

В. Т. Шмурадко (✉), д. т. н. Ф. И. Пантелеенко, д. т. н. О. П. Реут,  
Н. А. Руденская, С. В. Григорьев, А. Ф. Пантелеенко

Белорусский национальный технический университет, г. Минск,  
Республика Беларусь

УДК 666.651:669.14.018.62

## ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ-ИЗДЕЛИЯ ДЛЯ СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

С материаловедческих позиций проведен анализ создания термостойких виброударопрочных электротехнических материалов-изделий, и в частности электроизоляторов, работающих в аппаратах автоматической сварки биметаллических трубчатых элементов. Разработаны материалы и технологические решения для создания электроизоляторов различного технического назначения.

**Ключевые слова:** методология, структурирование, электроизоляционные материалы-изделия, термостойкость, электро- и ударопрочность, материалы-изделия, биметаллические трубчатые элементы медь – алюминий, контактная сварка.

Процесс высокоскоростной автоматической контактной сварки биметаллических трубчатых элементов (например, медь – алюминий) состоит из механизмов непрерывно-циклического и кратковременного электроимпульсного, теплового и термомеханического нагружения свариваемых металлических фрагментов с применением керамических электроизоляторов. Важный этап в организации высокоскоростной качественной контактной сварки биметаллов — создание и реализация в сварочном оборудовании высокотемпературных оксидных материалов-диэлектриков с определенным комплексным уровнем электротехнических, физико-механических и термомеханических свойств.

Особенностью создания эффективных и конкурентоспособных конструкционных керамических материалов-изделий электротехнического назначения, способных работать (одновременно) в режиме электрических, термических, ударных и вибромеханических нагрузок, является комплексный (системно-дифференцированный) логистический подход к разработке, анализу и реализации процессов и механизмов превращения исходной системной иерархии и текущих структурно-фазовых уровней и свойств перерабатываемых материалов (в виде исходных порошковых композиций) в конструкционные электротехнические материалы-изделия с заданным (планируемым) набором соответствующих структур, способных практически одновременно рассеивать термомеханические

напряжения и выдерживать при этом электрические [1–5].

### Методология: методы, методики и материалы исследования, принципы структурной инженерии в керамике

Исследование и разработку конкретных керамических систем и материалов из них проводили по программно-методической формуле «фазовый и химический составы – иерархия структурных и фазовых уровней – свойства» – «электротехнический термостойкий ударопрочный материал-изделие» – «устройство» – «надежность – долговечность – конкурентоспособность» [2, 3, 5]. Объектом исследования являлись исходные, текущие структурированные оксидные системы и формируемые материалы-изделия из них, предметом исследования — физико-химические процессы и механизмы структурной инженерии материалов электротехнического назначения. В качестве исходного техногенного сырья применяли порошки  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $MgO$ ,  $ZrO_2$  и синтезируемые на их основе химические соединения, гетеросистемы и твердые растворы с электрической проводимостью менее  $10^{-4}$  См/м при 1000 °С.

В современном керамическом материаловедении наиболее эффективными методами исследования являются оптическая и рентгеновская спектроскопия, дифрактометрия, ИК-спектроскопия (ИКС) и спектроскопия комбинационного рассеяния, а также реализация информативной рентабельности физико-химических методов анализа и контроля фазовых превращений [6]. Контроль и анализ текущих фазовых превращений в оксидных системах, и в частности при синтезе кордиерита, муллита, алюмомагнезиальной шпинели и



В. Т. Шмурадко  
E-mail: shvt1@tut.by

циркона, выполняются на качественном и количественном уровнях путем определения в материалах: химических элементов основы и примесей; фазового состава; типа твердых растворов, их структурного уровня и объемного распределения; степени и характера дефектности. С позиций коллоидной химии, микроанализа, физической химии (химической термодинамики и кинетики), физико-химического анализа изучают механизмы последовательного перераспределения химических элементов и новых фаз в исходных, текущих и вновь образующихся керамических системах, на стадиях трибохимического жидкостного помола, прессования, термообработки и спекания материалов. Определенный интерес для дальнейшего развития методов контроля и анализа широкого спектра создаваемых фаз, формирующих конструкционные, функциональные, керамо-огнеупорные и другие материалы, представляют исследования их электронной структуры с помощью рентгеновской (изучение тонкой структуры рентгеновских спектров) и рамановской спектроскопии [7].

