



УДК 62-416:669.725

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-3-3

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФОЛЬГИ ИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СПЕ- ЧЕННОГО БЕРИЛЛИЯ ПОВЫШЕННОЙ ЧИСТОТЫ

А.Н. Фоканов

В.Ф. Подуражная

А.В. Тебякин

В.С. Каськов

кандидат технических наук

Июнь 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, В.Ф. Подуражная¹, А.В. Тебякин¹, В.С. Каськов¹

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФОЛЬГИ ИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СПЕЧЕННОГО БЕРИЛЛИЯ ПОВЫШЕННОЙ ЧИСТОТЫ

Представлены результаты исследования по изготовлению фольги толщиной 0,15–0,01 мм из технического спеченного бериллия повышенной чистоты ($Be \geq 99\%$; $BeO \leq 0,7\%$; $Fe \leq 0,1\%$) и изучению ее свойств. Теплую прокатку заготовок с защитным покрытием бериллия проводили в сварных контейнерах (чехлах) из нержавеющей стали на лабораторном прокатном стане без подогрева валков. Нагрев заготовок под прокатку проводили в температурной области с высокой пластичностью бериллия. Изучены микроструктуры фолы, оптическая и вакуумная плотность, определено содержание кислорода и железа, механические свойства фольги толщиной 0,15 мм. Показаны образцы пластин и дисков из бериллиевой фольги.

Ключевые слова: бериллий, фольга, прокатка, свойства.

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

FOIL MANUFACTURING FROM THE TECHNICAL SINTERED BERYLLIUM OF HIGHER PURITY

Results of the research of 0.15–0.01 mm thick foil made from the technical sintered beryllium of high purity ($Be \geq 99\%$; $BeO \leq 0,7\%$; $Fe \leq 0,1\%$) and its properties are presented in the article. Warm rolling of beryllium billets with protective coating was made in welded containers (covers) from stainless steel on the laboratory rolling mill without heating the rollers. Heating of billets for rolling was carried within the temperature range of high ductility of beryllium. Foils microstructures, optical and vacuum tightness, content of oxygen and iron, mechanical properties of 0,15 mm thick foil were studied. Samples of plates and disks made of beryllium foil were demonstrated.

Keywords: beryllium, foil, rolling, properties.

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

Бериллий, обладающий уникальными физико-механическими свойствами, стал конструкционным материалом для техники XXI века – экспериментального термоядерного реактора ITER, James Webb Space телескопа, высокоскоростных сканирующих устройств, тормозных авиационных систем, лазерной авионики, научного и медицинского приборостроения, перспективен для гиперзвуковой авиации и космических летательных аппаратов [1–11].

Низкий коэффициент поглощения бериллием энергии излучения используется при изготовлении выходных окон в рентгеновских трубках, входных окон в детекторах излучений, электрофизической аппаратуре и другом важном применении [12]. Для работы в области «мягкого» ($\lambda > 0,2$ нм, < 50 кэВ) рентгеновского излучения, которое сильно поглощается веществом, используется фольга из бериллия. Фольгой считается листовая металл толщиной $< 0,15$ мм (0,006 дюйма), в США – менее 0,508 мм (0,02 дюйма) [13]. Бериллиевая фольга и изделия из нее производятся в США в промышленных масштабах фирмами: Materion Brush Beryllium & Composites Corporation [1], ESPI Metals Inc. [14], для исследовательских целей – лабораторией Lebow Company [15], в Германии – Alfa Aesar A Jonson Matthey Company [16], в Великобритании – Goodfellow Cambridge Limited [17].

Бериллиевая фольга – наукоемкая и дорогостоящая продукция. Ее изготовление требует экстраординарной технологии и связано с существенным техническим риском ввиду нестабильности производственного процесса [9]. Стоимость фольги при чистоте бериллия 99,5% составляет ~10 тыс. \$/г, при чистоте 99,99% – достигает 50 тыс. \$/г. Россия импортирует ~400 г/год бериллиевой фольги толщиной 20 мкм по цене 10 тыс. \$/г [18].

В России производство бериллиевой фольги толщиной до 100 мкм по ТУ 48-5-66 из спеченного дистиллированного бериллия для рентгеновских окон и специальных электровакуумных приборов осуществлял Кандалакшский алюминиевый завод, однако в настоящее время оно прекращено.

Отсутствие в России промышленного производства и имеющиеся потребности научных центров, вузов и приборостроения делают разработку современных технологий производства бериллиевой фольги актуальной задачей.

В статье приведены результаты работы по получению радиационно-прозрачной фольги толщиной 0,15–0,01 мм из технического спеченного бериллия повышенной чистоты, проведенные в ВИАМ в 2009–2013 гг.

Материалы и методы

При работе в вакуумных приборах важнейшими характеристиками для фольги и изготавливаемых из нее окон являются: чистота бериллия, толщина фольги и ее размеры, вакуумная плотность и площадь вакуум-плотных участков, механические свойства, шероховатость поверхности и коррозионная стойкость.

