

Г. П. Акишин¹, д. т. н. В. С. Кийко² (✉)

¹ ТОО «КазМетизПром», г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

² ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия

УДК 666.3:546.45-31].001.8(470)

ПРОИЗВОДСТВО ВеО-КЕРАМИКИ В СССР И ЕГО ВОЗРОЖДЕНИЕ В СОВРЕМЕННОЙ РОССИИ

Наибольшими запасами бериллиевой руды в мире обладают США, Китай, Казахстан и Россия. Во времена СССР руду на территории России добывали на Малышевском (Свердловская обл.), Завитинском (Читинская обл.), Ермаковском (Бурятия) и Пограничном (Приморский край) месторождениях [1–4]. В связи с сокращением объема потребления предприятиями ВПК и строительства атомных электростанций добыча руды в России была приостановлена в 90-х годах прошлого столетия на Малышевском, Ермаковском и значительно на Завитинском месторождениях [1, 2]. После Второй мировой войны заводы по выпуску бериллия и его соединений были построены в Японии и Франции, но в 1965 г. из-за перенаселенности и вредного воздействия бериллиевого производства на окружающую среду были закрыты. В этом же году американцы построили и запустили завод по производству изделий из ВеО-керамики, принадлежащий фирме «Брач Веллман». В Китае в 2015 г. запущен в эксплуатацию горно-металлургический комбинат, на котором производят изделия из ВеО-керамики.

Согласно US Geological Survey, в 2016 г. производство продукции на основе бериллия в мире составило около 220 т. В настоящее время действующее производство изделий из ВеО-керамики существует в трех странах, которые работают по полному технологическому циклу: в США, Китае и Казахстане. В Казахстане основным производителем

изделий из ВеО-керамики является завод «Керамика», название которого в процессе работы многократно изменялось.

После распада СССР Казахстан в постсоветском пространстве является одним из крупнейших в мире поставщиков бериллия и ВеО-керамики. Значительное количество ВеО-керамики используется в электронной промышленности при производстве микросхем и микросборок [1, 2, 5–8], в атомной отрасли в качестве компонента ядерного топлива для АЭС, а также в современной ракетной технике для двигателей с ядерным реактором. Использование дисперсионного топлива ВеО–UO₂ в ядерных реакторах привело к созданию низколетящей ракеты с ядерным прямоточным двигателем [3]. Из-за широкого использования керамики на основе ВеО в различных областях техники и специального приборостроения она отнесена к стратегическим материалам [1–3, 5–18].

Керамика, изготовленная на основе оксида бериллия, обладает уникальными физико-химическими свойствами: сочетает высокие химическую, термическую и радиационную стойкость [2, 3] и в отличие от других видов оксидной керамики поглощает и отражает нейтроны различных энергий [2, 3, 19]; имеет уникальную теплопроводность — до 320 Вт/(м·К) [2, 5–8, 10, 18] и скорость распространения звука более 12000 м/с [2, 11, 12]; без введения примесей ВеО обладает высокими электросопротивлением и механи-

ческой прочностью [2, 3, 8, 13, 16]; хорошо пропускает различные виды электромагнитного излучения [2, 3, 14–19]; с добавками TiO₂ может быть использована в достаточно мощных поглотителях СВЧ-энергии [2, 5, 7, 13, 14, 16–18]; обладает температурой плавления около 2843 К (температура плавления керамики на основе Al₂O₃ составляет только 2323 К) [2, 3, 6]; при охлаждении до 50 К теплопроводность монокристаллов ВеО резко возрастает до 13500 Вт/(м·К), что характерно также и для ВеО-керамики [2, 5, 10].

В настоящее время изделия из ВеО-керамики, полученные по традиционной технологии методом полусухого прессования или шликерного литья, широко применяются в качестве: высоковольтных изоляторов в установке для получения высокотемпературной замагниченной водородной плазмы (термоядерной реакции) в системе с магнитным обжатием (проект МАГО, Российский федеральный ядерный центр) [2, 5]; высокотемпературных электроизоляторов для токопроводящих контактов графитовых испарителей металла, работающих при температуре около 2200 К [2]; огнеупорного материала в специальной металлургии [2, 3, 5]; окон, изоляторов-теплоотводов, подложек кристаллодержателей мощных полевых транзисторов и микросхем [2, 5]; подложек и оснований для мощных БИС, СБИС, а также ГИС, работающих в быстродействующих устройствах вычислительной техники; световодов для полупроводниковых лазеров; конструкционных изделий для систем дальней космической связи; газоразрядных трубок резонаторов и полых диэлектрических волноводов газовых лазеров широкого спектрального диапазона [2, 15]; высокочастотных изоляторов-теплоотводов при производстве



В. С. Кийко
E-mail: v.kijko@mail.ru

мощных бортовых радиолокационных станций СВЧ-излучения с фазированной решеткой [2, 5]; тепловыделяющего матричного элемента при создании более совершенных ракетных двигателей с ядерным реактором [3, 5]; звукопроводов и концентраторов ультразвука, способных пропускать излучение в широком температурном диапазоне (77–1500 К) [2, 11]; конструкционных элементов для ламп бегущей волны [2, 5, 17, 18]; отражателя нейтронного излучения [3]; материала пробирного камня для пробирного надзора [2, 5].

