

Д. т. н. **О. В. Роман**¹, **В. Т. Шмурадко**¹ (✉), д. т. н. **Ф. И. Пантелеенко**¹,
д. т. н. **О. П. Реут**¹, к. т. н. **Т. И. Бендик**¹, **Н. А. Шмурадко**¹, д. т. н. **Л. В. Судник**²,
В. И. Бородавко³, **А. Н. Кизимов**⁴, **В. В. Клавкина**⁴

¹ Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

² ОХП «НИИ импульсных процессов с опытным производством» ГНУ ИПМ НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

³ НПО «Центр» НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

⁴ ЗАО «ГОРМАШ» ПКП «Буровой инструмент», Белгород, Россия

УДК 666.651:669.14.18.62

ТЕХНИЧЕСКАЯ КЕРАМИКА: МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ И МЕХАНИЗМЫ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ КЕРАМИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯТОРОВ РАЗНОГО НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Сформирована концепция создания электроизоляционных керамических материалов-изделий из порошковых систем, представляющих собой оксидные и неоксидные химические соединения; создан и реализован программный документ материаловедческо-технологической логики физико-химического превращения техногенного минерального сырья в электротехнические материалы-изделия разного научно-практического и конкретного технологического назначения. Рассмотрены принципиальный теоретический подход и его практические, прикладные аспекты разработки, исследования, создания термо- и химически стойких электропрочных конструктивных электроизоляционных материалов-изделий для автоматической контактной сварки трубчатых биметаллов (медь – алюминий), электронно-лучевой сварки в вакууме толстостенных крупногабаритных конструкций из высокопрочных алюминиевых сплавов, высокотемпературного (1050 °С) упрочнения бурового инструмента в вакуумных печах в среде диссоциированного ацетилена, в электротрансмиссиях тормозных установок карьерных самосвалов БелАЗ.

Ключевые слова: техническая керамика, керамические электроизоляторы, зонная структура, энергетический зазор (запретная зона), электронно-лучевая сварка, контактная сварка, газотермическое упрочнение, буровой инструмент.

Фундаментальные, прикладные и практические проблемы материаловедческо-технологического подхода к созданию диэлектриков-электроизоляторов из технической керамики тесно связаны с физической химией, физикой и химией твердого тела, его зонной структурой (зонной теорией), в которых энергетические (электронные) зоны каждого материала при конкретных внешних условиях строго сохраняют свою индивидуальность.

Основными определяющими характеристиками электроизоляторов являются диэлектрическая проницаемость и диэлектри-

ческие потери, электрическая прочность, а также характер частотной и температурной зависимостей этих свойств. Следует отметить, что основное большинство электротехнических свойств и характеристик диэлектриков является структурно-чувствительными и зависят от таких параметров, как химический и фазовый составы, степень кристалличности, размер кристаллов и поликристаллов, структура, пористость, и особенно от структурных факторов и их показателей на электронно-ионном, атомарно-молекулярном, кристаллохимическом и кристаллографическом уровнях.

Разработку и исследование состава, структуры и свойств конструктивных, функциональных и термо-коррозионно-стойких материалов-изделий электро- и радиотехнического назначения, оптико- и радиопрозрачных рекомендуется выполнять с позиции анализа зонной структуры используемого твердого тела и создаваемых материалов, представляющих собой индивидуальные модели энергетических



В. Т. Шмурадко
E-mail: shvt1@tut.by

спектров электронов, уровни и энергии которых группируются в свои зоны при воздействии внешних энергополей. Волновые функции электронов и ионов на атомарных уровнях начинают перекрываться, а электроны получают возможность перемещаться между атомами. Энергетические уровни атомных электронов структурно перестраиваются, образуя свои энергетические зоны, в результате чего энергетический спектр электронов превращается в энергетический (структурный) спектр проектируемого твердого тела, состоящий из зон валентности, проводимости, разделенных энергетическим зазором, называемым запретной зоной.

Весь спектр существующих электротехнических материалов делится на **металлические проводники** (валентная зона не заполнена электронами и перекрывается с зоной проводимости); **полупроводники и диэлектрики**, в которых зоны проводимости и валентные зоны разделены соответствующим энергетическим зазором (запрещенной зоной): у полупроводников она менее 3 эВ, у диэлектриков 3–10 эВ. Зонная теория квалифицирует все твердые тела, исходя из их химических и фазовых составов, структурных показателей и физико-химических механизмов получения. Твердые тела, в которых разрешенные зоны не перекрываются, причем часть из них полностью заполнена (валентные зоны), а остальные остаются пустыми (зоны проводимости), называются диэлектриками. Так как поведение конкретной физической системы — материала полностью определяется ее волновой функцией, решение уравнений Шрёдингера и Хартри – Фока с учетом трех главных волновых приближений позволяет описать все свойства разрабатываемого материала (термодинамические, физико-механические, физико-химические, электрофизические, магнитные, оптические и другие). Кроме того, можно выяснить, почему конкретная совокупность ядер (атомов) и их электронов образует кристаллическую решетку именно данного кристаллического (кристаллохимического-кристаллографического) типа (сингонии). Основная проблема зонной теории: макроскопический образец твердого тела содержит $\sim 10^{23}$ взаимодействующих частиц, следовательно, и волновая функция этой системы зависит от такого же числа переменных и уравнений, которые практически решить очень сложно [1].