Чистота бериллия, определяемая по количеству примесей, влияет на поглощение излучения, технологические свойства фольги при ее прокатке и коррозионную стойкость. Значения механических свойств (σ_v , δ) определяют деформацию и напряжение в фольге при перепаде давления в вакуумных приборах. Вакуумная плотность – лимитируемая мощность потока пробного газа гелия ($\leq 1,01 \cdot 10^{-8}$ Па·м³/с), проходящего через фольгу в вакуумируемый объем при перепаде давления, – является стандартным требованием для вакуумной техники. Минимальная толщина и разнотолщинность фольги и ее размеры, шероховатость поверхности, площадь вакуум-плотных участков характеризуют качество изготавливаемой фольги. Коррозионная стойкость бериллиевой фольги определяет сохранение вакуума и продолжительность работы узла при работе в атмосфере и различных средах.

Выполнение всех требований, предъявляемых к бериллиевой фольге, представляет сложную техническую задачу по следующим причинам: хрупкость бериллия и его химическая активность, токсичность при обработке, особенность технологии получения компактных заготовок методами порошковой металлургии.

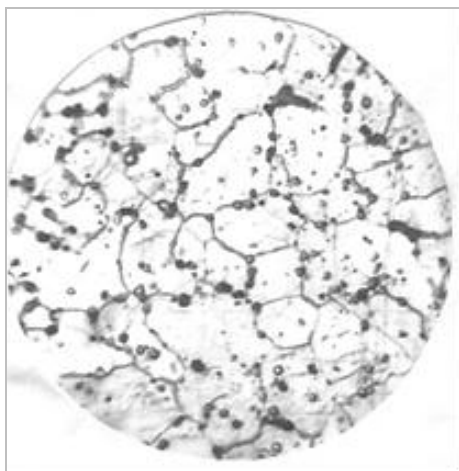


Рис. 1. Микроструктура ($\times 1350$) технического спеченного бериллия стандартной чистоты после отжига при 800°C в течение 2 ч

Поликристаллический бериллий имеет ограниченную способность к пластической деформации при температуре окружающей среды, обусловленную комплексом

взаимосвязанных причин: анизотропией межатомных связей, склонностью к разрушению вдоль плоскостей базиса, особенностями механизма деформации и упрочнения с гексагональной плотноупакованной (ГПУ) структурой металлов, наличием недеформируемой фазы в виде оксида бериллия различного размера и примесей интерметаллидов (рис. 1). Порошковый горячепрессованный бериллий можно рассматривать как дисперсноупрочненный сплав, в котором оксид является упрочняющей фазой. Включения оксида в бериллии, с одной стороны, препятствуют росту зерен при нагреве, с другой – тормозят движение дислокаций при деформировании, образуя их скопления на границах зерен, микротрещины и разрывы при дальнейшем развитии.

Анализ отечественных и зарубежных данных и имеющийся производственный опыт показали, что при использовании технического спеченного бериллия стандартной чистоты – (97,8–98,5%) Be, (1,5–2%) BeO; (0,13–0,25%) Fe – удастся получить вакуум-плотную фольгу с минимальной толщиной 0,2 мм. Получение вакуум-плотной фольги меньших толщин из бериллия стандартной чистоты ограничивается имеющейся дефектностью границ зерен спеченного бериллия.

Зарубежные производители используют для получения тонкой бериллиевой фольги специальные ультра- и высокочистые сорта бериллия с низким содержанием оксида и химическим составом, приведенным в табл. 1. Этим достигается возможность получения тонких до 1–2,5 мкм толщины пленок и фольг, с вакуумной плотностью от толщины 7,6 мкм, высокий коэффициент пропускания низкоэнергетического излучения и уменьшение загрязнения спектра примесями.

Таблица 1

Химический состав бериллия зарубежных производителей фольги

Фирма	Сорт бериллия	Содержание элементов, % массе (не более)										Толщина фольги, мкм
		Основа Be	BeO	Fe	Al	Si	C	Mg	Ti	Cr	Ni	
Materion Brush Beryllium & Composites	IF-1	99,8	0,06	0,03	0,01	0,01	0,03	0,006	0,001	0,035	0,02	2,5–254 7,6–3175
	PF-60	99,0	0,8	0,08	0,05	0,04	0,06	0,049	0,04	0,01	0,02	
ESPI Metals	3N	99,9	0,017	0,0125	0,0035	0,0067	–	0,0007	0,0007	–	0,0047	25–229
	2N8	99,8	0,03	0,02	0,01	0,01	–	0,002	0,0015	–	0,009	
Alfa Aesar	–	99,5	0,7	0,05	0,01	0,02	0,04	0,001	0,04	0,01	0,01	50

Выбор марки бериллия и технологий изготовления бериллиевых полуфабрикатов

В связи с отсутствием в России специальных сортов бериллия для изготовления тонкой бериллиевой фольги, в ВИАМ и ВНИИНМ им. А.А. Бочвара изучали химический состав и плотность, анализировали структуру, текстуру, механические свойства при комнатной и повышенных температурах различных бериллиевых полуфабрикатов

из технического спеченного бериллия в интервале температур 20–700°C для получения заготовок под прокатку со следующими характеристиками:

- пониженным содержанием оксида бериллия и железа;
- высокой плотностью;
- благоприятной текстурой для прокатки;
- высокой пластичностью при повышенных температурах;
- низкой температурой хрупкопластичного перехода;
- высокими релаксационными характеристиками;
- однородной мелкозернистой структурой.

