутка с припуском на механическую обработку и травление или вырезают из бериллиевой фольги. Бериллиевая фольга изготавливалась по разработанной в ВИАМ технологии теплой прокатки в контейнерах (чехлах) из нержавеющей стали с применением защитного покрытия на бериллии [4–14]. Технические характеристики бериллиевых дисков (марка бериллия, диаметр, толщина) приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Технические характеристики бериллиевых дисков**

Вид полуфабриката	Диаметр	Толщина
	мм	
Прутки стандартной чистоты (Be: 97,7–98,2%, BeO≤1,3%, Fe≤0,18%) марок ТГП и ТВ	20	1,0
Бериллиевая фольга из металла повышенной чистоты (Be≥99%, BeO≤0,9%, Fe≤0,1%)		0,1

Подготовку под пайку сплава монель проводили травлением в смеси кислот (1 часть HNO<sub>3</sub>+3 части HCl) при температуре 20°C.

Поверхность припоя готовили травлением в течение 3–5 мин при 20°C в растворе: 16,6 мл HNO<sub>3</sub>+16,6 мл HCl+100 мл H<sub>2</sub>O. Химическую подготовку бериллия под пайку проводили после вакуумного отжига для снятия остаточных напряжений. Поверхность бериллиевых дисков толщиной 1 мм готовили травлением в растворе серной кислоты и химической полировкой, поверхность бериллиевой фольги готовили травлением в растворе азотной кислоты.

Диски из бериллиевой фольги проходили проверку на вакуумную плотность после механической обработки по диаметру и перед пайкой.

Пайку проводили в вакуумной печи СНВЭ 1.3.1/16 припоями в виде фольги и проволоки с составами, указанными в табл. 4. Для улучшения смачивания бериллия дополнительных средств не применяли.

Таблица 4

**Припой для пайки бериллия с монелем**

Состав припоя	Наименование или обозначение	Вид припоя
92,5Ag–7,5Cu	ПСр92, Sterling Silver	Проволока $\varnothing$ 1 мм
72Ag–28Cu	ПСр72, Cusil	Фольга толщиной 0,06 мм
Cu–Be–Ni	Сереброзаменяющий	Проволока $\varnothing$ 0,75 мм

Режимы пайки (температура, выдержка, вакуум), выбранные для оптимального формирования паяного шва, приведены в табл. 5.

Таблица 5

**Режимы пайки бериллия с монелем**

Состав припоя	Режим пайки		Вакуум, Па
	температура, °C	продолжительность выдержки, мин	
92,5Ag–7,5Cu	898–900	3	$(1,33–1,06) \cdot 10^{-3}$
72Ag–28Cu	803–805		
Cu–Be–Ni	893–895		

Паяные окна, сформированные по оптимальному режиму, проверяли на вакуумную плотность и исследовали их макро- и микроструктуры. Вакуумную плотность паяных окон, определяемую по натеканию гелия, исследовали с помощью масс-спектрометрического гелиевого течеискателя ADIXEN/ALCATEL ASM-142 после пайки и воздействия термических циклов. Макро- и микроструктуру паяных соединений исследовали на оптическом микроскопе и сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) совместно с фирмой PMS.

**Результаты**

Внешний вид паяных окон, макро- и микроструктуры паяных соединений показаны на рис. 1–4. Паяные швы, выполненные серебросодержащим припоем, имели светлый серебристый цвет, а швы, выполненные опытным сереброзаменяющим припоем, – желто-золотистый, характерный для бериллиевой бронзы.