На данном этапе исследования структурные комплексы в керамических материалах-изделиях изучали при помощи сканирующего электронного микроскопа 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 исследовали на энергодисперсионном спектрометре INCA Energy 350 (OXFORD Instruments Analytical, Англия), входящем в состав сканирующего электронного микроскопа 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 (диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери, электрическая прочность, проводимость и др.) — 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).

Основными положениями и принципами, обеспечивающими создание электротехнических материалов и изделий-диэлектриков, являются:

- термодинамическая и физико-химическая устойчивость диэлектриков к высоким (низким) переменным температурам как в кислородосодержащих, нейтральных и восстановительных газовых средах, так и в вакууме;

- устойчивость материала диэлектрика и изделия к периодическим и кратковременным комплексным энергетическим нагрузкам, обеспечивающим тепловое пластическое течение биметаллической (трубчатой) конструкции при ее ударном сжатии и деформировании в сварочном узле (через керамическую пару электроизоляторов с полубочными рабочими зонами);

- создание достаточного уровня и запаса механической прочности в рабочей (полубочной) зоне керамических изделий, превышающего значения напряжений, возникающих при механическом пластическом деформационном течении разнородного биметалла во время сварки;

- обязательное сочетание в проектируемом материале-изделии электроизолятора необходимых уровней прочностных свойств, позволяющих циклически выдерживать в процессе сварки периодически возникающие механические, термические и электротехнические нагрузки в диапазоне рабочих температур 550–1200 °C, которые формируются в зависимости от марки свариваемых материалов.

Для достижения и реализации указанных качественных и количественных уровней и показателей свойств в создаваемых керамических материалах-изделиях за основу базового исходного материала был принят глинозем и его текущие формы, модифицируемые оксидами (MgO, SiO<sub>2</sub>, CaO, ZrO<sub>2</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BaO) и их комплексами, обладающими при этом преимущественно ионным типом химической связи и проводимости [6].

*Основная задача исследования* — изучение и формирование в керамических материалах-изделиях управляемого набора электротехнических, прочностных, механических и термочувствительных свойств. Управление электротехническими и термомеханическими параметрами в создаваемых материалах достигалось структурированием алюмооксидной матрицы с применением таких фазовых сочетаний, как Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> ЧЦ (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrSiO<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-BaAl<sub>2</sub>SiO<sub>8</sub> и др.

### **Результаты исследования**

Базовым носителем свойств разрабатываемых электро-, термо- и ударопрочных материалов является текущая матричная структура глинозема, а легирующие фазы — на уровне комплексов химических элементов и химических соединений, твердых растворов, в виде композиционных сочетаний из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, ZrSiO<sub>4</sub>, MgO, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> — модифицируют структуру глиноземистой матрицы и ее свойства, управляют количественными и качественными характеристиками создаваемых материалов. Составы разработанных электротехнических материалов получены из структурно-фазовых

комбинаций корунд – кордиерит – муллит – алюмомагнезиальная шпинель – циркон – бадделлит и др., причем их различные технологически сформированные композиционные сочетания позволяют управлять приоритетными (задаваемыми) параметрическими уровнями свойств в создаваемой керамике. Выполнен анализ физико-химических и физико-механических свойств разработанных электротермопрочных материалов. Проведена оптимизация фазовых составов, структурной иерархии и свойств созданных композиционных материалов на уровне различных сочетаний корунда, кордиерита, муллита, бадделлита, циркона, шпинелей.

Основными технологическими этапами структурной инженерии при создании электротехнических материалов-изделий с требуемыми свойствами являются последовательные стадии физико-химического структурирования глинозема композициями:  $MgO-Al_2O_3-SiO_2 \rightarrow 2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ ,  $Al_2O_3-MgO \rightarrow MgAl_2O_4$ ,  $SiO_2-ZrO_2 \rightarrow SiZrO_4$ ,  $Al_2O_3-SiO_2 \rightarrow 3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ . Причем процесс структурирования включает сухой и жидкостный (трибохимический – механохимический) помол соответствующих оксидных композиций. Затем из полученных активированных ультрадисперсных керамических суспензий и коллоидных систем в сочетании с микро-, мезо- и макроразмерными заполнителями формируются литьевые шликеры, шликерные отливки, из них — гранулированные порошковые структуры, прессовки (заготовки), которые подвергаются тепловой обработке и спеканию. Каждый этап последовательного технологического структурирования исходных оксидных систем сопровождается текущим анализом структурно-фазовых превращений техногенного сырья в нужные количественные стехиометрии-нестехиометрии кордиерита, муллита, алюмомагнезиальной шпинели, циркона и композиций на их основе [3].