Проведен анализ нескольких сортов бериллия по фракциям, мкм: ТШГ (+180÷-400), ТШГ-200, ТШГ-56, ТВ-56, ТВ-200, ДШГ (+180÷-600), ДВ-200, ДВ-56 с целью выбора материалов, удовлетворяющих требованиям по химическому составу и плотности. В результате, первоначально для прокатки ф́ольг выбраны два материала (ТШГ-200 и ТВ-200) в виде прутков $\varnothing 40$ мм, прошедшие двухступенчатую деформационную обработку, обладающие высокими значениями пластичности при повышенных температурах, низкими значениями температуры хрупкопластичного перехода и однородной мелкозернистой структурой, лишенной видимых крупных включений оксида бериллия и пор. Высокотемпературные механические характеристики бериллия марки ТВ-200 показаны на рис. 2, микроструктура – на рис. 3. Химический состав выбранного бериллия приведен в табл. 2, механические свойства бериллиевых заготовок – в табл. 3. Сравнение химического состава выбранных материалов и бериллия сорта PF-60 (см. табл. 1), в основном используемого фирмой Materion Brush Beryllium & Composites для изготовления бериллиевой ф́ольги, показало меньшее содержание оксида Be, но несколько большее содержание Fe.

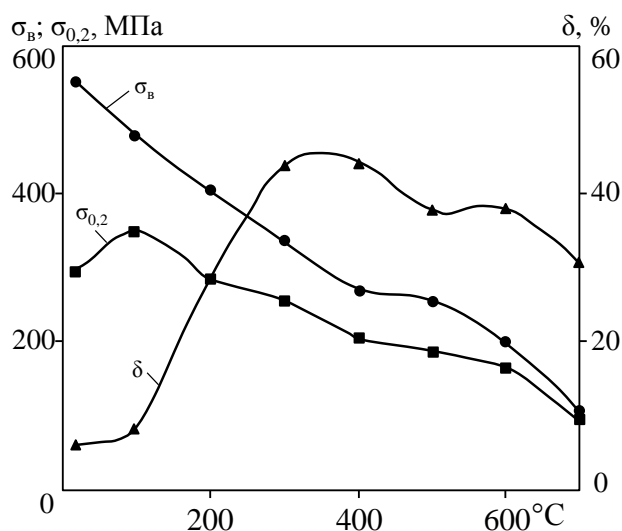


Рис. 2. Высокотемпературные механические характеристики бериллия марки ТВ-200 в осевом направлении



Рис. 3. Микроструктура ($\times 200$) бериллия марки ТВ-200 в поляризованном свете

Таблица 2

Химический состав бериллия для прокатки фольги

Марка сплава	Содержание элементов, % массе (не более)								
	Основа Be	BeO	Fe	Al	Si	C	F	Ti	Cr
ТВ-200	99,46	0,42	0,1	0,011	0,013	0,079	$9 \cdot 10^{-4}$	0,02	0,03
ТШГ-200	99,25	0,69	0,1	0,015	0,013	0,097	$9 \cdot 10^{-4}$	0,02	0,026

Таблица 3

Механические свойства* бериллиевых заготовок при 20°C

Марка сплава	Значения свойств заготовки				
	в радиальном направлении		в осевом направлении		
	σ_B , МПа	δ , %	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %
			МПа		
ТВ-200	<u>282–288</u> 284	0	<u>541–554</u> 548	<u>280–310</u> 295	<u>5,0–7,3</u> 5,9
ТШГ-200	<u>514–547</u> 530	<u>5,2–6,3</u> 5,7	–	–	–

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Изготовление заготовок под прокатку

При технологических процессах механической обработки бериллия в обрабатываемом поверхностном слое образуются дефекты (сколы, микротрещины, двойники, включения) и создаются остаточные напряжения. Электроэрозионная резка бериллия также образует поверхностный слой с измененной структурой и остаточными напряжениями [19]. При изготовлении заготовок под прокатку необходимо провести удаление поверхностного слоя с дефектами и измененной структурой, выровнять поверхность, устранить или снизить уровень остаточных напряжений путем термообработки. В процессе пластической деформации важно обеспечить сохранение химического состава исходного бериллия за счет исключения его взаимодействия с контактирующим материалом контейнера (чехла).

Бериллиевые заготовки для прокатки нарезают с помощью электроэрозионной резки из прутка на чистовом ($R_a \leq 2,5$ мкм) режиме латунным электродом в среде керосина с припуском 50–85 мкм на химическую обработку. Химическую обработку (травление и химическую полировку) проводили для удаления слоя с измененной структурой, образующегося при электроэрозионной резке, и для уменьшения шероховатости поверхности заготовки. Для снятия остаточных напряжений после электроэрозионной резки, удаления газов и растворения примесей перед прокаткой проводили стандартный вакуумный отжиг заготовок.

Для проведения теплой прокатки бериллиевых заготовок при повышенных температурах и предотвращения их охлаждения, бериллиевые заготовки закладывали меж-

ду пластинами контейнера (чехла) из листов нержавеющей стали и соединяли сваркой по его периметру. В целях предотвращения взаимодействия между бериллием и материалом контейнера (чехла) использовали способ, включающий пассивацию и термообработку поверхности бериллиевой заготовки и пластин контейнера (чехла), предложенный в патентах РФ [20, 21] и используемый для защиты бериллия от окисления [22]. Предложенный способ создает барьер для диффузионных процессов на поверхности бериллия и контейнера из нержавеющей стали.