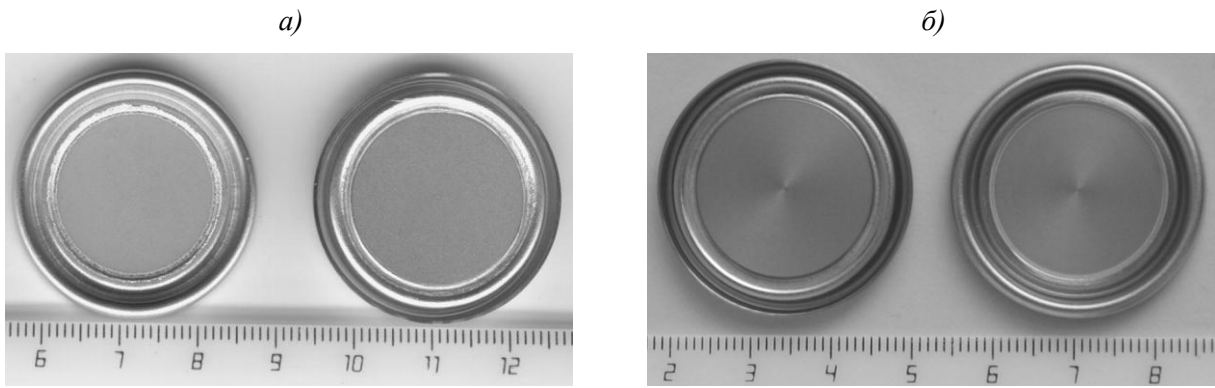


Рисунок 1. Внешний вид паяных бериллиевых окон, выполненных с помощью серебрясодержащего припоя 92,5Ag–7,5Cu (а) и опытного сереброзаменяющего припоя Cu–Be–Ni (б)