Кроме того, проблемными задачами физики зонной теории являются разработка и реализация адекватных логистических системно-дифференцированных блок-схем создания новых материалов и соответствующих им объективно формализованных физико-химических процессов, механизмов структурной инженерии таких материалов в физико-математические модели. Решение этих моделей позволит получить наи-

более объективные интерпретации физических, физико-химических зависимостей и рассчитать на их основе термодинамические, физические, физико-химические, электрофизические и другие свойства проектируемых материалов в зависимости от характера и условий внешнего воздействия температурных, силовых, механических, электрических, электромагнитных и других полей.

Прикладной аспект исследования.

Этот аспект состоит в разработке системно-дифференцированной логистической блок-схемы проектирования, получения и исследования химических и фазовых составов. Эти составы формируют системно-дифференцированный комплекс свойств конструкционно-функциональных материалов-изделий электротехнического назначения на основе оксидных композиций (Al_2O_3 , MgO , SiO_2 , ZrO_2 и др.) с ионными и ионно-ковалентными химическими связями и бескислородных химических соединений (нитридов, боридов, карбидов и их композиций) с ковалентной химической связью.

Классификация и реализация разрабатываемых электротехнических материалов, работающих в режиме электрических, тепловых и других полей, выполняется согласно сформированному в них комплексу определяющих свойств. Так, электроизоляторы для постоянных, переменных, сильных, средних и слабых электрических полей имеют следующую тенденцию развития определяющих свойств: $E_{\text{пр}} \rightarrow \max$ – электрическая прочность; $\rho \rightarrow \max$ – удельное сопротивление; $\lambda \rightarrow \max$ – теплопроводность; $\alpha \rightarrow \min$ – ТКЛР; $\varepsilon \rightarrow \text{const}$ – диэлектрическая проницаемость определенного значения; конструкционные диэлектрики для переменных, СВЧ и слабых электрических полей формируются со следующим комплексом свойств: $\varepsilon \rightarrow \text{const}$; $\text{tg}\delta \rightarrow \min$; $\lambda \rightarrow \max$; $\alpha \rightarrow \min$ [2].

При разработке (проектировании, создании и исследовании) электротехнических материалов-изделий, эксплуатируемых при нормальных и повышенных температурах, в электрических полях особенно высокой напряженности, необходимо формировать химическую и структурно-фазовую стабильность. Эта стабильность исключит протекание вероятных фазовых изменений и физико-химических процессов в материале при его эксплуатации на уровне таких свойств, как электропроводность (для диэлектриков из кислородных и бескислородных химических соединений) она составляет 10^{-15} – 10^{-8} См/м) и электрическая прочность. В материале при этом происходит ударная ионизация атомов диэлектрика электронами проводимости, ускоренными электрическим полем, что в экстремальных случаях может привести к электрическому пробое. Тепловой пробой возникает при разогреве диэлектрика (вплоть до состояния плавления) протекающим по нему электрическим током.

При проектировании электроизоляторов обязательно учитывают внешние факторы, вызывающие или тепловой, или электрический механизм пробоя. Тепловой пробой характерен для диэлектриков, работающих при повышенных температурах. Для комнатной температуры создаются диэлектрики проводимостью 10^{-11} – 10^{-6} См/м. Для материалов с уровнем проводимости порядка 10^{-11} – 10^{-6} См/м (при повышенных температурах) характерен тепловой механизм пробоя. Материалы проводимостью 10^{-15} – 10^{-13} См/м разрабатываются для эксплуатации в условиях возможного электрического механизма пробоя [2].

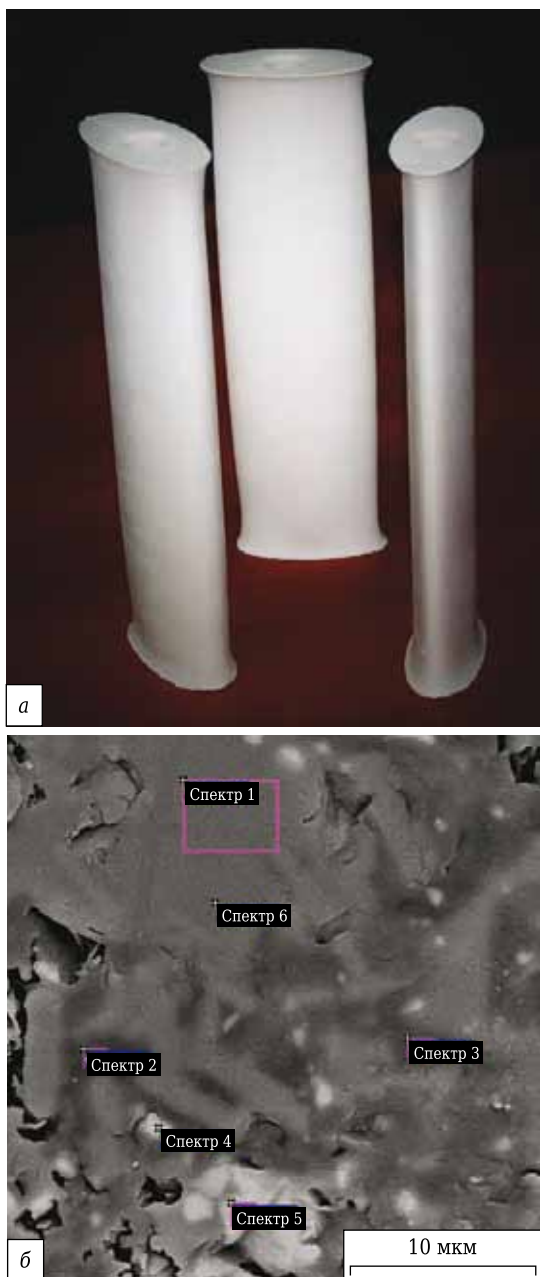


Рис. 1. Электроизоляторы для тормозных электротрансмиссий УВТР 2х750 карьерных самосвалов БелАЗ (а) и их структура (б)

Практический аспект исследования.