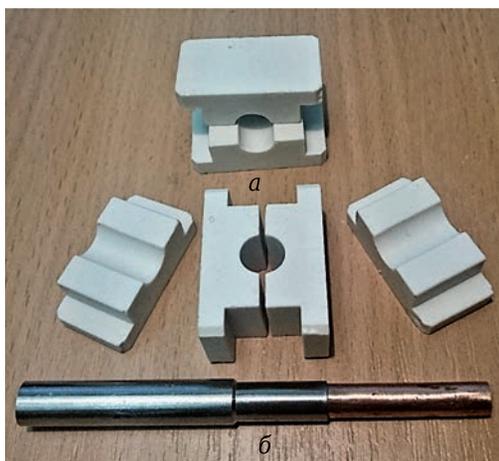
Один из вариантов структурной инженерии в технологиях получения термостойких ударопрочных конструкционных электротехнических материалов-изделий: синтез кордиерита; упрочнение кордиерита структурированными соединениями корунда, муллита, шпинели, циркона, бадделлита; расширение температурного диапазона (1360–1420 °С) спекаемости кордиеритовой матрицы, модифицированной другими фазами; создание иерархии диссипативных элементов структур (ДЭС) на уровне разработанных композиций, способных практически одновременно рассеивать структурные термонапряжения и демпфировать ударо-вибромеханические, возникающие на кристаллических макро-, мезо-, микро-размерных и кристаллохимических атомарно-ионно-электронных уровнях. При определенных внешних температурно-временных условиях эксплуатационного воздействия на материал-изделие идет активизация механизмов диссипации в ДЭС,

что тесно связано с возможными термически обратимыми химическими процессами (реакциями), протекающими в кордиеритовой матрице и цирконе. Причем активность их регламентируется определенным сочетанием корундо – муллито – цирконо – шпинельных и других структур как на микро- и макроразмерных, так и на кристаллохимических уровнях.

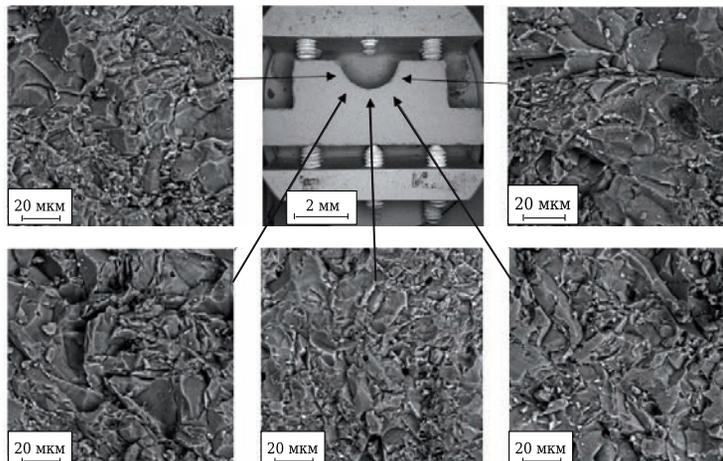
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе разработанной логистической блок-схемы системно-дифференцированного анализа физико-химических процессов и механизмов структурной инженерии в материаловедении и технологии технической керамики сформулирована концепция создания широкой номенклатуры эффективных импортозамещающих электроизоляторов с заданным набором электротехнических, термо- и ударопрочностных свойств. Концепция представляет программный документ, состоящий из материаловедческо-технологической методологической многоступенчатой формулы: «фазовый состав – многоуровневое иерархическое сочетание электроизоляционных, термостойких и ударопрочных структурных конструкций – набор свойств» – «методы, процессы и технологии синтеза электро-, термо-, механопрочных структур — материалов с ДЭС» – «режимы эксплуатации – конструкция изделия – эксплуатационная прочность» – «надежность – долговечность – конкурентная способность». Разработанные подходы и решения создания электроизоляционных термостойких материалов-изделий различного электротехнического назначения, и в частности, электроизоляторов для электротрансмиссий тормозных установок УВТР 2 × 750 к/с БелАЗ, вакуумных электропечей, установок ионно-плазменного и магнетронного напыления, и в том числе полученные электроизоляторы для контактной сварки биметаллов, позволили сформировать научно-практическую базу выпуска отечественной электротехнической продукции, создали условия для импортозамещения и организации экспорта. При этом достигнуты следующие показатели свойств материалов-изделий: диэлектрические проницаемость  $\epsilon = 8 \div 10,5$  и потери  $\operatorname{tg} \delta = 1 \cdot 10^{-4} \div 30 \cdot 10^{-4}$  при 20–1200 °С и  $f = 10^8 \div 10^{10}$  Гц, проводимость  $\sigma = 10^{-13} \div 10^{-8}$  См/м, электрическая прочность  $E_{\text{пр}} = 10 \div 30$  МВ/м;  $\sigma_{\text{сж}} = 216 \div 498$  МПа,  $\sigma_{\text{изг}} = 89 \div 121$  МПа, модуль Юнга  $E = 220 \div 320$  ГПа, модуль сдвига  $G = 90 \div 130$  ГПа при содержании в материале 85–90 мас. %  $Al_2O_3$  и его пористости 0,5–7 %; термостойкость оксидных материалов на основе  $\alpha-Al_2O_3$  (1000 °С – вода) 27–70 и более 140 теплосмен.