В связи с развитием технологии получения плотной оптически прозрачной ВеО-керамики в России ведутся активные исследования по развитию новых направлений применения ВеО-керамики: в условиях космического пространства [2, 5]; в качестве сцинтилляторов для тканезквивалентных сцинтилляционных, термостимулированных люминесцентных, экзосмиссионных и электронного парамагнитного резонанса дозиметра ионизирующего излучения [2, 15, 19]; для создания отражающих электронно-лучевых трубок нового поколения [2, 15]. Большое разнообразие свойств свидетельствует о широких возможностях применения ВеО-керамики в машиностроении, военных областях промышленности и космической отрасли [2, 5, 17–19]. В сильноточной СВЧ-технике ВеО-керамика не имеет альтернативы [2, 7, 8, 14].

Как же создавалось промышленное производство изделий на основе ВеО-керамики в Советском Союзе? Первый в СССР Ульяновский металлургический завод (УМЗ) по производству керамических изделий из ВеО-керамики был построен в Усть-Каменогорске в 1960 г. Завод принадлежал Министерству среднего машиностроения (МСМ) СССР, который наряду с другими типами продукции производил изделия из металлического бериллия и оксидной бериллиевой керамики. В начале 70-х годов прошлого века в связи с резким ростом потребности в электронных приборах спрос на бериллиевую керамику увеличился. Существующее производство по выпуску оксидно-бериллиевой керамики на УМЗ не могло обеспечить потребности предприятий МСМ СССР и Министерства электронной промышленности (МЭП) СССР. В связи с этим прорабатывались два варианта:

1. Расширение существующих производственных площадей УМЗ.

2. Строительство нового завода по выпуску керамики на основе ВеО.

В результате был выбран второй вариант, так как на расширение производства УМЗ запросил 150 млн долл., а строительство нового завода оценивалось МЭП СССР всего в 75 млн долл. Постановлением ЦК КПСС и Совета министров СССР № 115-42 от 05.02.76 г. было принято решение о проектировании и строительстве завода «Керамика» для удовлетворения нужд предприятий МЭП СССР в изделиях из ВеО-керамики. Строительство завода велось с мая 1978 по 1984 г. Первоначально с апреля 1981 г. завод получил название «Керамика»; в дальнейшем его название и форма собственности изменялись: с декабря 1993 г. он был переименован в АО «Керамика», с января 2000 г. АО «Керамика» было продано на аукционе и переименовано в ТОО «Альтрейд», с апреля 2009 г. ТОО «Альтрейд» по договору аренды передано ТОО «КазМетизПром», а с июня 2015 г. собственником завода является ТОО Производственная фирма «BEST». Фирма «BEST» в настоящее время (без изменений в организации производства и условий труда по сравнению с ТОО «КазМетизПром») продолжает работу по изготовлению изделий из ВеО. Таким образом, УМЗ занимается преимущественно производством металлического бериллия и лигатур на его основе, а ТОО «BEST» — выпуском изделий из ВеО-керамики [10].

Первым директором завода «Керамика» был назначен второй секретарь Ульяновского райкома КПСС Восточно-Казахстанской обл. **Михаил Петрович Харди́ков**. Строительство завода вело Иртышское управление строительства, начальник строительства — **Владимир Георгиевич Плохих**. Основные субподрядные организации: Промсантехмонтаж и Промэлектромонтаж СССР. Завод «Керамика» был отнесен к МЭП СССР, министром которого был **Александр Иванович Шокин**, а первым заместителем **Владимир Григорьевич Колесников**. В самом МЭП СССР завод подчинили Седьмому главному управлению, его начальник **Авенир Сергеевич Гладков** лично контролировал строительство.