Разработаны методы, методики, законы и закономерности формирования высокоплотных (вакуум-плотных) электроизоляторов из порошков разных фазовых и фракционных составов путем их помола, гранулирования, прессования, тепловой обработки и спекания. Изучены насыпная плотность и плотность утряски утряски разных порошковых композиций на основе Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , ЧСЦ ZrO_2 и др. Согласно эксперименту получены аналитические аппроксимации насыпной плотности и плотности утряски порошков от их фракционного состава, давления прессования и режимов спекания [3–8]. Разработаны, исследованы и испытаны вакуум-плотные материалы-изделия — электроизоляторы на основе композиций Al_2O_3 , $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, Al_2MgO_4 , ЧСЦ ZrO_2 , $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{MgO} \cdot 5\text{SiO}_2$.

Текущее состояние проблемы. Сегодня создание термостойких электротехнических керамических материалов-изделий с высокой прочностью на электропробой при повышенных температурах представляет определенный технический интерес для вакуумного оборудования (вакуумных печей), авто-, авиа- и ракетостроения при разработке и производстве свечей зажигания нового поколения и особенно при создании технологий электронно-лучевой сварки в вакууме крупногабаритных толстостенных (50–100 мм) элементов конструкций из высокопрочных алюминиевых сплавов (НПО «Центр», г. Минск).

Настоящее исследование является продолжением работ по созданию отечественных импортозамещающих электроизоляционных материалов, технологий и изделий, реализованных при комплектации электротрансмиссий тормозных установок УВТР 2х750 карьерных самосвалов БелАЗ [9–11] (рис. 1); автоматов высокоскоростной контактной сварки биметаллических трубчатых элементов (медь–алюминий) [12–14] (рис. 2, 3); оборудования вакуумной электронно-лучевой сварки конструкций из алюминиевых сплавов (рис. 4); вакуумных печей высокотемпературного (1050 °С, 10,5 ч) газотермического упрочнения бурового инструмента в среде диссоциированного ацетилена (рис. 5, 6).

Методической особенностью создания эффективных и конкурентоспособных конструкционных керамических материалов-изделий электротехнического назначения, способных работать одновременно в режиме различных нагрузок, является комплексный логистический подход к разработке, анализу и реализации физико-химических процессов и механизмов превращения исходных и текущих структурно-фазовых уровней и свойств перерабатываемых техногенных порошковых композиций в конструкционные электротехнические материалы-изделия с планируемым набором соответствующим

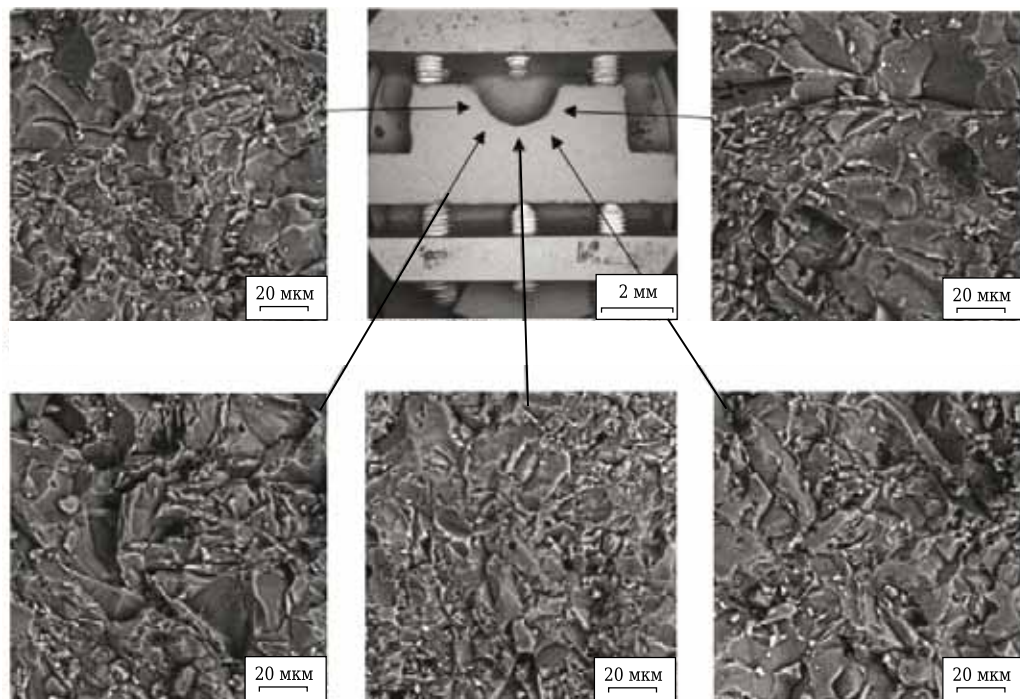


Рис. 2. Структура электроизолятора для сварки трубчатых биметаллических элементов

