



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-88-95>
УДК 666.7+666.76:621.762.4

Поступила 14.02.2023
Received 14.02.2023

О ПРОБЛЕМАХ И РЕЗУЛЬТАТАХ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА. СООБЩЕНИЕ 1

Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: panteleyenkofi@tut.by
Р. Ю. ПОПОВ, Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а
В. Т. ШМУРАДКО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65
А. С. САМСОНОВА, Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а

В статье приведены результаты исследований в области синтеза многофункциональных керамических материалов для металлургической, станкостроительной и других отраслей, связанных с обработкой металлов, их сплавов и изделий из них; современные направления и тенденции, сопряженные с получением изделий из таких материалов. Приведены сведения по расширению отечественной сырьевой базы для производства керамики с привлечением отечественных предприятий, а также перспективы развития промышленного потенциала для организации производства подобных изделий.

Ключевые слова. *Металлургия, металлообработка, керамические материалы и изделия, сырьевые материалы, синтез, физико-технические характеристики, производство.*

Для цитирования. *Пантелеенко, Ф.И. О проблемах и результатах получения изделий из технической керамики для металлургического производства. Сообщение 1. / Ф.И. Пантелеенко, Р.Ю. Попов, В.Т. Шмурадко, А.С. Самсонова // Литье и металлургия. 2023. № 1. С. 88–95. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-88-95>.*

ABOUT THE PROBLEMS AND RESULTS OF OBTAINING PRODUCTS FROM TECHNICAL CERAMICS FOR METALLURGICAL PRODUCTION. MESSAGE 1

F. I. PANTELEENKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: panteleyenkofi@tut.by
R. Yu. POPOV, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str.
V. T. SHMURADKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
A. S. SAMSONOVA, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str.

The article presents the research's results in the field of multifunctional ceramic materials synthesis for metallurgical, machine-tool and other branches related to the metal treatment, their alloys and products from them; current trends and tendencies associated with the production of goods from such materials. The information on expanding the local raw material sources for the production of ceramics with the involvement of local enterprises is provided. In addition, the prospects for the industrial potential development to produce such goods are observed.

Keywords. *Metallurgy, metalworking, ceramic materials and products, raw materials, synthesis, physical and technical characteristics, production.*

For citation. *Panteleenko F.I., Popov R. Yu., Shmuradko V.T., Samsonova A.S. About the problems and results of obtaining products from technical ceramics for metallurgical production. Message 1. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 88–95. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-88-95>.*

Керамика является исторически одним из наиболее древних конструкционных материалов, используемых человеком. С середины прошлого столетия ее относительная доля значительно возросла и составляет по некоторым оценкам в группе основных конструкционных материалов, включающей также металлы, полимеры, композиты, более одной четверти [1–6] (рис. 1).