Место строительства было определено в результате проработки технико-экономической целесообразности строительства завода. Проект на строительство завода «Керамика» был вначале направлен специалистам по производству

бериллиевой керамики на УМЗ и подвергнут резкой критике. В связи с этим руководством МЭП СССР было принято решение в МСМ СССР с просьбой выделить специалистов для доработки проекта. В октябре 1981 г. с УМЗ на завод «Керамика» были переведены несколько специалистов, возглавивших техническую службу завода. С их помощью начали решаться технические вопросы по разработке проекта для строительства завода. В ноябре 1981 г. на одном из заседаний коллегии МЭП СССР был решен вопрос о создании опытного участка в здании лабораторно-бытового корпуса завода «Керамика» для отработки технологии и приобретения навыков работы с продуктом 1-го класса опасности — ВеО. В 1983 г. участок был запущен. По распоряжению начальника главка из г. Рыбинска была доставлена и смонтирована линия литья керамической пленки. На первом этаже была установлена вакуумная высокотемпературная печь «Даурия». Можно считать, что завод с этого времени начал функционировать, одновременно достраивая рабочие корпуса и совершенствуя технологию. Перед установкой в цехах технологическое оборудование проходило практику по получению керамических изделий на имитаторах, завезли 3 т нетоксичного алюмооксидного керамического порошка для получения керамики 22 ХС. Параллельно отрабатывали технологию производства ВеО-керамики. Постепенно устранялись недостатки в проектировании, шла корректировка оборудования, были заказаны высокотемпературные печи типа СШВ-3,5 для спекания длинномерных изделий, запущены на изготовление печи ВТВУ. Вместо поступивших печей для предварительного обжига тележного типа были смонтированы печи СТД и Г-150, опробованные на действующем производстве УМЗ.

Постоянно шло освоение площадей, оборудования, производился набор рабочих кадров. 28 декабря 1984 г. завод «Керамика» был сдан в эксплуатацию. Были построены помещения для подразделений основного и вспомогательных производств, корпуса под центральную заводскую, промышленно-санитарную лабораторию и лабораторию измерительной техники; создано специальное конструкторско-технологическое бюро (СКТБ). В рамках создания инфраструктуры предусмотрены корпус газоочистки, очистные сооружения, насосные перекачки спецтоков,

подразделения сжигания, регенерации и переработки отходов, содержащих исходный материал. Производственная программа позволяла производить изделия: держатели, диски, основания, пластины, колпаки, тигли, стержни, трубки, итого 150 млн шт. в год на сумму 65 млн долл. США. Проект выхода годных изделий изменялся в диапазоне 35–70 %. Общая численность работающих, включающая основных производственных и вспомогательных рабочих, ИТР, служащих и медперсонал, составляла 2225 человек.

В качестве сырьевого материала завод «Керамика» использовал тонкодисперсный низкообоженный порошок оксида бериллия, поставляемый УМЗ по специальным требованиям. Из поступавшего порошка в зависимости от методов формирования готовили шликер на органической связке для горячего литья под давлением, длинномерного литья, литья керамической пленки, а также пресс-порошок для полусухого прессования. Формование изделий осуществляли практически всеми известными способами на специально разработанном для этих целей оборудовании. В связи с высокой температурой обжига изделий из BeO-керамики (~2000 К) были разработаны специальные высокопроизводительные вакуумные печи, работающие при температуре до 2770 К. Большинство изделий из номенклатуры, поставляемой предприятием МЭП СССР, из-за высокой твердости BeO требовали дополнительной механической обработки только алмазным инструментом на стандартных металлообрабатывающих станках, поэтому был построен цех механической обработки изделий из BeO-керамики (запущен в 1982 г.).

Технологический процесс изготовления изделий из BeO-керамики предусматривает нанесение металлопокрытий одним или несколькими металлами, обеспечивающими высокую адгезию керамики с покрытиями. Заводом освоена различная технология нанесения покрытий: методами трафаретной печати (толщина покрытия от 20 до 40 мкм), вакуумного, магнетронного напыления тугоплавких металлов (молибден, вольфрам, ниобий, тантал и др.), гальваническим, а также методом пленочной металлизации с помощью термопереноса полиморфной металлизационной пленки. Общая производственная мощность участка нанесения металлопокрытий до 5 т изделий в год, или 15–20 млн

шт. массой от 0,1 до 0,2 г. Для производственных целей применяются газы: водород, кислород, аргон, азот, воздух; построены станции: водородно-кислородная, азотно-компрессорная, получения сжатого воздуха. Техника безопасности и охрана труда на заводе осуществлялись в соответствии с санитарными правилами при работе с бериллием и его соединениями.