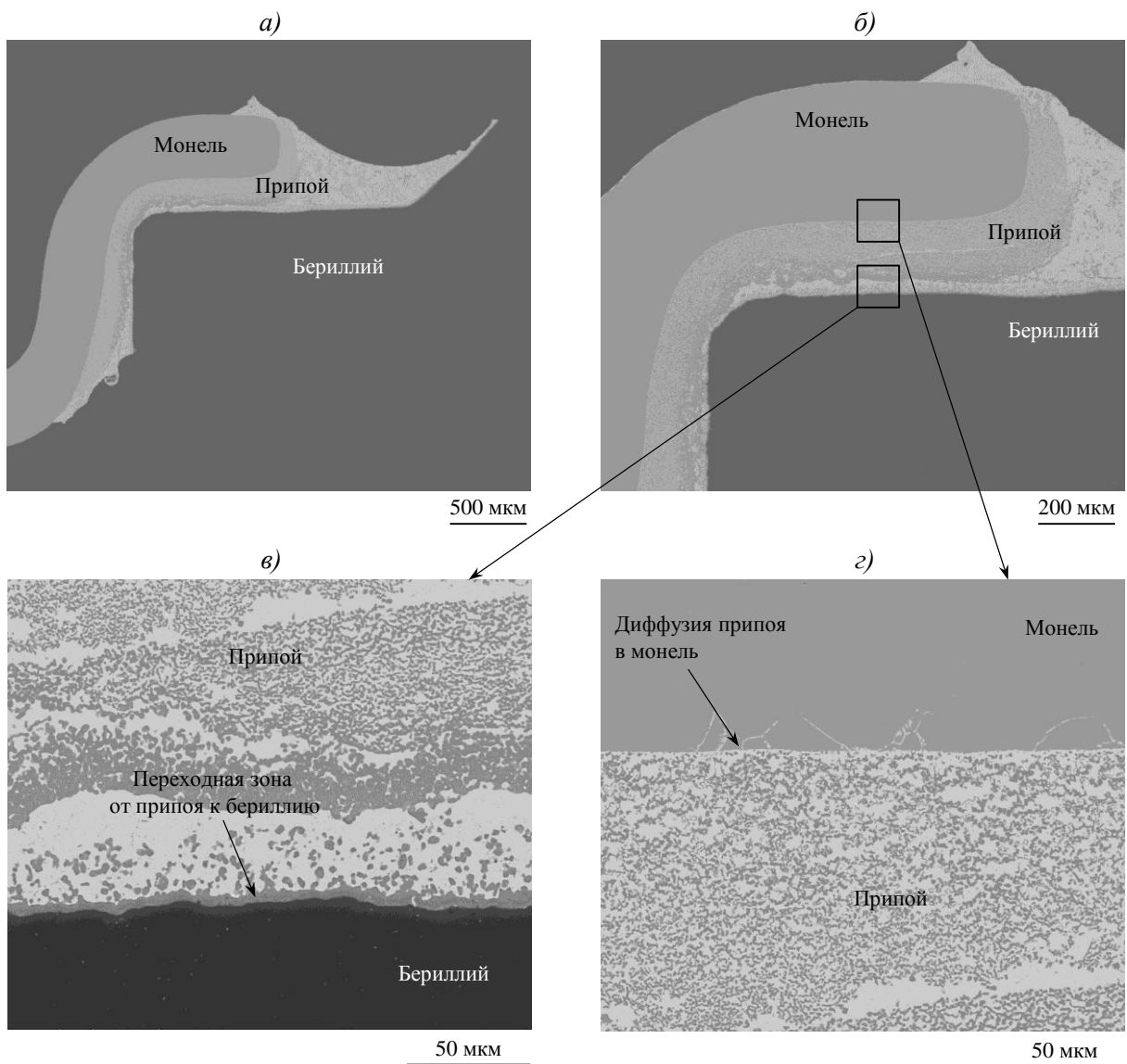


Рисунок 2. Микроструктура паяного соединения бериллия с монелем припоем 92,5Ag–7,5Cu