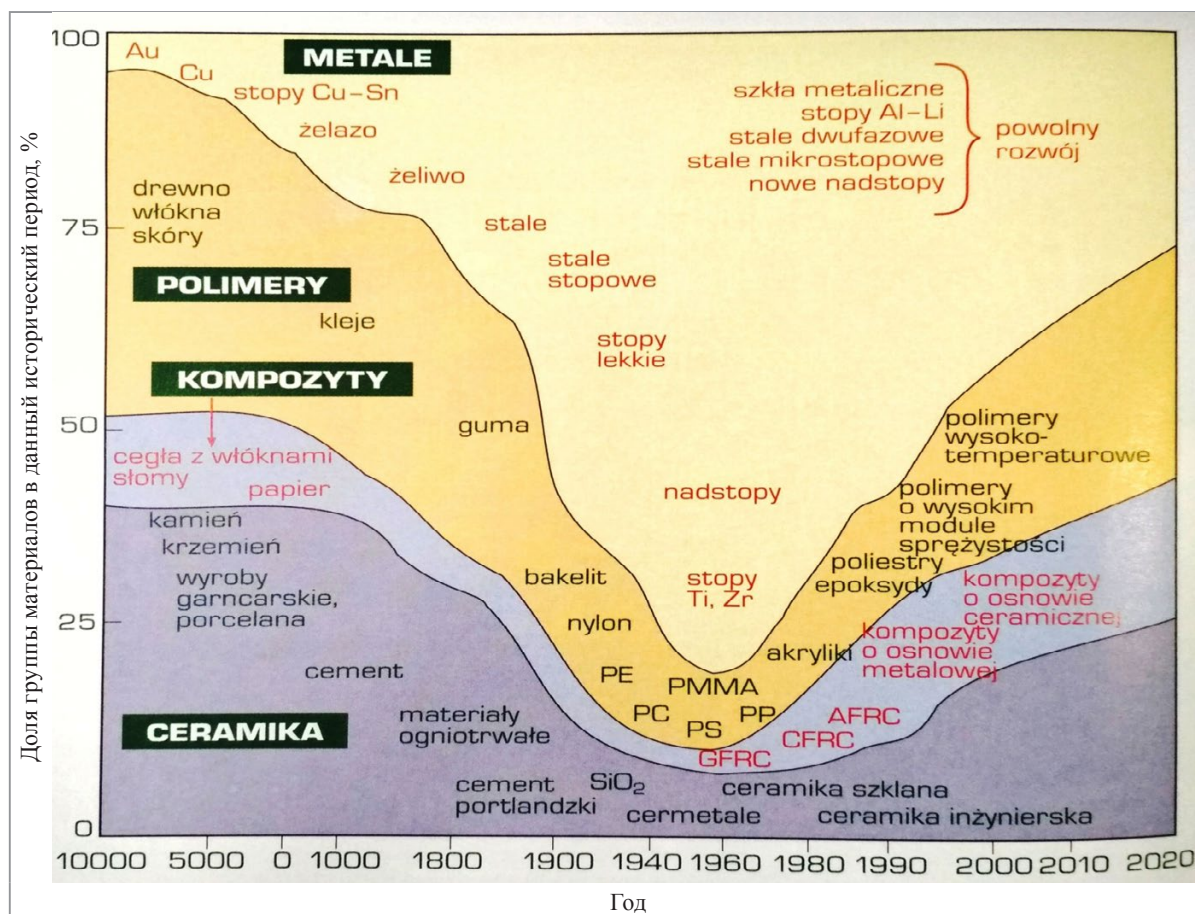


Рис. 1. Развитие технологии производства синтетических материалов

Техническая керамика является сравнительно новым видом керамики и по темпам роста ежегодного выпуска (от 15 до 25%) значительно превышает аналогичные показатели для металлов [1]. Благодаря уникальному комплексу физических, химических и в целом эксплуатационных свойств (высокая твердость и износостойкость, устойчивость к агрессивным средам, термическая стойкость и стабильность, специальные электротехнические свойства и другие) она находит широкое применение в машиностроении, металлургии, строительстве, атомной и оборонной промышленности, медицине и ряде других отраслей [1–9]. Основными составляющими современной керамики являются оксиды, карбиды, нитриды, твердые растворы на их базе, комплексные химические соединения, гетеросистемы. Лидируют в вопросах создания керамики с наиболее высоким комплексом свойств технологически развитые страны мира.

Над решением задачи производства качественных керамических материалов–изделий работают исследователи и специалисты многих стран и оно, как правило, не является однозначным, поскольку требует комплексного подхода и учета многих факторов на всех этапах технологической цепочки от выбора оптимальных химических составов и гранулометрии каждого из компонентов шихты, активации, параметров и способов формообразования, температурных режимов спекания и до окончательной финишной обработки. К сожалению, ввиду сложности химических, фазовых, твердорастворных, эвтектических, перитектических и иных превращений, протекающих на всех этапах воздействия на шихтовые смеси и реакционные растворы, активации и тепловой обработки, поиск оптимальных решений, как правило, невозможен путем постановки и решения оптимизационных задач и требует совместной работы материаловедов, химиков, физиков, механиков, технологов и некоторых других специалистов для проведения преимущественно многочисленных экспериментальных исследований. Базовые принципы создания керамических материалов–изделий включают выбор техногенного минерального сырья, составление порошковых составов, процессы структурирования требуемых свойств с помощью технологических приемов, т.е. реализацию формулы состав – технология – структура – свойства – изделие.

В БНТУ и БГТУ за последние более чем два десятилетия созданы лабораторно-технологические участки, разработаны научно-практические методологические подходы проектирования и создания конкретных материалов–изделий из керамики.