Прокатка бериллиевой фольги

Технология теплой прокатки бериллиевых фолыг в контейнерах при температуре 400°C разработана на основе многих предшествующих экспериментальных работ по прокатке этого металла [23]. Так, в работе [12] рекомендуется для уменьшения окисления и получения более гладкой поверхности прокатывать фолыги при температуре <430°C с общим обжатием <50% и последующим отжигом в вакууме 10^{-6} мм рт. ст. ($1,33 \cdot 10^{-2}$ Па). Обжатие за проход из-за быстрого охлаждения бериллия не должно превышать 5–10%: чем чище прокатываемый металл, тем ниже может быть температура прокатки и большее обжатие до промежуточного отжига.

Для прокатки фольги использовали лабораторный ДУО прокатный стан с гладкими не подогреваемыми цилиндрическими валками $\varnothing 75$ мм и длиной 120 мм. Температуру нагрева заготовок под теплую прокатку выбирали по высокотемпературным характеристикам пластичности бериллия, используемого для изготовления заготовок под прокатку (рис. 2, кривая δ). Заготовки под прокатку нагревали в лабораторной печи в воздушной атмосфере. Перекрестную прокатку контейнера с заготовкой проводили с помощью обжатия при проходах с уменьшением зазора между валками вначале через 0,1 мм и на последних проходах – через 0,05 мм. Максимальное относительное обжатие за проход не превышало 2,5%.

При прокатке на последних проходах отмечалось значительное упрочнение материала контейнера (чехла) и искривление плоскости некоторых контейнеров. Причинами искривления плоскости контейнеров, по-видимому, являлись рассогласованное вращение валков и процессы, проходящие в очаге деформации.

Вскрытие контейнеров (чехлов) для извлечения фольги проводили с помощью электроэрозионной резки контейнера (чехла) по краям. Бериллиевую фольгу после извлечения из контейнера (чехла) и промывки в бензине подвергали внешнему осмотру, контрольным операциям по измерению толщины, визуальнo-оптическому контролю на наличие трещин, поверхностных раковин и включений. Визуальный осмотр фолыг по-

казал возможность сохранения плоской поверхности ф́ольг при толщине до 0,05 мм. С уменьшением толщины ф́ольг <0,05 мм, на некоторых пластинах ф́ольги возникала волнистость и ее смятие на отдельных участках из-за недостаточной жесткости ф́ольги и неравномерности пластической деформации. Для улучшения пластических характеристик при комнатной температуре и правки ф́ольги после прокатки проводили вакуумный отжиг, совмещенный с правкой. Защитное покрытие при необходимости удаляли с ф́ольги в растворе на основе азотной кислоты.

Для изучения свойств бериллиевой ф́ольги проводили:

- контроль оптической плотности ф́ольги при ее освещении с одной стороны интенсивным источником света в затемненном помещении;
- люминесцентный контроль на наличие поверхностных и сквозных дефектов набором дефектоскопических материалов ЛЮМ 33-ОВ по ГОСТ 18442, ОСТ 1 90282, ОСТ 1 90243;
- металлографические исследования шлифов из ф́ольги на оптическом микроскопе Leica DMIRM;
- механические испытания (σ_b , δ) образцов с размером 10×70 мм из ф́ольги толщиной 150 мкм по ГОСТ 11701 и ГОСТ 1497;
- испытания дисков из ф́ольги диаметрами 7 и 20 мм на вакуумную плотность в специальной оснастке гелиевым течеискателем ADIXEN/ALCATEL ASM-142 с чувствительностью по гелию в диапазоне $1 \cdot 10^{-12}$ Па·м³/с;
- сравнительный спектральный анализ материала заготовок и полученной ф́ольги толщиной 150 мкм на содержание железа на атомно-абсорбционном спектрофотометре С-115м;
- определение содержания кислорода в ф́ольге толщиной 150 мкм, изготовленной из бериллия марок ТВ-200 и ТШГ-200, нейтронно-активационным методом по ГОСТ 22720.2.

Результаты и обсуждение

Внешний вид и размеры бериллиевой ф́ольги представлены на рис. 4 и 5 и в табл. 4.