1985 г. — это год освоения производства, пуск первого цеха завода «Керамика». Освоение основной продукции проходило в трудных условиях: не хватало квалифицированных кадров, параллельно шли установка оборудования, обучение кадров (в том числе работе с высокотоксичным BeO), комплексно отрабатывался запуск всех подразделений завода. Непосредственно в цехе № 1 отработывали методы литья пластин размерами 30×40 мм, их обжигали, далее нарезали из них образцы меньшего размера, например 1,9×1,9 мм. С экономической точки зрения это было невыгодно, но необходимо были освоение широкой номенклатуры изделий и подготовка к этому всего производственного цикла завода, и прежде всего механического цеха для изготовления оснастки. В связи с началом работы по выпуску изделий МСМ СССР потребовало график передачи изготовления керамических изделий с УМЗ на завод «Керамика». Такой график был составлен и подписан двумя заместителями министров (МСМ и МЭП СССР). МЭП СССР начало оказывать помощь заводу в материалах, финансировании, комплектовании кадров. За время работы завода должность директора занимали: **М. П. Харди́ков**, **В. Н. Ляпунов**, **Г. Н. Седаков**, **Е. Н. Нарымов**, **Г. П. Акишин**. Каждый из них опытный руководитель, умелый организатор, высококвалифицированный специалист. Благодаря их талантовому и смелому руководству, внедрению новых технологий завод смог пережить кризисные времена и продолжает выпуск качественных изделий из BeO-керамики.

1. **М. П. Харди́ков** — под его руководством был построен завод «Керамика». Отличный организатор, смелый и напористый, создал талантливый коллектив единомышленников. Именно такие руководители готовы к переменам и новым решениям.

2. **В. Н. Ляпунов** — в начале трудового пути на заводе работал в основном цехе, в совершенстве вла-

дел технологией керамики. Стал директором завода. Один из тех руководителей, кто не колеблясь ломал старое, создавая новое.

3. **Г. Н. Седаков** — прошел обучение по банкротству. В период банкротства завода был просто необходим.

4. **Е. Н. Нарымов** — специалист по банковским делам. В тяжелые времена спасал завод от банкротства.

5. **Г. П. Акишин** — один из оставшихся крупнейших специалистов по BeO-керамике (40 лет стажа), имеет большой опыт организации производства. Работу начинал на производстве изделий из BeO-керамики на УМЗ. На заводе «Керамика» и в дальнейшем в ТОО «КазМетизПром» трудился с 1971 по 2015 г. В 2000 г. вторично организовал запуск завода в работу. С 2008 до 2015 г. занимал должность директора завода.

Большой вклад в организацию производства и развитие технологии производства изделий из BeO-керамики с момента строительства завода и по настоящее время внесли следующие специалисты: **В. А. Кустов** — 40 лет стажа, бывший главный технолог завода «Керамика»; **С. К. Турнаев** — 35 лет стажа, бывший заместитель главного технолога завода «Керамика», директор по коммерческим вопросам ТОО «КазМетизПром»; **В. Я. Сапунцов** — 35 лет стажа, бывший заместитель директора по производству ТОО «КазМетизПром»; **С. В. Кайгородов** — 30 лет стажа, бывший начальник основного производства завода; **В. И. Красюк** — 35 лет стажа, бывший начальник отдела технического контроля завода; **В. С. Фурса** — 30 лет стажа, бывший начальник отдела охраны труда завода; **В. Г. Акишин** — 9 лет стажа, заместитель директора по общим вопросам и охране труда; **О. М. Шахова** — 30 лет стажа, бывший начальник ЦЗЛ завода; **Г. М. Кильговатов** — с 1979 по 2000 г. мастер на бериллиевом производстве АО УМЗ, с 2000 г. и по настоящее время — главный технолог завода, крупный специалист по технологии получения порошков и изделий из BeO-керамики; 40 лет стажа на бериллиевом производстве.

В 1987 г. создано СКТБ при заводе «Керамика», которое взяло на себя функции освоения изделий, передаваемых с УМЗ, запуска их в серийное производство и курирования технологического процесса. Организатором и директором его

был назначен к. т. н. **Г. Д. Бицоев**. С июня 1985 г. он занимал должность зам. главного инженера по новой технике завода «Керамика», с 1987 г. — главного инженера созданного СКТБ «Керамика», с 1992 г. — директора СКТБ «Керамика». В 1997 г. СКТБ как самостоятельное предприятие вошло в состав АО «Керамика». В это время Г. Д. Бицоев занимал должность вице-президента АО «Керамика» по научной работе, в конце 1997 г. переведен на работу в Восточно-Казахстанский технический университет.

Производственная и научная база СКТБ создавалась одновременно с завершением строительства завода «Керамика». На четвертом этаже лабораторно-бытового корпуса завода был запущен опытный участок СКТБ, который имел полный технологический цикл производства тонкой технической керамики на основе BeO с соблюдением всех правил техники безопасности при работе с вредным продуктом 1-го класса опасности. Были повторены все участки основного производства завода «Керамика» с применением промышленного оборудования: приготовления формовочных масс, формообразования (прессования изделий и литья), выжигания связки, спекания изделий, механической обработки, разбраковки. Кроме того, было поставлено оборудование для новых технологических процессов: линия литья керамической пленки, пресс для вырубki из пленки керамических карт и пробивки на картах коммутационных сквозных отверстий при их двухсторонней металлизации, пресс для термического соединения (замоноличивания) многослойных карт, установка непрерывного действия для магнетронного нанесения тонких многослойных металлизационных покрытий. Одновременно проводился набор технологов и конструкторов с металлургических предприятий Усть-Каменогорска (УМЗ, СЦК, ТМК, ВКМЗ, ВНИИцветмет) и молодых специалистов ведущих вузов Казахстана и России. На четвертом этаже административного корпуса завода для работников СКТБ (технологов, конструкторов, администрации) были выделены рабочие помещения «чистой зоны». В составе СКТБ были созданы: опытно-экспериментальный участок, руководитель — **С. В. Кайгородов**; технологическая лаборатория тонкой керамики из BeO, руководитель — **В. В. Пантелеев**; технологиче-