Разработан ряд инновационных керамических материалов–изделий на основе оксидных и бескислородных химических соединений на уровне композиций из минеральных порошковых систем (рис. 2), которые широко применяются в реальном секторе экономики либо успешно прошли производственные испытания и качественное тестирование на предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации: в Республике Беларусь – ОАО «БМЗ – УКХ – «БМК» (г. Жлобин) – керамические поддерживающие ролики для производства металлокорда и проволоки катанки; двухслойные корундо-диоксидциркониевые стаканы-дозаторы (СД) для промковшей МНЛЗ; ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси – огнеупорные воронки для дозирования в центрифугу расплавов чугунов, алюминиевых, черных, нержавеющей сталей и сплавов; в России – НПП «Изумруд» (г. Санкт-Петербург) – капиллярно-проницаемые диафрагмы (КПД) без и с тонкопленочными (ионно-плазменными и магнетронными) функциональными покрытиями для электрохимических реакторов (ЭХР) энергетической обработки и структурирования воды и водных растворов в физико-химические реагенты бытового, сельскохозяйственного, медицинского (антибактериального, противовирусного) и другого назначения; АО «Гормаш» (г. Белгород) – высокотемпературные

<p>Износостойкие поддерживающие ролики для производства металлокорда и проволоки катанки ОАО «БМЗ – УКХ – «БМК», г. Жлобин</p> 	<p>Износостойкие (триботехнические) уплотнительные элементы для высокооборотистого оборудования холодильных установок</p> 	<p>Абразивно-износостойкие дюзы для риммеров подземной проходки грунтов с последующим бетонированием каналов</p> 
<p>Тигли огнеупорные, одно- и двухслойные; назначение – работа в плавильно-литевом оборудовании с расплавами углеродистых, черных, цветных и нержавеющей сталей и сплавов</p> 	<p>Огнеупорные термостойкие плавильно-литевые тигли для производства зубных протезов в стоматологии</p> 	<p>Огнеупорные термостойкие эрозивно-эрозийноустойчивые воронки: а – для дозирования алюминиевых сплавов; б – черных и нержавеющей сталей и сплавов; в – чугунов в центрифугу</p> 
<p>Двухслойные огнеупорные термостойкие эрозивно-эрозийноустойчивые стаканы-дозаторы: а – с диоксидциркониевыми вставками; б – для промковшей МНЛЗ; ОАО «БМЗ – УКХ – «БМК» (г. Жлобин)</p> 	<p>Двухслойные термостойкие эрозивно-эрозийноустойчивые стаканы-дозаторы (СД) шибберного типа для промковшей МНЛЗ; ОАО «БМЗ – УКХ – «БМК» (г. Жлобин)</p> 	<p>Тепловые термостойкие экраны для станков клиновой прокатки (1, 2); плавильно-литевых установок драгметаллов (3); производства оптического волокна (4)</p> 

<p>Огнеупорные (1200 °С) теплоизоляционные материалы-изделия из термовспученного вермикулита (ТВВ)</p> 	<p>Термостойкие электроизоляторы (а); структура (б); назначение – работа в тормозных электро-трансмиссиях УВТР 2х750 БелАЗ</p> 	<p>Электроизоляторы; назначение – автоматическая сварка трубчатых биметаллических элементов</p> 
<p>Электроизолятор; назначение – работа в электронно-лучевой пушке ЭЛА 30/60 в режиме вакуумной сварки толстостенных (50–150 мм) конструкций из алюминиевых сплавов</p> 	<p>Высокотемпературные электроизоляторы: а – для вакуумных печей; б – газотермического упрочнения (1050 °С x 10,5 ч) бурового инструмента массой загрузки 2 т в среде диссоциированного ацетилена (фирма «Ipson», Германия)</p> 	
<p>Заготовка (прессовка): а – полученная изостатическим прессованием для изготовления высокоэнергетических топливных электродов-монокристаллов (термоэммиттеров); б – для плазменных ракетных двигателей (ПРД)</p> 	<p>Установки: а – «Изумруд»; б – «АКВАЭХА» для энергетической обработки и структурирования воды и водных растворов в функциональные реагенты в ЭХР при помощи КПД (НПП «Изумруд», г. Санкт-Петербург). Пористые капиллярно-проницаемые диафрагмы (КПД) для электрохимических реакторов (ЭХР) энергетической обработки и структурирования воды и водных растворов в физико-химические реагенты бытового, сельскохозяйственного, антимикробного, антибактериального и др. назначения: в – КПД без и г – с функциональными тонкопленочными (ионно-плазменными, магнетронными) покрытиями, активирующими электрохимические процессы и механизмы структурирования различных химических реагентов</p> 	
<p>Термостойкие кордиеритсодержащие элементы тепловых агрегатов длительной эксплуатации (втулки) на малый индуктор гибочного комплекса КГ 45-80.02.00.000 производства Грядили ППН 8.30/50-314 ОАО «Минский завод шестерен» (г. Минск)</p> 	<p>Термостойкие кордиеритсодержащие элементы тепловых агрегатов индукционных печей для термообработки металлических изделий ООО «Инженерный центр «АМТинжиниринг (г. Минск), ОАО «Трест Шахтоспецстрой» (г. Солигорск)</p> 	