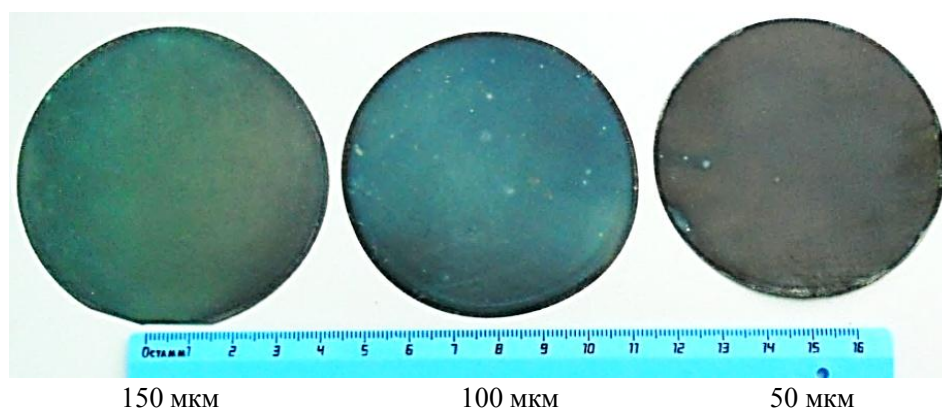
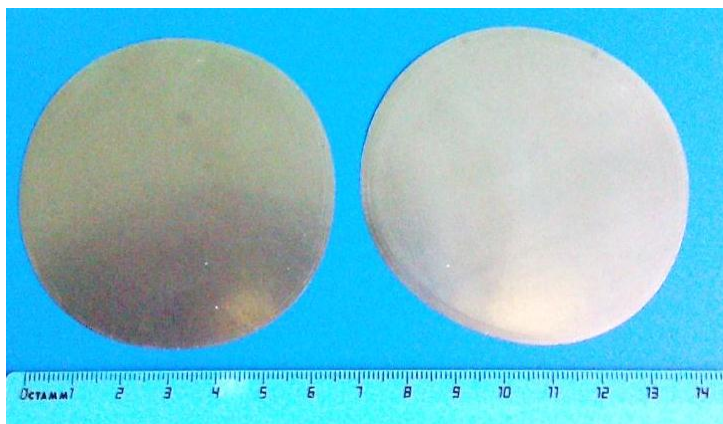


Рис. 4. Внешний вид бериллиевых ф́ольг с защитным покрытием после прокатки



100 мкм

50 мкм

Рис. 5. Внешний вид фольги без защитного покрытия

Таблица 4

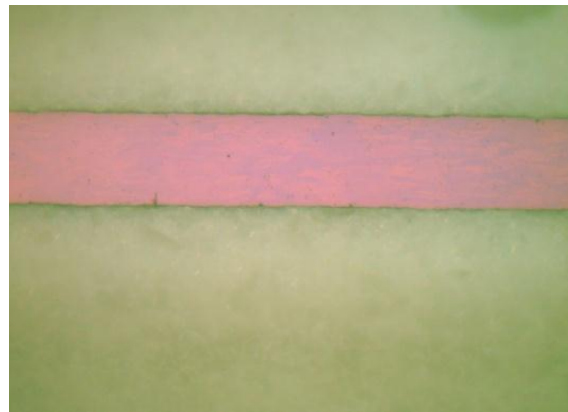
Размеры бериллиевых фольг

Толщина	Длина	Ширина
	мм	
0,01 ^{+0,005}	71–74	67–70
0,02 ^{+0,005}	59–68	56–67
0,05 ^{+0,005} _{-0,005}	64–67	61–64
0,10 ^{+0,01}	67–68	63–67
0,15 _{-0,005}	70–74	65–70

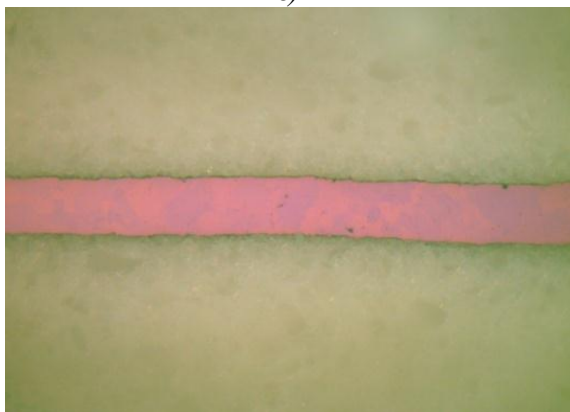
а)



б)



в)



г)

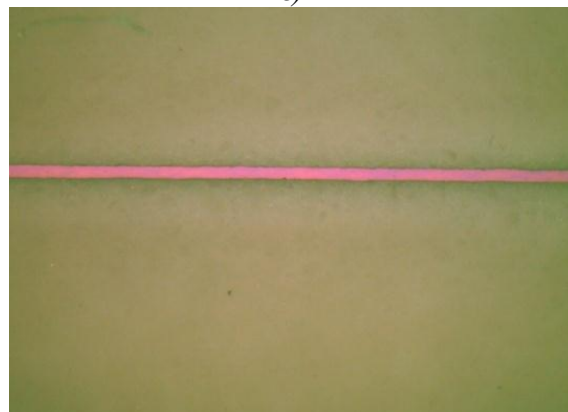


Рис. 6. Микроструктуры (поляризованный свет) бериллиевой фольги толщиной 0,15 (а); 0,10 (б); 0,05 (в) и 0,025 мм (г)

Визуально-оптический контроль поверхности фольги, проведенный с применением увеличительных приборов (лупа $\times 4$, микроскоп МБС-10), показал на некоторых заготовках изменение цвета на покрытии и наличие пятен, рисок и трещин, развивающихся от края заготовок. Контроль оптической плотности и металлографическое исследование показали возможность образования в фольге толщиной ≤ 10 мкм сквозных дефектов. Люминесцентный контроль и металлографический анализ микроструктур показал в фольгах толщиной ≥ 20 мкм наличие несквозных поверхностных и приповерхностных дефектов и включений с размерами до нескольких микрометров (рис. 6). Результаты механических испытаний образцов из бериллиевой фольги толщиной 0,15 мм представлены в табл. 5. Результаты испытаний на вакуумную плотность дисков диаметрами 7 и 20 мм, схема испытания и внешний вид гелиевого течеискателя ADIXEN/ALCATEL ASM-142 с оснасткой для испытаний представлены в табл. 6 и на рис. 7.