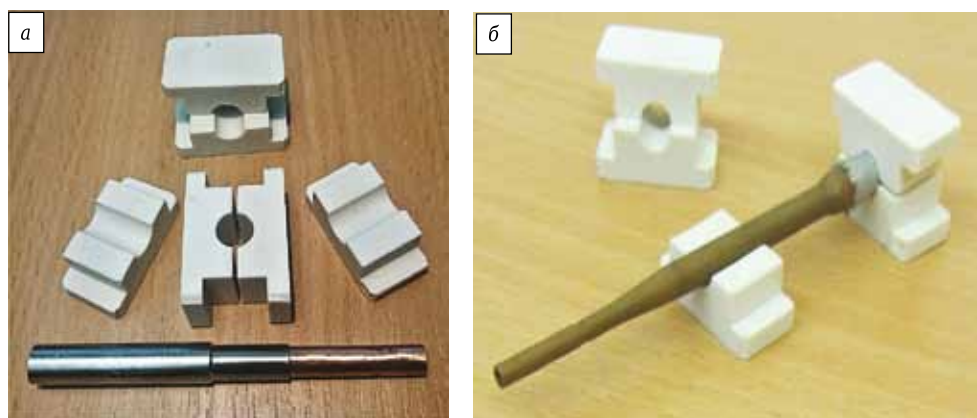


Рис. 3. Электроизоляторы для установок автоматической контактной сварки трубчатых элементов медь – алюминий

щих структурных уровней и свойств, способных практически одновременно выдерживать и рассеивать механические и термомеханические напряжения, выдерживая при этом электрические.

Для оперативного выполнения научно-исследовательских работ (НИР), снижения финансово-временных затрат на стадиях материаловедческо-технологической разработки и подготовки инновационных производств к выпуску электротехнической керамики применялась информационно-аналитическая логистика обеспечения НИР, состоящая из этапов информационной подготовки к проведению НИР, текущей информационной поддержки при проведении и завершении НИР, а также из аналитической оценки актуальности и дальнейшей полезности применения полученной информации для выполнения НИР, созданной в виде соответствующих баз, банков данных и информационных систем. Такая



Рис. 4. Электроизолятор вакуумной установки электронно-лучевой сварки толстостенных элементов (50–100 мм) из высокопрочных алюминиевых сплавов (комплектующая электронно-лучевой пушки ЭЛА 30/60)

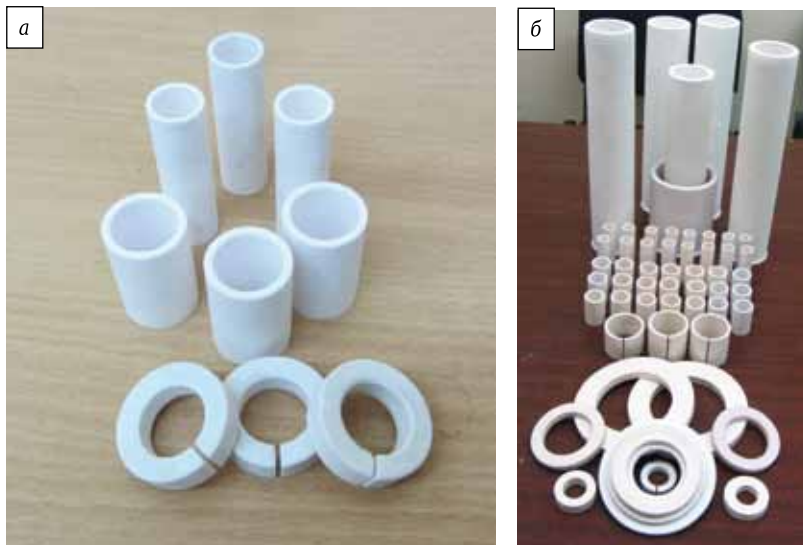


Рис. 5. Высокоплотные электроизоляторы для вакуумных печей высокотемпературного газотермического упрочнения бурового инструмента в диссоциированном ацетилене



Рис. 6. Вакуумная печь для высокотемпературного газотермического упрочнения бурового инструмента. Масса загрузки 2 т; среда — диссоциированный ацетилен; фирма-изготовитель Irsop, Германия; периодически комплектуется электроизоляторами (см. рис. 5)

концепция информационно-аналитического обеспечения в упрощенном виде представляет собой обобщенную схему создания и применения информационных технологий в керамическом материаловедении, в создании технологических разработок и организации на их основе эффективных инновационных производств [6, 7].

Согласно сравнительному анализу проблем и условий получения и эксплуатационного разрушения термоэлектропрочных материалов-изделий разработаны материаловедческие критерии создания структурной прочности в электротехнических материалах: с позиции диссипативных элементов структур (ДЭС) и их зонной структуры, что технологически формируется на разных структурных уровнях: атомарно(ионно)-электронно-молекулярном,

кристаллохимическом-кристаллографическом, микро- и макроразмерном, включая соответствующие им структурные дефекты — точечные, дислокации, линейные и их комбинации. Это позволяет проанализировать механизмы диффузионно-вязкопластической деформации керамических материалов-изделий, получаемых при тепловой обработке и спекании, и установить при этом условия и механизмы структурно-фазовых превращений, стабилизирующих их термостойкость и электропрочность [1, 2, 6, 9, 15, 16].

Термопрочность, являясь комплексной характеристикой материалов, изучалась с позиции физико-химической природы и энергетического состояния кристаллической решетки; типа химической связи ионов в решетке (ионной, ковалентной, ионно-ковалентной); фазового состава; кристаллографических параметров фаз; геометрических размеров и формы испытываемого материала-изделия; условий и параметров внешнего воздействия (температуры, механической нагрузки, среды, цикличности и др.).