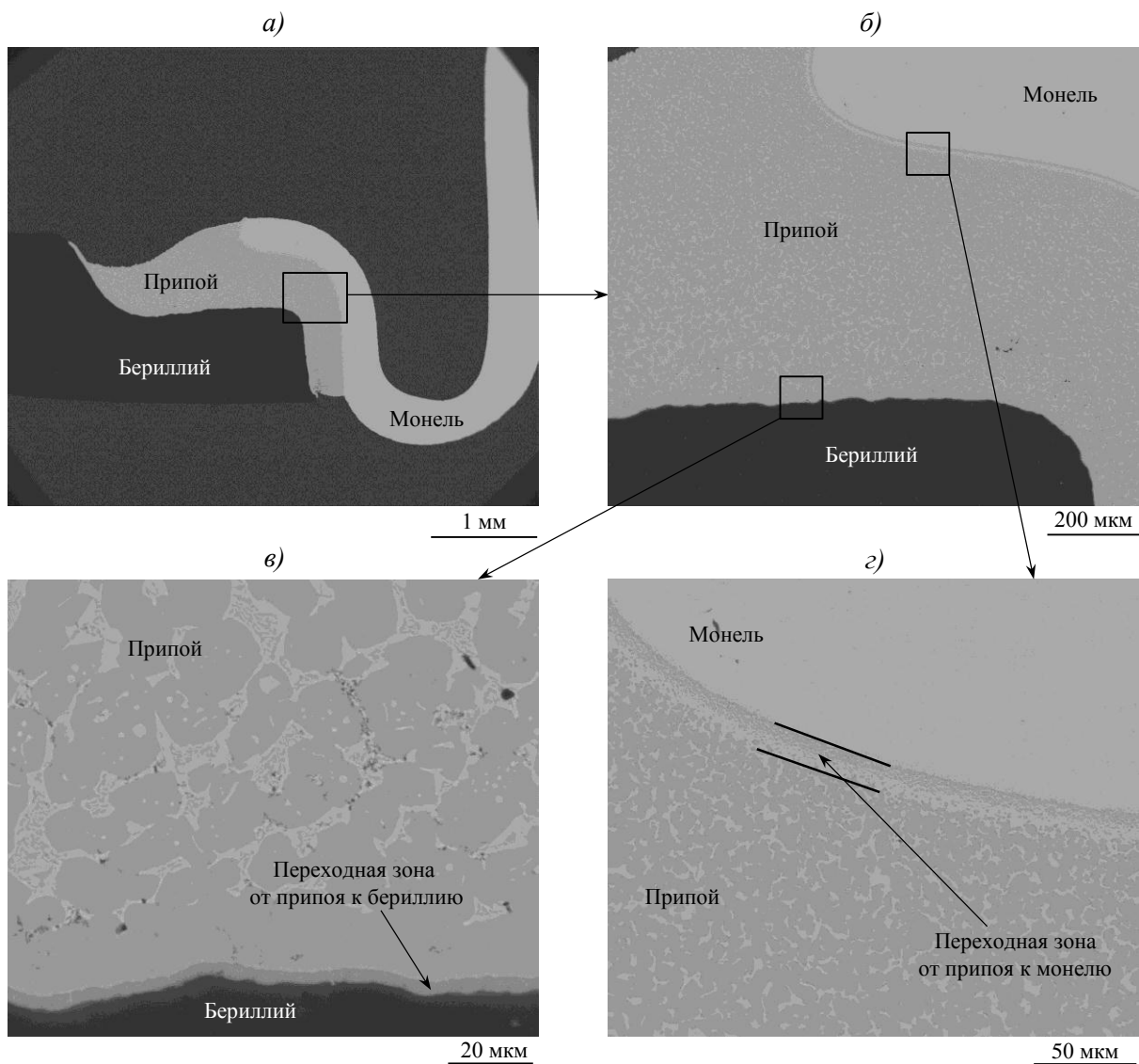


Рисунок 3. Микроструктура паяного соединения бериллия с моелем опытным сереброзаменяющим припоем Cu-Be-Ni