Таблица 5

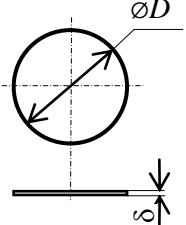
Результаты механических испытаний* бериллиевой фольги толщиной 0,15 мм

Марка бериллиевой фольги	σ_B^{20} , МПа	δ , %
ТВ-200 М	$\frac{307-489}{384}$	$\frac{2,5-5,3}{3,8}$
ТШГ-200 М	$\frac{375-492}{430}$	$\frac{2,0-5,0}{3,2}$

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Таблица 6

Результаты испытаний дисков из бериллиевой фольги на вакуумную плотность

	δ	$\varnothing D$	Величина сигнала гелия μ_{He} , Па·м ³ /с	
	мм		ТШГ-200	ТВ-200
	$0,01^{0,005}$	$7_{-0,07}$	$(8,5 \div 3,4) \cdot 10^{-10}$	$(7,6 \div 3,8) \cdot 10^{-10}$
$0,02^{0,005}$	$7_{-0,07}$	$(8,3 \div 4,6) \cdot 10^{-11}$	$(5,6 \div 4,4) \cdot 10^{-11}$	
$0,05^{0,005}$	$7_{-0,07}$	$(5,8 \div 3,3) \cdot 10^{-11}$	$(6,8 \div 4,4) \cdot 10^{-11}$	
$0,10^{0,008}$	$20_{-0,1}$	$(5,2 \div 3,2) \cdot 10^{-11}$	$(4,9 \div 3,8) \cdot 10^{-11}$	
$0,15^{0,008}$	$20_{-0,1}$	$(7,8 \div 3,8) \cdot 10^{-11}$	$(6,8 \div 2,9) \cdot 10^{-11}$	

а)

б)

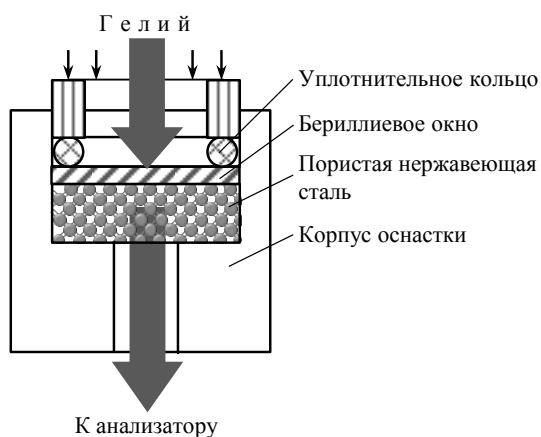


Рис. 7. Схема испытания на вакуумную плотность (а) и гелиевый течеискатель ADIXEN/ALCATEL ASM 142 с оснасткой для испытания (б)

Таблица 7

Сравнительные данные по содержанию примесей [O, BeO, Fe]

Материал	Содержание, % (по массе), примесей		
	[O]	[BeO]	[Fe]
Бериллий марки ТШГ-200	–	0,69	0,096
Фольга бериллиевая ТШГ-200 толщиной 0,15 мм	0,28	0,44	0,095
Бериллий марки ТВ-200	–	0,42	0,093
Фольга бериллиевая ТВ-200 толщиной 0,15 мм	0,27	0,42	0,093