Наиболее реализуемыми теориями при аналитической оценке термопрочности электротехнической керамики являются критерии максимальных напряжений — энергетический и статистический [15]. Например, при разработке и оценке термостойких электроизоляционных материалов-изделий применяли критерий максимальных напряжений, который наиболее объективен при установлении взаимосвязи термостойкости и электропрочности с температурными и атмосферными условиями работы электроизоляторов в электротрансмиссиях (от -50 до $+1000$ °C, высокая влажность), в сварочном оборудовании и электропечах с восстановительными средами [9].

Установлено, что на эффективную термостойкость материалов в зависимости от их фазового состава влияет фрагментарная (микротрещиноватая) структура, которая, в частности, формируется в оксидной матрице добавками из ZrO_2 и некоторыми другими. К фазам, повышающим одновременно термостойкость и электрическую прочность на пробой, относят алюмомагнезиальную шпинель $MgAl_2O_4$, мулит $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, циркон $ZrSiO_4$, кордиерит $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$; на их основе разработаны составы термостойких электроизоляционных материалов [9].

Методология и материалы исследования, физико-химические принципы струк-

турной инженерии электроизоляционных материалов-изделий. Разработку, исследование и создание конкретных керамических материалов-изделий выполняли по программно-методической формуле «химический и фазовый состав – иерархия структурно-фазовых уровней – свойства» – «материал» – «технология» – «электротехнический термостойкий электродупропрочный материал-изделие» – «устройство» – «надежность – долговечность» – «инновационное производство» [1, 8, 10]. В качестве исходного техногенного сырья применяли порошки Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , ZrO_2 , нитриды, бориды и другие синтезируемые на их основе химические гетеросистемы, твердые растворы с электрической проводимостью менее 10^{-4} См/м при 1000°C и заданной эффективной термо- и электропрочностью.

В современном керамическом материаловедении наиболее эффективными методами исследования внутренней структуры материалов являются оптическая и рентгеновская спектроскопия, дифрактометрия, ИК-спектроскопия и спектроскопия комбинационного рассеяния, а также реализация информативной рентабельности физико-химических методов анализа и контроля фазовых превращений [1]. Контроль текущих фазовых превращений в оксидных системах, и в частности при синтезе кордиерита, муллита, алюмомагнезиальной шпинели, циркона и других оксидных комплексов, выполняли при проведении качественного и количественного анализов химического и фазового составов материала, типа твердых растворов, их структурных уровней и объемного распределения, степени и характера дефектности. С позиций коллоидной химии, микроанализа, физической химии (химической термодинамики и кинетики), физико-химического анализа изучали механизмы последовательного перераспределения химических элементов и фаз в исходных, текущих и вновь образующихся керамических структурно-фазовых системах, на стадиях трибохимического жидкостного размола, прессования, тепловой обработки и спекания материалов. Определенный интерес для дальнейшего развития методов создания, контроля и анализа широкого ряда создаваемых фаз, формирующих конструкционные, функциональные, керамо-огнеупорные и другие материалы, представляют исследования их электронной структуры с помощью рентгеновской и рамановской спектроскопии [16].

На данном этапе исследований образующиеся структурные комплексы в керамических электроизоляционных материалах-изделиях изучали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) VEGA II LMU (Tescan, Чехия) в режиме низкого вакуума с использованием детектора обратно отраженных электронов

(BSE-детектора) без предварительного нанесения токопроводящего покрытия на исследуемую поверхность образца. Химический состав материалов оценивали на энергодисперсионном спектрометре INCA Energy 350 (OXFORD Instruments Analytical, Англия), входящем в состав СЭМ VEGA II LMU, в режиме низкого вакуума с использованием BSE-детектора для формирования исходного электронного изображения. Кроме того, структурно-фазовые конструкции создаваемых материалов дублировали и изучали с применением оптической микроскопии, электротехнические характеристики определяли на измерителе иммитанса модели E7-20, деформационные свойства — на установке Tinius Olsen (Великобритания), термостойкость материалов-изделий — по методике термоциклирования в режиме нагрев – охлаждение (1000°C – проточная вода).

Например, основными положениями и принципами, обеспечивающими создание электротехнических материалов-изделий — диэлектриков для автоматической сварки трубчатых биметаллов, являются:

- термодинамическая и физико-химическая устойчивость диэлектриков к высоким и низким перепадам температур как в вакууме, так и в кислородосодержащих, нейтральных и восстановительных газовых средах;

- долгосрочная устойчивость материала – диэлектрика – изделия к кратковременным периодическим комплексным механоэнергетическим нагрузкам, вызывающим тепловое пластическое течение биметаллической пары (трубчатой конструкции) при ее ударном сжатии и деформировании в сварочном узле (через керамическую пару электроизоляторов с полуцилиндрическими рабочими зонами, см. рис. 3);

- обязательное сочетание в проектируемом материале-изделии электроизолятора (см. рис. 2, 3) необходимых уровней прочностных свойств, способных циклически выдерживать в процессе сварки периодически возникающие механические, термические и электротехнические нагрузки в диапазоне рабочих температур $550\text{--}1200^\circ\text{C}$, которые устанавливаются в зависимости от марки свариваемых материалов.

При достижении и реализации в разрабатываемых материалах-изделиях заданных качественных и количественных уровней свойств за основу базового техногенного сырья был принят глинозем, образующий химические соединения, твердые растворы и другие комплексы с такими оксидами, как MgO , SiO_2 , CaO , ZrO_2 , Y_2O_3 , B_2O_3 , BaO . При этом в материалах формируется преимущественно ионный тип химической связи с ионно-электронной проводимостью [2, 9, 11, 14, 16]. Управление электротехническими и термомеханическими параметрами в создаваемых материалах до-

стигалось структурированием алюмооксидной матрицы с применением таких фазовых сочетаний, как $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgAl}_2\text{O}_4$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--ZrO}_2$ ЧЦЦ (Y_2O_3 , MgO , CaO), $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--ZrSiO}_4$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--BaAl}_2\text{SiO}_8$ и др.