Рис. 2. Материалы – изделия (МТО) из технической керамики

электроизоляторы для вакуумных печей (фирмы «Ipson», Германия) газотермического упрочнения (1050 °С×10,5 ч) бурового инструмента (масса загрузки – 2 т) в среде диссоциированного ацетилена; АО ОКБ «Факел» (г. Калининград) – высокоэнергоемкие топливные электроды (термоэммиттеры) для космических плазменных реактивных двигателей (ПРД); термостойкие изделия на основе кордиерита

для индукционных печей, применяющихся при обработке изделий из металлов на ОАО «Минский завод шестерен», ООО «Инженерный центр «АМТинжиниринг, ОАО «Трест Шахтоспецстрой» и др.

Исследования, проводимые совместными усилиями сотрудников БНТУ и БГТУ, направлены на решение важнейших и актуальных на сегодняшний день вопросов – импортозамещения, ресурсосбережения, вовлечения и развитие местной сырьевой базы, а также организации производства технических керамических материалов в Республике Беларусь, востребованных как отечественными, так и зарубежными предприятиями.

В основе выбора ингредиентов для требуемого керамического материала–изделия положена аналитическая блок-схема направленного выбора ингредиентов для создания базовых конструкционных, функциональных, керамоогнеупорных и других керамических материалов–изделий (рис. 3).

Нами при разработке, создании и реализации термокоррозионно-эрозионностойких керамоогнеупорных и других материалов–изделий (см. рис. 2) применялись следующие тугоплавкие соединения ($T_{пл}$) (рис. 3): оксиды, нитриды, карбиды, бориды и их композиционные системы на основе Al_2O_3 (2050 °C), MgO (2800 °C), SiO_2 (1730 °C), CaO (2614 °C), Cr_2O_3 (2299 °C), ZrO_2 (2700 °C), SiC (2730 °C), B_4C (2350 °C), BN (3000 °C), Si_3N_4 (1900 °C), AlN (2200 °C), AlB_2 (2200 °C), TiB_2 (3230 °C), алюмомагниева