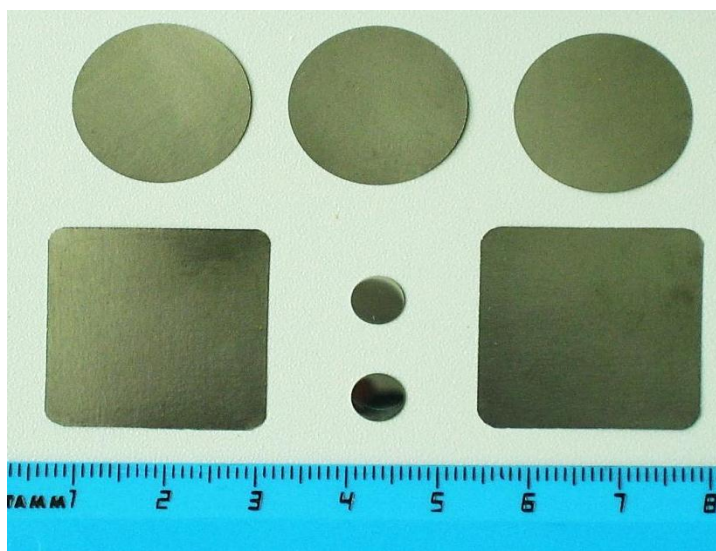


Рис. 8. Диски и пластины из бериллиевой фольги толщиной 0,025 мм

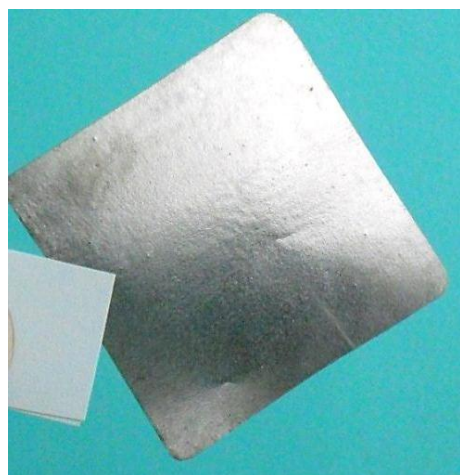


Рис. 9. Бериллиевая фольга толщиной 0,01 мм

Определение массовой доли примеси железа в фольге толщиной 150 мкм и бериллии марок ТШГ-200 и ТВ-200 с помощью спектрального анализа показало соответствие содержания железа в бериллиевой фольге содержанию железа в бериллиевых заготовках марок ТШГ-200 и ТВ-200, используемых для прокатки. Проведенное определение содержания кислорода в фольге толщиной 150 мкм из бериллия марок ТШГ-200

и ТВ-200 на образцах $\varnothing 30 \times 0,15$ мм нейтронно-активационным методом показало отсутствие увеличения содержания кислорода в бериллиевой фольге в сравнении с заготовками, используемыми при прокатке. Результаты определения содержания примесей приведены в табл. 7. На рис. 8 и 9 представлены экспериментальные образцы пластин и дисков толщиной 0,025 и 0,010 мм, изготовленных из бериллиевой фольги.

Заключение

В результате проведенных в ВИАМ исследований показана возможность получения теплой прокаткой фольги из бериллия повышенной чистоты марок ТШГ-200 и ТВ-200 в контейнерах (чехлах) из нержавеющей стали.

Температура нагрева заготовок в области высокой пластичности бериллия обеспечила возможность проведения деформационной обработки с относительными обжатиями за проход до 2,5% на валках прокатного стана без подогрева.

Применение пассивации и термообработки поверхности бериллиевой заготовки и контейнера обеспечивает отделение фольги от контейнера.

Диски $\varnothing 20$ толщиной 0,15 и 0,1 мм и $\varnothing 7$ мм толщиной 0,05; 0,02 и 0,01 мм, изготовленные из фольг, прошедших люминесцентный контроль, обладают вакуумной плотностью.

Механические свойства фольги толщиной 150 мкм в отожженном состоянии составили $\sigma_{\text{в}} \geq 300$ МПа, $\delta \geq 2\%$.

Технология прокатки заготовок с защитным покрытием на бериллии обеспечивает сохранение химического состава бериллия по содержанию железа и оксида бериллия.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.materion.com.
2. 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.
3. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
4. 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.

5. Фоканов А.Н., Каськов В.С., Подуражная В.Ф. Пайка бериллия со сплавом монель при изготовлении рентгеновских окон //Труды ВИАМ. 2014. №8. Ст. 02 (viam-works.ru).
6. Каськов В.С. Бериллий – конструкционный материал для многоразовой космической системы //Труды ВИАМ. 2013. №3. Ст. 03 (viam-works.ru).
7. Каськов В.С. Бериллий и материалы на его основе //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 222–226.
8. Каськов В.С., Жирнов А.Д. Изготовление конструкционных изделий из бериллия в ВЭТЦ ВИАМ и их применение в различных отраслях науки и техники /В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып. «Бериллий – конструкционный материал XXI века». М.: ВИАМ. 2000. С. 19–22.
9. Каськов В.С., Горбунов П.З., Фоканов А.Н. Эффективность применения бериллиевой фольги в узлах рентгеновских приборов /В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып. «Бериллий – конструкционный материал XXI века». М.: ВИАМ. 2000. С. 51–52.
10. Фоканов А.Н., Каськов В.С. Высококачественные изделия из бериллия для рентгеновской техники и научного приборостроения /В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып. «Бериллий – конструкционный материал XXI века». М.: ВИАМ. 2000. С. 110–111.
11. Wittenauer J., Nien T.G. Characterization of beryllium foil produced by hot rolling //Journal of materials science. 1992. V. 27. P. 2653–2639.
12. Папиоров И.И., Николаенко А.А. Бериллиевые фольги для окон счетчиков ядерного излучения //ВАНТ. 2013. №6 (88). С. 235–239.
13. www.naukaspb.ru.
14. www.espimetals.com.
15. www.lebowcompany.com
16. www.alfa.com.
17. www.goodfellow.com.
18. Тузов Ю.В., Маркушкин Ю.Е., Краснощеков Е.С. Бериллий – состояние, возможности и перспективы применения в термоядерной энергетике //Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Термоядерный синтез». 2011. Вып. 2. С. 21–27.
19. Фоканов А.Н., Субботко В.А. Исследование влияния электроэрозионной обработки на напряженное состояние и механические свойства бериллия /В сб.: Авиационные

- материалы и технологии. Вып. «Бериллий – конструкционный материал XXI века». М.: ВИАМ. 2000. С. 59–63.
20. Способ получения защитного покрытия на изделии из бериллия: пат. 2299266 Рос. Федерация; заявл. 27.12.2005; опубл. 20.05.2007. Бюл. №14. 5 с.
21. Способ получения фольги из бериллия: пат. 2299102 Рос. Федерация; заявл. 27.12.2005; опубл. 20.05.2007. Бюл. №14. 7 с.
22. 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.
23. Колбасников Н.Г., Мишин В.В., Шишов И.А., Кистанкин И.С., Забродин А.В. Разработка неразрушающих режимов теплой прокатки нанокристаллического бериллия с помощью математического моделирования //Деформация и разрушение материалов. 2013. №9. С. 14–21.