ская лаборатория металлизационных покрытий и фотолитографии, руководитель — **С. К. Турнаев**; конструкторский отдел керамических изделий и новой техники, руководитель — **В. А. Белослудцев**. В середине 80-х годов количественный состав СКТБ (администрация, исследователи, разработчики, аппаратчики) составил 104 работника.

Основные направления работ СКТБ:

- освоение выпуска керамических изделий из BeO номенклатуры МЭП СССР в СКТБ с получением опытных партий изделий и опробованием их у заказчика;
- участие во внедрении технологических процессов в цехах завода «Керамика» и в запуске серийного производства новой продукции;
- постоянное технологическое сопровождение процессов производства изделий, участие в устранении технологических сбоев;
- выполнение НИОКР по совершенствованию оборудования и технологий основного производства завода согласно годовому плану СКТБ, согласованному с заводом «Керамика» и утвержденному Седьмым ГУ МЭП СССР;
- выполнение НИОКР по подготовке и выпуску новых изделий по плану МЭП СССР.

Базовые технологии, заложенные для выпуска керамических изделий из BeO, были сложными, затратными и малопроизводительными, начиная от стадии подготовки формовочных масс и заканчивая этапами изготовления сложнейших изделий специального назначения. Это приводило к низкому выходу годных изделий (35–40 %). Разработка и внедрение на заводе ряда новых технологических процессов с учетом дополнительной модернизации технологического оборудования позволили повысить выход годных изделий до 80–85 % при их качестве не ниже мировых стандартов и при полном сохранении экологии окружающей среды. За период работы СКТБ с 1984 по 1997 г. внедрены ультразвуковая активация при приготовлении термопластичных масс и их заливке в формы, литье керамической пленки с последующей вырубкой керамических изделий, отработана технология горячего прессования для получения оптически прозрачной BeO-керамики, внедрены в производство полирование и многолезвийная резка керамических изделий, метод магнетронного нанесения металлизационных по-

крытий, разработаны составы травителей, обеспечивающих высокую точность рисунка электрических проводников при применении фотолитографии, для получения мощных поглотителей СВЧ-излучения разработана технология синтеза BeO-керамики с добавками TiO₂. Для переработки токсичных отходов в производстве изделий были использованы термические и гидрохимические способы с целью создания замкнутого цикла производства на базе новых изобретений. Модернизированы технологическое оборудование и оснастка.

Одним из основных недостатков керамики с использованием BeO является токсичность материала в пылевидном, аэрозольном и растворимом состоянии. Поэтому впервые в мировой практике на заводе разработан и внедрен технологический процесс, включающий сбор и хранение жидких, пылевидных и твердых отходов и, главное, внедрена линия переработки всех отходов в кондиционное исходное сырье из BeO. Создан полностью замкнутый цикл производственного процесса. Полученные результаты многолетней работы защищены многими патентами и подтверждены актами внедрения.

Деятельность самостоятельного предприятия СКТБ «Керамика» прекращена в 1997 г. в связи с объединением завода «Керамика» и СКТБ «Керамика» с образованием АО «Керамика». Все работники СКТБ «Керамика» были переведены в состав АО «Керамика» и в дальнейшем составили основной руководящий, производственный и научный костяк нового предприятия. За сравнительно короткое время заводом и СКТБ было внедрено в производство более 150 типонаименований выпускаемой продукции. Достижения в области технологии и качества изделий отмечены многими дипломами, медалями и международными знаками отличия. За выпуск качественной продукции в этот период завод был награжден знаками «Золотой орел» (1996 г.), «Золотое клише» (1998 г.), «Золотое клеймо» (2006 г.).

В советский период потребителями бериллиевой керамики на постоянной основе были крупные предприятия оборонного комплекса РФ, Украины, Белоруссии, Узбекистана, Литвы, Латвии и Польши. После распада СССР заказы на продукцию завода уменьшились на 70 %. Начался период финансового выживания завода.