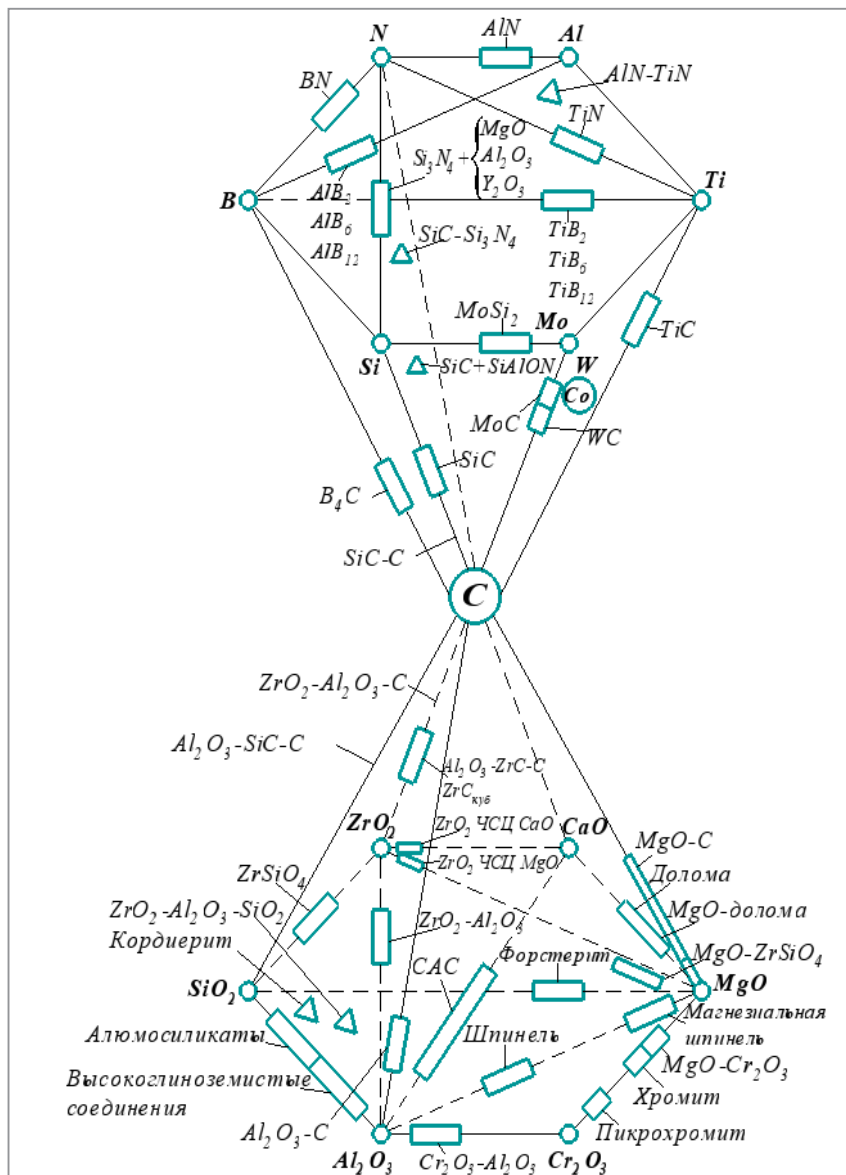


Рис. 3. Блок-схема выбора ингредиентов для направленного создания базовых конструкционных, функциональных, керамоогнеупорных, электротехнических и других материалов–изделий из технической керамики на основе природного минерального и техногенного сырья ($Me_xO_y - Me^I_xO_y$; $Me_xO_y - Me^I_xO_y - Me^{II}_xO_y$; $Me_xO_y - Me^I C - C$; MeN ; MeB ; BC) для различных профильных технологических областей и отраслей промышленности: С – углерод; В – бор; N – азот; К – кордьерит ($2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$); $CA_2 - CA$ – высокоглиноземистый цемент ($CaO \cdot 2Al_2O_3 - CaO \cdot Al_2O_3$)

шпинель $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ (2800 °C), муллит $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (1910 °C), каолинит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (1770 °C), силлиманит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ (1860 °C), кордиерит $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{MgO} \cdot 5\text{SiO}_2$ (1470 °C), монтичеллит $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ (1500 °C), форстерит $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ (1890 °C), доломит $\text{MgO} \cdot \text{CaO}$ (2600 °C), циркон $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ (1855 °C), диоксиды циркония, частично стабилизированные оксидами кальция, магния, иттрия и др., ZrO_2 ЧСЦ CaO , ZrO_2 ЧСЦ MgO , ZrO_2 ЧСЦ Y_2O_3 (более 2690 °C).

Важнейшими этапами получения керамических материалов и изделий из них являются размол и активация порошков, формование (прессование, в том числе изостатическое, шликерное литье и виброформование или иные способы) заготовок, тепловая обработка и спекание, заключительная механическая обработка.

При выборе конкретного способа формования руководствовались следующими основными факторами (показателями): конфигурацией и размерами изделий; требуемой плотностью порошковой системы; усадкой и точностью размеров изделий; составом и свойствами материалов; масштабом производства; экономическими показателями.

Как уже было отмечено, каждая стадия технологического процесса очень важна для получения конечных требуемых свойств, однако ключевыми являются три наиболее важных этапа: выбор химического состава, гранулометрический состав и цикл термического спекания.

Так, при разработке огнеупорной оксидной керамики на основе Al_2O_3 с добавками MgO , ZrO_2 , CaO , SiO_2 прогноз свойств начинается именно на этапе выбора химического состава и анализа диаграммы состояния [4–7]. От соотношения компонентов зависят особенности последующего технологического процесса, особенно стадий процесса спекания. Последнее влияет на фазовую кристаллическую решетку и фазовый состав, а также на эксплуатационные свойства продукта. Измельчение выбранной оксидной смеси приводит к ее активации. Особенно важным моментом является получение наноразмерных частиц с большим количеством дефектов структуры. Последние играют значительную роль в процессе спекания как источник вакансий при действии механизма диффузии вакансий. Кроме того, размер частиц влияет на особенности процесса прессования, усадку и плотность конечного продукта.