REFERENCES LIST

1. www.materion.com.
2. Dospehi dlja «Burana». Materialy i tehnologii VIAM dlja MKS «Jenergija–Buran» [Armor for «Buran». Materials and VIAM technologies for ISS of «Energiya–Buran»] /Pod obshh. red. E.N. Kablova. M.: Fond «Nauka i zhizn'». 2013. 128 s.
3. Kablov E.N. Materialy dlja izdelija «Buran» – innovacionnye reshenija formirovanija shestogo tehnologicheskogo uklada [Materials for the product «Buran» – innovative solutions of forming of the sixth technological way] //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
4. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030»] //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). S. 3–33.
5. Fokanov A.N., Kas'kov V.S., Podurazhnaja V.F. Pajka berillija so splavom monel' pri izgotovlenii rentgenovskih okon [The beryllium soldering with alloy monel when manufacturing x-ray windows] //Trudy VIAM. 2014. №8. St. 02 (viam-works.ru).

6. Kas'kov V.S. Berillij – konstrukcionnyj material dlja mnogorazovoj kosmicheskoj sistemy [Beryllium – constructional material for reusable space system] //Trudy VIAM. 2013. №3. Ct. 03 (viam-works.ru).
7. 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.
8. Kas'kov V.S., Zhirnov A.D. Izgotovlenie konstrukcionnyh izdelij iz berillija v VJeTC VIAM i ih primenenie v razlichnyh otrasljah nauki i tehniki [Manufacturing of constructional products from beryllium in VETTs VIAM and their application in different branches of science and technicians] /V sb.: Aviacionnye materialy i tehnologii. Vyp. «Berillij – konstrukcionnyj material XXI veka». M.: VIAM. 2000. S. 19–22.
9. Kas'kov V.S., Gorbunov P.Z., Fokanov A.N. Jeffektivnost' primenenija berillievoj fol'gi v uzlah rentgenovskih priborov [Efficiency of application of beryllium foil in nodes of x-ray devices] /V sb.: Aviacionnye materialy i tehnologii. Vyp. «Berillij – konstrukcionnyj material XXI veka». M.: VIAM. 2000. S. 51–52.
10. Fokanov A.N., Kas'kov V.S. Vysokokachestvennye izdelija iz berillija dlja rentgenovskoj tehniki i nauchnogo priborostroenija [High-quality products from beryllium for x-ray equipment and scientific instrument making] /V sb.: Aviacionnye materialy i tehnologii. Vyp. «Berillij – konstrukcionnyj material XXI veka». M.: VIAM. 2000. S. 110–111.
11. Wittenauer J., Nien T.G. Characterization of beryllium foil produced by hot rolling //Journal of materials science. 1992. V. 27. P. 2653–2639.
12. Papirov I.I., Nikolaenko A.A. Berillievyje fol'gi dlja okon schetchikov jadernogo izlucheniija [Beryllium foil for windows of counters of nuclear radiation] //VANT. 2013. №6 (88). C. 235–239.
13. www.naukaspb.ru.
14. www.espimetals.com.
15. www.lebowcompany.com
16. www.alfa.com.
17. www.goodfellow.com.
18. Tuzov Ju.V., Markushkin Ju.E., Krasnoshhekov E.S. Berillij – sostojanie, vozmozhnosti i perspektivy primenenija v termojadernoj jenergetike [Beryllium – condition, opportunities and application perspectives in thermonuclear power] //Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Ser. «Termojadernyj sintez». 2011. Vyp. 2. S. 21–27.
19. Fokanov A.N., Subbotko V.A. Issledovanie vlijanija jelektrojerozionnoj obrabotki na naprjazhennoe sostojanie i mehanicheskie svojstva berillija [Research of influence of elec-

tric erosion machining on tension and mechanical properties of beryllium] /V sb.: Aviacionnye materialy i tehnologii. Vyp. «Berillij – konstrukcionnyj material XXI veka». M.: VIAM. 2000. S. 59–63.

20. Sposob poluchenija zashhitnogo pokrytija na izdelii iz berillija [Way of receiving protecting cover on product from beryllium]: pat. 2299266 Ros. Federacija; zajavl. 27.12.2005; opubl. 20.05.2007. Bjul. №14. 5 s.
21. Sposob poluchenija fol'gi iz berillija [Way of receiving foil from beryllium]: pat. 2299102 Ros. Federacija; zajavl. 27.12.2005; opubl. 20.05.2007. Bjul. №14. 7 s.
22. Solncev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Kas'kov V.S. Kompleksnaja sistema zashhity berillija ot okislenija [Complex system of protection of beryllium from oxidation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №1. S. 12–16.
23. Kolbasnikov N.G., Mishin V.V., Shishov I.A., Kistankin I.S., Zabrodin A.V. Razrabotka nerazrushajushhijh rezhimov teploj prokatki nanokristallicheskogo berillija s pomoshh'ju matematicheskogo modelirovanija [Development of nondestructive modes of warm rolling of nanocrystal beryllium by means of mathematical modeling] //Deformacija i razrushenie materialov. 2013. №9. S. 14–21.