Используя местное сырье, завод начал параллельно осваивать продукцию, несвойственную своему назначению: пьезокерамику, пьезозажигалки, звучащие устройства, электротехнический фарфор. В процессе опытно-конструкторских работ была создана технология и внедрены в серийное производство изделия из остановочной керамики (бусы электроизоляционные чешуйчатые, втулки, вставки к электропатронам, изоляторы разных типов, основания для розеток и т. д.).

Общий спад спроса на продукцию давал о себе знать. Завод медленно шел к банкротству, рабочие увольнялись, материальные ценности утрачивались. В 1998 г. предприятие было признано банкротом при дебиторской задолженности 0,4 млн долл. США, кредиторской задолженности 1,6 млн долл. США и задолженности по заработной плате 0,6 млн долл. США. За время процедуры банкротства была создана рабочая комиссия, в ее состав вошли главные специалисты. Шла борьба за сохранение завода. Писали письма во все инстанции о том, что завод останавливать нельзя. На предприятии находился опасный продукт — оксид бериллия в различном виде. Очистку цеха провести практически невозможно. Полная остановка завода потребовала бы больших денежных затрат — около 2 млн долл. США.

Спасением для завода явилось возрождение электронной промышленности России. Комиссия из РФ изучила состояние готовности оборудования и производственных площадей в АО «Керамика», а также конкурентов по выпуску изделий из ВеО-керамики на УМЗ и приняла решение по ориентации потребителей бериллиевой керамики в АО «Керамика». Процедура банкротства закончилась продажей предприятия единым имущественным лотом в частные руки. При этом АО «Керамика» переименовали в ТОО «Альтрейд». Вновь созданное предприятие, освобожденное от долгов, было запущено в работу в мае 2000 г. Несмотря на трудности завод работает и продолжает выпускать основную продукцию — керамические изделия из ВеО. На данном этапе работу завода определяют наличие сырья и рынок сбыта продукции, поэтому поиск новых решений и технологий продолжается. За прошедшие годы усовершенствованы технологические процессы и оборудование промышленного производства керами-

ки на основе ВеО, освоена широкая номенклатура керамических изделий.

Бериллиевая керамика обладает высокими механическими, термическими и электроизоляционными свойствами, химической и радиационной стойкостью [2, 3, 5–18]. Специалисты считают, что в течение последующих 20 лет в связи с созданием новейшей ракетно-космической и авиационной техники, бурным развитием электроники потребление изделий на основе бериллия и ВеО-керамики предприятиями России должно увеличиться в 5–10 раз. Возрастет также потребление бериллия в Азиатско-Тихоокеанском регионе в секторе авиакосмической и оборонной промышленности развитых стран. Поэтому госкорпорации Ростех, Росатом и Правительство РФ планируют построить в России заводы по производству металлического бериллия и ВеО-керамики в Свердловской области на базе инвестора обособленного подразделения «Калининградский янтарный комбинат». Строительство планируется на базе руды и отвалов Малышевского изумрудного месторождения Ростеха с использованием руд Ермаковского и Завитинского месторождений ВНИИХТ [1, 2, 4]. ВНИИХТ Росатом начал отработку технологии для получения бериллиевого концентрата из руды. В настоящее время на Малышевском руднике складировано более 250 тыс. т руды [4]. Малышевское месторождение входит в тройку крупнейших в мире месторождений изумрудов вместе с Африканским изумрудным поясом и залежами самоцветов в Колумбии и Бразилии [1, 2]. Росатом проведет для Калининградского янтарного комбината технико-экономическое обоснование получения бериллия из отвалов Малышевского месторождения и других месторождений России [4]. Основными минералами, присутствующими в руде Малышевского месторождения, являются берилл, изумруд и александрит. Всего известно около 50 бериллиевых минералов, среди которых минерал берилл $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ наиболее распространен в земной коре и широко используется промышленностью для получения металлического бериллия и оксидной керамики [1, 2, 20]. Известны разновидности берилла: изумруд, аквамарин, гелиодор, роостерит, давидсонит, марганит, геленит, воробьевит и др. Среди часто встречающихся бериллийсодержащих минералов следует отметить

также минерал хризоберилл и его разновидность александрит [4].

Перспективы возрождения бериллиевой промышленности (в том числе и ВеО-керамики) в России связаны с общим подъемом производства и опережающим развитием высоких технологий. Для этого необходимо в первую очередь решить вопросы с местом строительства завода, сформулировать техзадание на проект, а также определиться со строительной частью проекта (количеством необходимых корпусов основного и вспомогательного производств), с организацией технологии производства и необходимым современным технологическим оборудованием. Кроме того, дополнительно нужно выполнить проекты по производству флотоконцентрата бериллийсодержащей руды и вскрытию руды для получения гидроксида бериллия (ГБ) или его карбоната (КБ). Необходимо также разработать технические проекты заводов для получения металлического бериллия (вероятно, методом карботермического восстановления ГБ или КБ) и керамики на основе нанопорошков ВеО.