Проведенные исследования по вопросам регулирования соотношения мелких и крупных фракций смесей керамических масс, изменения плотности и размеров на разных этапах технологии позволяют:

- выбрать оптимальное соотношение компонентов для обеспечения максимальной плотности;
- исключить растрескивание и изменение геометрии при транспортировке и спекании полуфабрикатов, особенно тонкостенных;
- прогнозировать конечные размеры спеченных керамических деталей с целью минимизации чистой обработки резанием (шлифованием).

Замечено [4] аномальное поведение в области относительно малых размеров частиц менее 70 мкм. Компакты из таких составов имеют максимальные изменения плотности, пористости, размеров и массы при прессовании и спекании. Это следует учитывать на этапах проектирования и изготовления инструмента во всей технологической цепочке для производства оксидной керамики. Существует необходимость в более детальном исследовании изменений и поведения системы с гранулометрическим составом основного зерна менее 70 мкм.

Сложность цикла термического спекания и значение температуры спекания обычно устанавливают на основании двух предыдущих факторов. Особенно важно исходное соотношение химических компонентов, которое определяет температуру спекания на основе диаграммы состояния. Следует отметить, что прогнозирование результатов в случае многокомпонентных диаграмм состояний намного сложнее, чем для двухкомпонентных.

Таким образом, анализ состояния вопроса создания керамических материалов–изделий с заданными высокими свойствами и полученных нами результатов [5–7, 10–15] показывает необходимость комплексного тщательного подхода на всех этапах технологической цепочки от выбора ингредиентов, их гранулометрического состава, способов активации шихты, формования, спекания до механической или иной финишной обработки в рамках реализации заданной программно-методической формулы (схемы) «состав–структура – свойство» – «проектируемый материал».

В последнее время наиболее актуальными вопросами машиностроения являются решение проблем, связанных с импортозамещением, а также максимальным вовлечением отечественных сырьевых материалов в производства, напрямую или косвенно соприкасающиеся с указанными направлениями промышленной деятельности. К сожалению, не всегда и не по всем потребностям возможно осуществить замену материалов и изделий, используя отечественную сырьевую базу. Так, например, в республике

отсутствуют промышленные предприятия, ориентирующиеся на выпуске огнеупорных материалов и технической керамики, что связано прежде всего со скудностью минерально-сырьевой базы страны, а также недостаточной мощностью топливно-энергетических ресурсов (отсутствием газовых месторождений и небольшим объемом добываемой нефти). Эти факторы осложняют развитие указанных направлений, однако применение селективных (избирательных) способов применения имеющихся природных сырьевых материалов позволяет обратить внимание на подобный подход к частичному замещению востребованных промышленностью материалов.

В настоящий момент совместно с сотрудниками кафедры технологии стекла и керамики УО БГТУ и научно-исследовательской испытательной лаборатории сварки, родственных технологий и неразрушающего контроля (НИИЛ СРТ и НК) БНТУ проводятся научно-исследовательские работы, направленные на использование отечественных природных сырьевых материалов (глин, каолинов) для получения термостойкой технической керамики, широко используемой в металлургии, машино- и авиастроении, станкостроении, изготовлении металлической оснастки, промышленных и бытовых тепловых агрегатах и т.д. В качестве сырья для получения таких материалов применяют синтетические (оксиды, бескислородные соединения) и природные компоненты (в большинстве случаев силикаты).

Наиболее перспективными являются керамические кордиеритовые, муллито-кордиеритовые материалы, характеризующиеся высокой термостойкостью, достаточной прочностью, химической устойчивостью и необходимым электросопротивлением.

Изделия на основе указанного вида керамики используют в качестве конструкционных в тепловых установках и агрегатах, а также в качестве отдельных элементов, применяющихся в устройствах, подверженных воздействию нестационарного теплового поля (лещадок, подставок, опор, колец индукторов, держателей нагревателей и т.д.) при одновременном воздействии электрического поля.

Данные керамические материалы и изделия промышленно не производятся на предприятиях Республики Беларусь, а являются предметом импорта (из Украины, России, Германии, Японии и Китая и т.д.), но при этом применяются в значительных количествах.