Процесс формирования физико-механических, электротехнических, термостойких и других свойств в синтезируемых материалах начинается на этапах подбора исходных структурно-фазовых комплексов, установления вероятных структурно-фазовых превращений на материаловедческо-технологических стадиях создания активированных высококонцентрированных керамических вяжущих суспензий (АВКВС) и литейных шликеров. В данном случае получение и стабилизация реотехнологических свойств керамических суспензий, шликера, шликерных отливок, а на их основе гранулированных порошковых структур связаны с текущими химическими и фазовыми превращениями в исходном составе порошков, с последовательными физико-химическими процессами, протекающими между образующимися метастабильными коллоидными и трибохимически обработанными микрокристаллическими частицами, при жидкостном механохимическом размоле; последние, кинетически разобьются при жидкостном размоле, консолидируются при шликерном получении отливок.

При статическом и изостатическом прессовании заготовок из гранул, полученных из шликерных отливок, прочность прессовок формируется за счет оловых связей — кислородных мостиков, образующихся между ионами металла и создающих твердые негидратирующиеся водостойкие тела с высоким структурным энергонасыщением. Текущую прочностную функцию материалов на основе АВКВС при «холодном» твердении, а затем и при тепловой обработке выполняет коллоидный компонент, состоящий из частиц размерами 0,1–0,5 мкм. При этом практически одновременно в материалах происходит последовательная структурная самоорганизация физико-химических, физико-механических и других свойств на кристаллохимических, кристаллографических, ультрадисперсных и макроразмерных уровнях [9, 17].

При создании электротехнических керамических материалов с заданным уровнем свойств на стадиях получения АВКВС были разработаны и реализованы принципы [9], включающие высокую объемную концентрацию твердой фазы АВКВС ($C_v = 0,75 \div 0,8$) и повышенную температуру (до $+75^\circ\text{C}$) дисперсионно-дисперсной системы; оптимальные уровни дисперсности: содержание частиц коллоидного компонента $C_{к.к.}$ размерами 0,1–0,5 мкм составляет 1–5 %, зерновой состав микрозаполнителя, мас. %: фракции (0,2–0,5) – 10 мкм 25–35, 10 – 100 мкм 60–70; оптимальные уровни условной и эффективной вязкости

суспензий; высокие значения электрокинетического потенциала (например, для муллитокорундовой суспензии значение ζ -потенциала составило $-95 \div -110$ мВ); оптимальное время стабилизации (9–11 ч); окружная скорость механического гравитационного перемешивания АВКВС из оксидных композиций кордиеритового, алюмосиликатного, муллитокорундового, шпинельного и других составов $50\text{--}240\text{ с}^{-1}$ [5, 8].

В рамках проведенного исследования были созданы суспензии, литейные шликера, шликерные отливки, гранулы, из которых изготавливали экспериментальные образцы как шликерным литьем, так и прессованием гранул. При этом неспеченные муллитокорундовые материалы имели пористость 20–39 %, кажущуюся плотность $2,3\text{--}2,9\text{ г/см}^3$, $\sigma_{сж}$ 10,9–39,2 МПа, $\sigma_{изг}$ 6,6–27,3 МПа; увеличение $\sigma_{изг}$ прессовок связано с ростом адгезионно-когезионной связи коллоидных частиц между собой и с поверхностью трибохимически обработанных зерен микро- и макрозаполнителя. Связи формировались через диоловые мостики между ионами металла; при этом число возникающих адгезионно-когезионных связей увеличивается при росте давления прессования и плотности материала заготовок, что создает повышенную объемную межзеренную когезионную прочность. В итоге это приводит к контактно-конденсационному механизму твердения и упрочнения материала заготовок за счет полимеризующихся структур через оксоструктуры при помощи полярных ковалентных и побочных донорно-акцепторных связей [17].

Введение в состав полидисперсного муллитокорундового материала ультрадисперсных структур из коллоидного муллита стехиометрического состава с размерами частиц менее 1 мкм в количестве до 10 мас. % позволило улучшить реотехнологические свойства шликера, шликерных отливок, гранулированных пресс-порошков и материалов-изделий в целом. Установлено преимущество сухого изостатического формования изоляторов из самотвердеющих масс по отношению к шликерному литью. Однако шликерный метод не теряет своих достоинств при изготовлении средне- и крупногабаритных изделий, имеющих сложную геометрическую форму, обеспечивая при определенных реотехнологических свойствах шликера высокоплотную (до 80–93 %) упаковку частиц в отливках [6, 9, 15, 17].

По данным микрорентгеноспектрально-го и рентгенофазового анализов образцов из самотвердеющих масс после их тепловой обработки и спекания, в разработанном полидисперсном муллитокорундовом материале на границах зерен исходного муллита обнаружен синтезированный при $850\text{--}1200^\circ\text{C}$ первичный и перекристаллизованный при $1300\text{--}1420^\circ\text{C}$ вторичный муллит. Эти два вида муллита

упрочняют структуру материала и расширяют температурные интервалы его спекания и службы [6–15]. Разработанные на основе муллитокорунда материалы (ρ 2,33–3,15 г/см³, $\sigma_{сж}$ 321–580 МПа, $\sigma_{изг}$ 99–140 МПа, $R_{1000}^{\circ\text{C-вода}}$ > 93 теплосмен) были использованы для получения термостойких электроизоляторов, огнеупорных воронок для розлива алюмомагниевого расплава, тиглей для плавления и литья сплавов при 1450–1600 °С, термостойких конструкционных материалов-изделий для машиностроения. На базе подобных материалов проводили исследования и разработку электроизоляторов свечей зажигания нового поколения для авто-, авиа- и ракетостроения [3, 4, 9].