Повышение качества керамических изделий и снижение количества брака на проектируемых производствах требует разработки и применения наиболее современных технологических процессов. Возникает необходимость разработки технологии получения нанопорошков на основе ВеО (например, в результате термовакuumного разложения ГБ или КБ) в промышленных количествах [1, 2, 20, 21]. В связи с этим проведен термодинамический анализ процесса получения нанопорошка ВеО путем термовакuumного разложения ГБ [1, 2, 20, 21]. Из него следует, что повышения дисперсности нанопорошка ВеО можно добиться увеличением скорости нагревания ГБ и дополнительным проведением процесса разложения ГБ в вакууме. В этом случае процессы дегидратации ГБ протекают значительно быстрее. Изменить дисперсность микрокристаллов ВеО можно введением в исходный ГБ готовых зародышей твердой фазы. Такими зародышами могут быть, например, включения мелкодисперсного углерода. При плавлении ГБ они остаются в твердом состоянии и играют роль естественных центров кристаллизации ВеО. Большое начальное количество центров кристаллизации приводит к значительно более мелкодисперсной конечной фазе ВеО.

Учитывая высокую токсичность высокодисперсного порошка BeO, основной проблемой при внедрении термовакuumного метода в промышленность является 100 %-ное улавливание наночастиц порошка BeO в камере в процессе его получения. В этой связи для получения нанопорошка BeO в достаточных количествах необходимо в вакуумной камере, в которой происходит нагревание ГБ, постоянно поддерживать вакуум на уровне 10^{-3} – 10^{-5} мм рт. ст. Кроме того, необходим резкий, с высокой скоростью нагрев ГБ во всем объеме материала, который можно осуществить, применяя мощные СВЧ-

печи. Очень серьезной проблемой является полное улавливание нанопорошка в вакуумной камере после термовакuumного разложения ГБ и дальнейшей работы с ним в процессе технологического передела получения оксидной керамики.

Метод получения нанопорошка BeO путем лазерной абляции BeO-керамики в промышленном масштабе не приемлем, поскольку обладает малой производительностью, составляющей всего 50–80 г/сут. Наиболее реальным и безопасным методом получения нанопорошка на данный момент является химический метод дегидратации и раз-

ложения ГБ или КБ на воздухе при атмосферном давлении. При этом получается порошок BeO, имеющий микронные размеры. В этой связи разработка промышленной технологии получения нанопорошков на основе BeO, идущих на получение изделий, является особенно актуальной.

Таким образом, с учетом наличия значительного объема бериллийсодержащего сырья в РФ, возможного широкого применения изделий из BeO-керамики в современных технических устройствах необходимо сосредоточить усилия на строительстве в России завода по производству BeO-керамики.

Библиографический список

1. **Кийко, В. С.** Состояние сырьевой базы и необходимость производства в России керамики на основе оксида бериллия / В. С. Кийко // Новые огнеупоры. — 2014. — № 2. — С. 58–60.
2. **Кийко, В. С.** Керамика на основе оксида бериллия: получение, физико-химические свойства и применение / В. С. Кийко, Ю. Н. Макурин, А. Л. Ивановский. — Екатеринбург : УрО РАН, 2006. — 440 с.
3. **Беляев, Р. А.** Окись бериллия / Р. А. Беляев. — М. : Атомиздат, 1980. — 221 с.
4. **Степанов (Дзагуто), В.** На изумрудном руднике ищут бериллий. РФ возобновляет добычу стратегического металла / В. Степанов (Дзагуто) // Газета «Коммерсант». — 2017. — № 10 (190). — С. 9.
5. **Вайспапир, В. Я.** Бериллиевая керамика для современных областей техники / В. Я. Вайспапир, В. С. Кийко // Вестник воздушно-космической обороны. — 2018. — № 1 (17). — С. 59–69.
6. **Андрианов, Н. Т.** Химическая технология керамики : уч. пособие для вузов / Н. Т. Андрианов, В. Л. Балкевич, А. В. Беляков [и др.] ; под ред. И. Я. Гузмана. — М. : РИФ «Стройматериалы», 2012. — 496 с.
7. **Кийко, В. С.** Теплопроводность и перспективы применения BeO-керамики в электронной технике / В. С. Кийко, В. Я. Вайспапир // Стекло и керамика. — 2014. — № 11. — С. 12–16.
8. **Акишин, Г. П.** Свойства оксидной бериллиевой керамики / Г. П. Акишин, С. К. Турнаев, В. Я. Вайспапир [и др.] // Новые огнеупоры. — 2010. — № 10. — С. 42–47.
9. **Akishin, G. P.** Composition of beryllium oxide ceramics / G. P. Akishin, S. K. Turnaev, V. Ya. Vaispapor [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2010. — Vol. 51, № 5. — P. 377–381.
10. **Ивановский, А. Л.** Электронная структура и свойства оксида бериллия / А. Л. Ивановский, И. Р. Шеин, Ю. Н. Макурин [и др.] // Неорган. материалы. — 2009. — Т. 45, № 3. — С. 263–275.
11. **Акишин, Г. П.** Теплопроводность бериллий-оксидной керамики / Г. П. Акишин, С. К. Турнаев, В. Я. Вайспапир [и др.] // Новые огнеупоры. — 2009. — № 12. — С. 43–47.
12. **Akishin, G. P.** Thermal conductivity of beryllium oxide ceramic / G. P. Akishin, S. K. Turnaev, V. Ya. Vaispapor [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2009. — Vol. 50, № 6. — P. 465–468.
13. **Кийко, В. С.** Скорость распространения и поглощение ультразвука в керамиках на основе BeO, Al₂O₃, ZrO₂ и SiO₂ / В. С. Кийко, Ю. И. Комоликов, Ю. Н. Макурин [и др.] // Неорган. материалы. — 2007. — Т. 43, № 12. — С. 1510–1514.
14. **Шеин, И. Р.** Упругие параметры моно- и поликристаллических вюрцитоподобных BeO и ZnO: первопринципные расчеты / И. Р. Шеин, В. С. Кийко, Ю. Н. Макурин [и др.] // ФТТ. — 2007. — Т. 49, вып. 6. — С. 1015–1020.