Потребители такой продукции – металлургические производства, машиностроительная и станкостроительная отрасли, химическая промышленность и т.д. Изделия на основе кордиерита широко применяются в БСЗ ЗАО «Атлант», ОАО «Минский завод шестерен», ОАО «Гомсельмаш», ОАО «Борисовский завод «Автогидроусилитель», ООО «Инженерный центр «АМТинжиниринг, ОАО «Трест Шахтоспецстрой», ПРУП «Борисовский станкостроительный завод» и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Матренин С.В., Слосман А.И.** Техническая керамика. Томск. Изд-во ТПУ, 2004. 75 с.
2. **Ashby M., Johnson K.** Materials and Design. The Art and Science of Materials Selection in Product Design. Amsterdam – Boston – Heidelberg – London – New-York – Oxford – Paris – San-Diego – San-Francisco – Singapore – Sidney – Tokyo: Butterworth-Heinemann, 2003. 416 p.
3. **Leszek A. Dobranski.** Metalowe materialy inzynierskie. Gliwice-Warszawa: WNT, 2004. 916 p.
4. **Panteleyenko F., Kuczumow A., Sieniawski J. et. al.** Mechanisms of technical ceramic density adjusting // X International Scientific and Practical Conference «Innovations in Mechanical Engineering» (ISPCIME-2019). Kemerovo, Russia, 2019. P. 1–9.
5. **Panteleyenko F.I., Shmuradko V.T., Reut O.P., Rudenskaya N.A. et. al.** Material science principles and technological solutions for the development, creation and use of wear-resistant corundum materials-products for underground tunneling mechanisms and metal cord production // Glass and Ceramics. 2016. Vol. 89. No. 9. P. 16–22.
6. **Pantsialeynka F., Kuczumov A., Shmuradko V., Pantsialeynka K.** Oxide ceramic and refractory materials for metallurgical processes and industries // The 73rd World Foundry Congress. Krakow, Poland, 2018. P. 465–466.
7. **Panteleyenko F.I., Shmuradko V.T., Reut O.P. et. al.** Physical-chemical processes and mechanism for preparing Belaz quarry dumper truck heat-resistant electrical insulators // Refractories and industrial ceramics. 2017. Vol. 57. No. 6. P. 614–617.
8. **Стрелов К.К.** Теоретические основы технологии огнеупорных материалов. М.: Металлургия, 1985. 480 с.
9. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания: справ. / Под ред. Г. Роучка и Х. Вутнау. М.: Интермет Инжиниринг, 2010. 391 с.
10. Техническая керамика: материаловедческо-технологические принципы и механизмы разработки и реализации керамических электроизоляторов различного научно-практического назначения / В.Т. Шмурадко [и др.] // Новые огнеупоры. 2020. № 9. С. 14–24.
11. Способ получения износостойкого керамического материала на основе оксида алюминия: пат. ВУ 23555, В35/04С1, В35/64С1 / В.Т. Шмурадко, Ф.И. Пантелеенко, О.П. Реут, Н.А. Руденская, Е.Ф. Пантелеенко; заявитель Белорусский национальный технический университет. Заяв. № а 20180517; заявл. 14.12.2018; опубл. 30.10.2021.
12. Шихта для получения керамоогнеупорного материала: пат. ВУ 23147, В35/106С1 / В.Т. Шмурадко, Ф.И. Пантелеенко, О.П. Реут, Н.А. Руденская; заявитель Белорусский национальный технический университет. Заяв. № а 20180516; заявл. 14.12.2018; опубл. 30.10.2020.

13. Керамическое вяжущие: пат. ВУ 21214, В35/185, В35/10, В35/14 / В.Т. Шмурадко, Ф.И. Пантелеенко, О.П. Реут, Н.В. Киршина, В.И. Овчинников, М.О. Степкин; заявитель Белорусский национальный технический университет. Заяв. № а 20140078; заявл. 28.01.2014; опубл. 30.08.2017.
14. Композиция для получения пористого керамического материала: пат. ВУ 22094 / В.Т. Шмурадко, Ф.И. Пантелеенко, О.П. Реут, Н.В. Киршина; заявитель Белорусский национальный технический университет. Заяв. № а 20130894; заявл. 25.07.2013; опубл. 30.08.2018.
15. Способ получения пористого керамического материала: пат. ВУ 21974. В38/00С1/ В.Т. Шмурадко, Ф.И. Пантелеенко, О.П. Реут, Н.В. Киршина; заявитель Белорусский национальный технический университет. Заяв. № а 20130895; заявл. 25.07.2013; опубл. 30.06.2018.