Проанализированы условия и принципы, вызывающие термо- и электроразрушение, а также конкретизированы условия, процессы и механизмы, приводящие к этому разрушению, что в итоге позволило улучшить эксплуатационные показатели разрабатываемых (синтезируемых) материалов-изделий. Установлено, что в основе термического разрушения лежат процессы и механизмы, вызывающие в материале напряжения I рода, или термические, формируемые градиентом температур, и напряжения II рода, или микроструктурные, вызываемые анизотропией ТКЛР и перестройкой структуры [10, 13, 15]. С помощью компьютерного моделирования проведены численные расчеты температурных полей и термонапряжений, возникающих в материале двухслойных стаканов-дозаторов промежуточных ковшей МНЛЗ [5].

Разработку, исследование и изготовление материалов-изделий из технической керамики разного научно-практического назначения выполняли с позиции методологической системно-дифференцированной блок-схемы, объединяющей «состав – структуру – свойство» – «заданный материал» – «разрабатываемые технологии» – «изделия» – «инновационные производства», обеспечивая тем самым формирование, развитие и реализацию материаловедческо-технологической логики. Ее принципы, подходы и этапы минимизируют финансово-временные затраты и потери при выполнении НИР, повышают их научно-практическую эффективность и достигаемую результативность при разработке и создании новых материалов – изделий – производств.

Базовой основой формирования и развития материаловедческо-технологической логики являются фундаментальные и прикладные науки: физика и химия твердого тела, физическая химия, физико-химический анализ, анализ фазовых диаграмм состояния, физико-химические процессы и механизмы структурной инженерии — структурирования и разрушения создаваемых (электроизоляционных) материалов-изделий, а также проблемы их

диагностики и анализа, включая механизмы компьютерного моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен теоретический анализ критериев термостойкости, электрической прочности и механизмов разрушения технической керамики с позиции физики твердого тела, зонной структуры и физико-химических процессов и механизмов структурной инженерии. Проанализированы механизмы разрушения материалов при термодарах и в электрических полях разной напряженности. Изучены процессы и механизмы структурирования и синтеза кордиерита, муллита, циркона и кордиерито-муллито-корундово-цирконовых композиций.

Созданы термостойкие электроизоляционные материалы на основе оксидных систем с диссипативными элементами структур (ДЭС), способными рассеивать (не разрушаясь) периодические механические, термические и электрические нагрузки в материалах на атомарно-ионно-электронно-молекулярных, кристаллохимических-кристаллографических (фазовых) и нано-, микро-, мезо- и макроразмерных структурных уровнях.

Сформулирована и реализована концепция создания ДЭС в керамических материалах, в которых химический и фазовый составы, иерархия структурных уровней и их дефектность определяют свойства синтезируемого термостойкого электроизоляционного материала, а разработанные на материаловедческом уровне физико-химические процессы и механизмы структурной инженерии позволяют создавать технологии получения конструкционных термостойких материалов-изделий электротехнического назначения. К ним, в частности, относятся электроизоляторы, работающие в электротрансмиссиях УВТР 2х750 тормозных устройств карьерных самосвалов БелАЗ; в автоматах контактной сварки трубчатых биметаллов; в установках электронно-лучевой вакуумной сварки толсто-стенных высокопрочных алюминиевых сплавов; в вакуумных печах высокотемпературного газотермического упрочнения бурового инструмента в среде диссоциированного ацетилена.

Полученные результаты исследований в дальнейшем позволят на сформированной материаловедческой базе создавать широкий спектр конструкционных электроизоляционных и других материалов-изделий из технической керамики разного научно-практического назначения, используя при этом разработанные программно-методические системно-дифференцированные блок-схемы материаловедческо-технологического структурирования и превращения минерального сырья в заданные керамические объекты.