13. **Пат. 2326091 Российская Федерация.** Способ получения электропроводной керамики на основе оксида бериллия / Кийко В. С., Ивановский А. Л., Акишин Г. П., Макурин Ю. Н. ; заявитель и патентообладатель — ГОУ ВПО УГТУ-УПИ и ИХТТ УрО РАН. — № 2005140821/03 (045452) ; заявл. 26.12.05 ; опубл. 10.06.08, Бюл. № 19.
14. **Кийко, В. С.** Получение, физико-химические свойства и пропускание СВЧ-излучения керамикой на основе BeO / В. С. Кийко, С. Н. Шабунин, Ю. Н. Макурин // Огнеупоры и техническая керамика. — 2004. — № 10. — С. 8–17.
15. **Кийко, В. С.** Прозрачная бериллиевая керамика для лазерной техники и дозиметрии ионизирующего излучения / В. С. Кийко // Новые огнеупоры. — 2004. — № 5. — С. 40–48.
16. **Kiiko, V. S.** Transparent beryllia ceramics for laser technology and ionizing radiation dosimetry / V. S. Kiiko // Refract. Ind. Ceram. — 2004. — Vol. 45, № 4. — P. 266–272.
17. **Кийко, В. С.** Микроструктура и электропроводность композиционной (BeO + TiO₂)-керамики / В. С. Кийко, М. А. Горбунова, Ю. Н. Макурин [и др.] // Новые огнеупоры. — 2008. — № 11. — С. 68–74.
18. **Кийко, В. С.** Композиционная (BeO + TiO₂)-керамика для электронной и других областей техники / В. С. Кийко, А. В. Павлов // Новые огнеупоры. — 2017. — № 12. — С. 64–70.
19. **Kiiko, V. S.** Composite (BeO + TiO₂)-ceramic for electronic engineering and other fields of technology (Review) / V. S. Kiiko, A. V. Pavlov // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 6. — P. 687–692.
20. **Кийко, В. С.** Получение и теплофизические свойства BeO-керамики с добавками нанокристаллического диоксида титана / В. С. Кийко, А. В. Павлов, В. А. Быков // Новые огнеупоры. — 2018. — № 11. — С. 57–63.
21. **Kortov, V. S.** New BeO ceramics for TL-ESR dosimetry / V. S. Kortov, I. I. Milman, A. I. Slesarev, V. S. Kijko // Radiation Protection Dosimetry. Nucl. Technol. — 1993. — Vol. 47, № 1/4. — P. 267–270.
22. **Кийко, В. С.** Микроструктура порошка оксида бериллия в процессе технологического передела / В. С. Кийко // Новые огнеупоры. — 2015. — № 12. — С. 34–41.
23. **Kiiko, V. S.** Beryllium oxide powder microstructure during production processing / V. S. Kiiko // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 6. — P. 656–663.
24. **Кийко, В. С.** Особенности термовакuumного разложения гидроксида и основного карбоната бериллия / В. С. Кийко, Ю. Н. Макурин, И. Д. Кашеев [и др.] // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. — 1987. — Т. 23, № 12. — С. 2012–2015. ■

Получено 25.03.19

© Г. П. Акишин, В. С. Кийко, 2019 г.