REFERENCES

1. **Matrenin S.V., Slosman A.I.** *Tehnicheskaja keramika* [Technical ceramics]. Tomsk, izdatel'stvo TPU Publ., 2004, 75 p.
2. **Ashby M., Johnson K.** *Materials and Design. The Art and Science of Materials Selection in Product Design.* Amsterdam – Boston – Heidelberg – London – New-York – Oxford – Paris – San-Diego – San-Francisco – Singapore – Sidney – Tokyo: Butterworth-Heinemann, 2003, 416 p.
3. **Leszek A. Dobranski.** *Metalowe materialy inzynierskie.* Gliwice-Warszawa, WNT, 2004, 916 p.
4. **Panteleyencko F., Kuczumow A., Sieniawski J. et. al.** Mechanisms of technical ceramic density adjusting. X International Scientific and Practical Conference «Innovations in Mechanical Engineering» (ISPCIME-2019). Kemerovo, Russia, 2019, pp. 1–9.
5. **Panteleyencko F.I., Shmuradko V.T., Reut O.P., Rudenskaja N.A. et. al.** Material science principles and technological solutions for the development, creation and use of wear-resistant corundum materials-products for underground tunneling mechanisms and metal cord production. *Glass and Ceramics*, 2016, vol. 89, no. 9, pp. 16–22.
6. **Pantsialejenka F., Kuczumow A., Shmuradko V., Pantsialejenka K.** Oxide ceramic and refractory materials for metallurgical processes and industries. *The 73rd World Foundry Congress. Krakow, Poland*, 2018, pp. 465–466.
7. **Panteleyencko F.I., Shmuradko V.T., Reut O.P. et. al.** Physical-chemical processes and mechanism for preparing Belaz quarry dumper truck heat-resistant electrical insulators. *Refractories and industrial ceramics*, 2017, vol. 57, no. 6, pp. 614–617.
8. **Strelov K.K.** *Teoreticheskie osnovy tehnologii ognepornyh materialov* [Theoretical foundations of technology of refractory materials]. Moscow, Metallurgija Publ., 1985, 480 p.
9. *Ogneupornye materialy. Struktura, svojstva, ispytaniya* [Refractory materials. Structure, properties, tests]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2010, 391 p.
10. **Shmuradko V.T. et. al.** Tehnicheskaja keramika: materialovedchesko-tehnologicheskie principy i mehanizmy razrabotki i realizacii keramicheskikh jelektroizoljatorov razlichnogo nauchno-prakticheskogo naznachenija [Technical ceramics: materials science and technology principles and mechanisms for the development and implementation of ceramic electrical insulators for various scientific and practical purposes]. *Novye ognepory = New refractories*, 2020, no. 9, pp. 14–24.
11. **Shmuradko V.T., Panteleencko F.I., Reut O.P., Rudenskaja N.A., Panteleencko E.F.** *Sposob poluchenija iznosostojkogo keramicheskogo materiala na osnove oksida aljuminija* [Method for producing wear-resistant ceramic material based on aluminum oxide]. Patent BY 23555, В35/04S1, В35/645S1, 30.10.2021.
12. **Shmuradko V.T., Panteleencko F.I., Reut O.P., Rudenskaja N.A., Panteleencko E.F.** *Shihta dlja poluchenija keramoogneupornogo materiala* [Charge for obtaining ceramic refractory material]. Patent BY 23147, В35/106С1, 30.10.2020.
13. **Shmuradko V.T., Panteleencko F.I., Reut O.P., Kirshina N.V., Ovchinnikov V.I., Stepkin M.O.** *Keramicheskoe vjazhushhie* [Ceramic binders]. Patent BY 21214, В35/185, В35/10, В35/14 /, 30.08.2017.
14. **Shmuradko V.T., Panteleencko F.I., Reut O.P., Kirshina N.V.** *Kompozicija dlja poluchenija poristogo keramicheskogo materiala* [Composition for obtaining a porous ceramic material]. Patent BY 22094, 30.08.2018.
15. **Shmuradko V.T., Panteleencko F.I., Reut O.P., Kirshina N.V.** *Sposob poluchenija poristogo keramicheskogo materiala* [Method for producing porous ceramic material]. Patent BY 21974. В38/00С1, 30.06.2018.