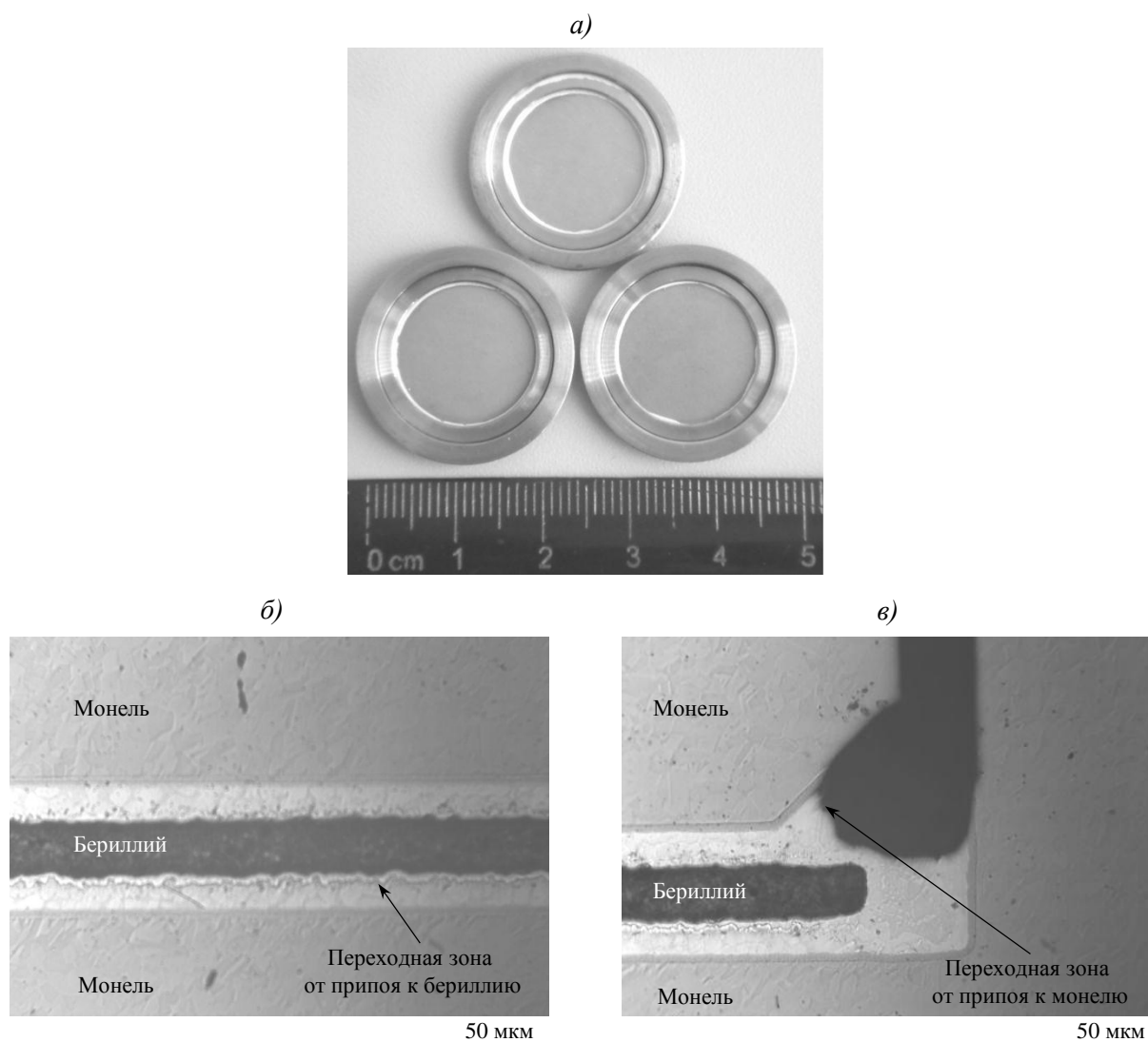


Рисунок 4. Окна из бериллиевой фольги (а) толщиной 0,1 мм, паяные припоем ПСр72, и микроструктуры соединения (б, в)

Результаты испытаний вакуумной плотности бериллиевых окон после пайки и нагревов приведены в табл. 6.

Таблица 6

Вакуумная плотность бериллиевых окон после пайки и нагревов				
Состав припоя	Величина сигнала по гелию $\mu_{\text{He}} \cdot 10^{11}$ , Па·м <sup>3</sup> /с			
	после пайки	после нагрева по режиму		
		500°С, 3 ч (1 цикл)	600°С, 1 ч (3 цикла)	650°С, 0,5 ч (1 цикл)
92,5Ag–7,5Cu	3,0±0,7	–	–	3,0±0,7
72Ag–28Cu	1,8±0,6	2,0±0,7	2,2±0,8	–
Cu–Be–Ni	3,0±0,7	–	–	3,2±0,7

В переходной зоне между бериллием и припоем наблюдается узкая область шириной 5–7 мкм (см. рис. 2, в), состоящая из Be–Cu-фазы [15, 16]. В области припоя

отмечается наличие двух различающихся фаз: светлой – на основе серебра и более темной – на основе меди. В переходной зоне между припоем и монелем видна граница, за пределами которой наблюдается диффузия серебра в монель по границам зерен (см. рис. 2, з).

В микроструктуре соединений бериллиевых дисков со сплавом монель, выполненных опытным серебросменяющим припоем на основе меди (Cu–Be–Ni), в области спая отмечалось наличие переходной зоны от бериллия к припою шириной 6–8 мкм; области припоя, состоящей из различающихся фаз; переходной зоны от припоя к монелю шириной до 20 мкм (см. рис. 3). Проведенный EDX локальный микроанализ в области припоя показал, что он состоит главным образом из меди (от 80 до 90%) и никеля (от 10 до 20%), содержание Be в припое ~1%, Fe и Mn ≤1% (каждого), присутствуют локальные выделения Cr. Отмечено различающееся относительное содержание Cu:Ni. Наиболее высокое отношение Cu:Ni (95:5) отмечалось вблизи границы с бериллием и 40:60 – около границы с монелем.