Библиографический список

1. Неорганическое материаловедение. Энциклопедическое издание. В 2 т. Т. 1 ; под ред. Г. Г. Гнесина, В. В. Сорохова. — Киев : Наукова думка, 2008. — 1152 с.
2. **Гнесин, Г. Г.** Спеченные материалы для электро-техники и электроники : справ. изд. / Г. Г. Гнесин, В. А. Дубок, Г. Н. Братерская [и др.]. — М. : Металлургия, 1981. — 344 с.
3. **Shmuradko, V. T.** Directed synthesis of multilayer structures in ceramic and refractory technology / V. T. Shmuradko, O. V. Roman, I. V. Fomichina // *Refract. Ind. Ceram.* — 2007. — Vol. 48, № 3. — P. 189–196.
4. **Шмурадко, В. Т.** Направленный синтез многослойных структур в технологии керамики и огнеупоров / В. Т. Шмурадко, О. В. Роман, И. В. Фомихина // Новые огнеупоры. — 2007. — № 6. — С. 73–81.
5. **Roman, O. V.** Scientific and practical approaches to creating ceramic refractory materials and technology / O. V. Roman, F. I. Panteleenko, O. P. Reut [et al.] // *Refract. Ind. Ceram.* — 2011. — Vol. 51, № 5. — P. 334–342.
6. **Роман, О. В.** Научно-практические подходы к созданию керамо-огнеупорных материалов и технологий / О. В. Роман, Ф. И. Пантелеенко, О. П. Реут [и др.] // Новые огнеупоры. — 2010. — № 9. — С. 17–27.
7. **Шмурадко, В. Т.** Расчет температурных полей двухслойного изделия : тез. докл. Международной конф. огнеупорщиков и металлургов (31 марта - 1 апреля 2011 г., Москва) / В. Т. Шмурадко, О. В. Роман, Ф. И. Пантелеенко, А. В. Дроздов // Новые огнеупоры. — 2011. — № 3. — С. 41.
8. Разработка физико-химических основ технологии получения термо- и химически стойких к расплавам материалов и изделий на основе модифицированного оксида алюминия с использованием изостатического прессования : отчет о НИР (закл.) : ИПК и ПК БНТУ ; науч. рук. О. П. Реут, отв. исп. В. Т. Шмурадко [и др.]. — Минск, 2015. — 64 с.
9. Разработка высокопрочных триботехнических материалов на основе корунда, модифицированного оксидами редкоземельных элементов, и технологических основ создания эффективных материалов и изделий на уровне мобильных конкурентоспособных производств : отчет о НИР (закл.) : ИПК и ПК БНТУ ; науч. рук. Н. А. Руденская, отв. исп. В. Т. Шмурадко [и др.]. — Минск, 2015. — 76 с. — № ГР 20141700.
10. **Шмурадко, В. Т.** Материаловедческие принципы и технологические решения разработки, создания и применения износостойких корундовых материалов-изделий для механизмов подземной проходки грунтов и производства металлокорда / В. Т. Шмурадко, Ф. И. Пантелеенко, О. П. Реут [и др.] // Сборник МНТК «Новые технологии и материалы, автоматизация производства». — Брест, 2–3 ноября 2016 г. — С. 109–111.
11. Разработка термостойких электроизоляционных материалов, технологии получения на их основе функциональных изделий, работающих в узлах машин и механизмов в режиме статических-динамических на-

грузок и резких градиентов температур : отчет о НИР (закл.) : НИЧ БНТУ ; науч. рук. Ф. И. Пантелеенко, отв. исп. В. Т. Шмурадко [и др.]. — Минск, 2015. — 126 с.

10. **Шмурадко, В. Т.** Принципы создания термостойких электроизоляционных изделий для карьерных самосвалов БелАЗ : тез. докл. Международной конф. огнеупорщиков и металлургов (1–2 марта 2016 г., Москва) / В. Т. Шмурадко, Ф. И. Пантелеенко, О. П. Реут, М. О. Степкин // Новые огнеупоры. — 2016. — № 3. — С. 19, 20.

11. **Shmuradko, V. T.** Physicochemical processes and mechanism for preparing Belaz quarry dumper truck heat-resistant electrical insulators / V. T. Shmuradko, F. I. Panteleenko, O. P. Reut [et al.] // *Refract. Ind. Ceram.* — 2016. — Vol. 57, № 6. — P. 614–617.

12. **Шмурадко, В. Т.** Физико-химические процессы и механизмы получения термостойких электроизоляторов для карьерных самосвалов БелАЗ / В. Т. Шмурадко, Ф. И. Пантелеенко, О. П. Реут [и др.] // Новые огнеупоры. — 2016. — № 11. — С. 48–51.

13. **Шмурадко, В. Т.** Электроизоляционные материалы для автоматической сварки трубчатых биметаллов : тез. докл. Международной конф. огнеупорщиков и металлургов (10–20 марта 2017 г., Москва) / В. Т. Шмурадко, Ф. И. Пантелеенко, О. П. Реут [и др.] // Новые огнеупоры. — 2017. — № 3. — С. 64.

14. **Shmuradko, V. T.** Electric insulating materials-products for welding equipment / V. T. Shmuradko, F. I. Panteleenko, O. P. Reut [et al.] // *Refract. Ind. Ceram.* — 2018. — Vol. 58, № 6. — P. 693–696.

15. **Шмурадко, В. Т.** Электроизоляционные материалы-изделия для сварочного оборудования / В. Т. Шмурадко, Ф. И. Пантелеенко, О. П. Реут [и др.] // Новые огнеупоры. — 2017. — № 12. — С. 71–74.

16. **Шмурадко, В. Т.** Особенности получения термоударопрочных электроизоляционных материалов-изделий для сварочного оборудования / В. Т. Шмурадко, Ф. И. Пантелеенко, О. П. Реут [et al.] // Сборник Международного симпозиума «Перспективные материалы и технологии». Витебск, Беларусь, 22–26 мая 2017 г. — С. 57–59.

17. **Стрелов, К. К.** Теоретические основы технологии огнеупорных материалов / К. К. Стрелов. — М. : Металлургия, 1985. — 480 с.

18. **Стрекаловский, В. Н.** Оксиды с примесной упорядоченностью: состав, структура, фазовые превращения / В. Н. Стрекаловский, Ю. М. Полежаев, С. Ф. Польгуев. — М. : Наука, 1987. — 160 с.

19. **Пивинский, Ю. Е.** Керамические вяжущие и керамобетоны / Ю. Е. Пивинский. — М. : Металлургия, 1990. — 272 с.

Получено 13.07.20

© **О. В. Роман**, В. Т. Шмурадко, Ф. И. Пантелеенко, О. П. Реут, Т. И. Бендик, Н. А. Шмурадко, Л. В. Судник, В. И. Бородавко, А. Н. Кизимов, В. В. Клавкина, 2020 г.