Разработаны и изготовлены электроизоляторы двух типоразмеров, которые были испытаны в автоматическом режиме контактной сварки трубчатых элементов медь – алюминий (диаметром 8



**Рис. 1.** Электроизоляторы (а) для автоматических аппаратов контактной сварки трубчатых элементов медь – алюминий (б)



**Рис. 2.** Структура электроизоляторов для автоматической контактной сварки трубчатых элементов с указанием основной рабочей зоны и периметра наблюдения

и 9 мм); биметаллы были использованы в узлах холодильно-морозильных установок. Получены положительные результаты испытаний. В зависимости от поставленных задач срок службы одной пары изоляторов составляет 1200–2000 рабочих циклов.

Дальнейшая разработка диэлектриков и их активное интегрирование в электротехнические, микроэлектронные системы представляют собой направления эффективного решения как элек-

тротехнических (сварочных) задач, так и последовательной микроминиатюризации электронных, компьютерных и других устройств, а также создания СВЧ-диэлектриков для техники двойного назначения. На рис. 1 и 2 показаны электроизоляторы для автоматической контактной сварки трубчатых элементов медь – алюминий и их структура. Срок службы и назначение электроизоляторов могут изменяться в зависимости от поставленных задач.

### Библиографический список

1. **Шмурадко, В. Т.** Особенности создания керамических материалов-изделий различного технического назначения / В. Т. Шмурадко, Ф. И. Пантелеенко, О. П. Реут [и др.] // В сб. 19-го международного симпозиума «Технологии. Оборудование. Качество». — Минск, 2016. — С. 90–93.
2. **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.] // В сб. МНТК «Новые технологии и материалы, автоматизация производства». — Брест, 2–3 ноября 2016. — С. 109–111.
3. **Шмурадко, В. Т.** Принципы создания термостойких электроизоляционных изделий для карьерных самосвалов БелАЗ : тез. докладов Междунар. конф. огнеупорщиков и металлургов (7–8 апреля 2016 г., Москва) / В. Т. Шмурадко, Ф. И. Пантелеенко, О. П. Реут, М. О. Степкин // Новые огнеупоры. — 2016. — № 3. — С. 19, 20.
4. **Шмурадко, В. Т.** Физико-химические процессы и механизмы получения термостойких электроизоляторов для карьерных самосвалов БелАЗ / В. Т. Шму-

радко, Ф. И. Пантелеенко, О. П. Реут [и др.] // Новые огнеупоры. — 2016. — № 11. — С. 48–51.

**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.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 6. — P. 614–617.

5. **Гнесин, Г. Г.** Спеченные материалы для электротехники и электроники : справочное издание / Г. Г. Гнесин, В. А. Дубок, Г. Н. Братерская [и др.]. — М. : Металлургия, 1981. — 344 с.

6. Неорганическое материаловедение. Энциклопедическое издание. В 2 т. Т. 1 ; под ред. Г. Г. Гнесина, В. В. Скорохода. — Киев : Наукова думка, 2008. — 1152 с.

7. **Стрельский, В. Н.** Оксиды с примесной разупорядоченностью: состав, структура, фазовые превращения / В. Н. Стрельский, Ю. М. Полежаев, С. Ф. Польгуев. — М. : Наука, 1987. — 160 с. ■

Получено 01.06.17

© В. Т. Шмурадко, Ф. И. Пантелеенко, О. П. Реут, Н. А. Руденская, С. В. Григорьев, А. Ф. Пантелеенко, 2017 г.