Паяные соединения дисков, изготовленных из бериллиевой фольги повышенной чистоты толщиной 0,1 мм, выполненные припоем ПСр72, и микроструктуры соединения показаны на рис. 4. В структуре также отмечается наличие переходных зон между бериллием и монелем, бериллием и припоем.

### **Обсуждение и заключения**

Проведенные исследования по пайке разнородных соединений бериллия с монелем показали возможность получения вакуум-плотных паяных соединений, обеспечивающих стойкость к воздействию термических циклов, имитирующих сварку бериллиевых окон с корпусом рентгеновской трубки, а также эксплуатационные нагревы до 500°C – при пайке припоем 72Ag–28Cu (аналог – Cusil), до 650°C – при пайке припоем 92,5Ag–7,5Cu (аналог – Sterling Silver) и опытным серебросменяющим припоем Cu–Be–Ni на основе меди.

Увеличение стойкости к воздействию термических циклов, по-видимому, является следствием увеличения содержания серебра и температуры плавления припоя 92,5Ag–7,5Cu, повышения упругости и теплоемкости паяного шва за счет диффузии бериллия в серебросодержащие припои [17] и наличия бериллия в припое на основе меди.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Glenn T.G., Grotzky V.K., Keller D.L. Vacuum brazing beryllium to monel //Welding Journal. 1982. V. 129. №10. P. 334–338.

2. Справочник по пайке /Под ред. И.Е. Петрунина. 2-е изд. М.: Машиностроение. 1984. 400 с.
3. Припой на основе меди: пат. 2279957 Рос. Федерация; опубл. 20.07.2006 Бюл. №20. 5 с.
4. Способ получения фольги из бериллия: пат. 2299102 Рос. Федерация; опубл. 20.05.2007 Бюл. №14. 7 с.
5. Способ получения защитного покрытия на изделии из бериллия: пат. 2299266 Рос. Федерация; опубл. 20.05.2007 Бюл. №14. 5 с.
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 Ст.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. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
9. Каськов В.С. Бериллиевые тонкие вакуумно-плотные фольги, обеспечивающие коррозионную и экологическую безопасность изделий //Цветные металлы. 2012. №7. С. 70–71.
10. Каськов В.С. Бериллий – конструкционный материал для многоразовой космической системы //Авиационные материалы и технологии. 2013. №5. С. 19–29.
11. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В. Бериллий – конструкционный материал для многоразовой космической системы //Труды ВИАМ. 2013. №3. Ст. 03 (viam-works.ru).
12. Каськов В.С. Бериллий и материалы на его основе //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 222–226.
13. Каськов В.С. Снижение лучевой нагрузки на пациента за счет применения в рентгеновских трубках тонких вакуумно-плотных бериллиевых фольг с защитным покрытием //Медицинский бизнес. 2011. №9. С. 41–43.
14. Бериллий и его сплавы /В кн. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди /Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2012. С. 173–180.
15. Dave V.R., Javernick D.A., Toma D.J., Hollis K.J., Smith F.M., Dauelsberg L.B. Combined In-Situ Dilatometer and Contact Angle Studies of Interfacial Reaction in

Brazing /In: Submitted to 83-rd Annual American Welding Society Meeting and Convention. Chicago: Los Alamos National Laboratory IL. 2002.

16. Papin P.A., Field R.D., Javernick D.A. Characterization of Beryllium Copper Intermetallic Phases at a Beryllium Braze Interface by EMPA and TEM //Material Science Technology Division. 2005. V. 11. P. 1852–1853.
17. Torranin Chairuangsr, Ekasit Nisaratanaporn. Effects of Beryllium on Microstructure and Resiliency of Silver-Copper Alloy //Chiang Mai J. Sci. 2010. V. 37(2). P. 260–268.

#### REFERENCES LIST

1. Glenn T.G., Grotsky V.K., Keller D.L. Vacuum brazing beryllium to monel //Welding Journal. 1982. V. 129. №10. P. 334–338.
2. Spravochnik po pajke [Handbook on soldering] /Pod red. I.E. Petrunina. 2-e izd. M.: Mashinostroenie. 1984. 400 s.
3. Pripoj na osnove medi [Solder based on copper]: pat. 2279957 Ros. Federacija; opubl. 20.07.2006 Bjul. №20. 5 s.
4. Sposob poluchenija fol'gi iz berillija [A method for producing a beryllium foil]: pat. 2299102 Ros. Federacija; opubl. 20.05.2007 Bjul. №14. 7 s.
5. Sposob poluchenija zashhitnogo pokrytija na izdelii iz berillija [A method for producing a protective coating on an article made of beryllium]: pat. 2299266 Ros. Federacija; opubl. 20.05.2007 Bjul. №14. 5 s.
6. Colncev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Kas'kov V.S. Kompleksnaja sistema zashhity berillija ot okislenija [Comprehensive system protection against oxidation of beryllium ] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №1. S. 12–16.
7. Rozenenkova V.A., Solncev St.S., Mironova N.A. Kompleksnaja zashhita berillievych splavov ot okislenija i sublimacii toksichnyh parov berillija [Comprehensive protection for beryllium alloys from oxidation and sublimation toxic fumes of beryllium] //Trudy VIAM. 2013. №5. St. 03 (viam-works.ru).
8. Kablov E.N. Strategicheskie 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.
9. Kas'kov V.S. Berillievye tonkie vakuumno-plotnye fol'gi, obespechivajushhie korrozionnuju i jekologicheskuju bezopasnost' izdelij [Beryllium thin vacuum-tight foil, corrosion-resistant and ecologically safe products]

- providing corrosion and environmental safety products] //Cvetnye metally. 2012. №7. S. 70–71.
10. Kas'kov V.S. Berillij – konstrukcionnyj material dlja mnogorazovoj kosmicheskoj sistemy [Beryllium - construction material for reusable space system] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S1. S. 19–29.
  11. Antipov V.V., Senatorova O.G., Sidel'nikov V.V. Berillij – konstrukcionnyj material dlja mnogorazovoj kosmicheskoj sistemy [Beryllium - construction material for reusable space system] //Trudy VIAM. 2013. №3. St. 03 (viam-works.ru).
  12. Kas'kov V.S. Berillij i materialy na ego osnove [Beryllium and materials based on it] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 222–226.
  13. Kas'kov V.S. Snizhenie luchevoj nagruzki na pacienta za schet primenenija v rentgenovskih trubkah tonkih vakuumno-plotnyh berillievych fol'g s zashhitnym pokrytiem [Reduced radiation exposure to the patient by the use of X-ray tubes of thin vacuum-tight beryllium foils coated] //Medicinskij biznes. 2011. №9. S. 41–43.
  14. Berillij i ego splavy [Beryllium and Beryllium alloys] /V kn. Istorija aviacionnogo materi-alovedenija. VIAM – 80 let: gody i ljudi /Pod obshh. red. E.N. Kablova. M.: VIAM. 2012. S. 173–180.
  15. Dave V.R., Javernick D.A., Toma D.J., Hollis K.J., Smith F.M., Dauelsberg L.B. Combined In-Situ Dilatometer and Contact Angle Studies of Interfacial Reaction in Brazing /In: Submitted to 83-rd Annual American Welding Society Meeting and Convention. Chicago: Los Alamos National Laboratory IL. 2002.
  16. Papin P.A., Field R.D., Javernick D.A. Characterization of Beryllium Copper Intermetallic Phases at a Beryllium Braze Interface by EMPA and TEM //Material Science Technology Division. 2005. V. 11. P. 1852–1853.
  17. Torranin Chairuangsr, Ekasit Nisaratanaporn. Effects of Beryllium on Microstructure and Resiliency of Silver-Copper Alloy //Chiang Mai J. Sci. 2010. V. 37(2). P. 260–268.