

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Папынова Евгения Константиновича на тему «Формирование и взаимосвязь структурно-фазовых характеристик и свойств функциональных керамик при искровом плазменном спекании», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

Актуальность исследования

Технология искрового плазменного спекания (ИПС) сформировала самостоятельное направление в мировом материаловедении. Накоплен значительный объем данных, однако системное понимание физико-химических механизмов фазовых превращений и структурной эволюции в неравновесных условиях ИПС остается неполным. Практическое освоение метода сдерживается отсутствием апробированных решений для получения изделий сложной геометрии и неразъемных соединений разнородных материалов, что критически важно для авиакосмической отрасли, атомной промышленности и медицинской техники. В связи с этим диссертационная работа Папынова Е.К., нацеленная на устранение указанных барьеров, является, безусловно, актуальной. Объектами исследования выбраны четыре класса функциональных керамик, востребованных в этих отраслях. Единство методологического подхода, включающего исследование кинетики консолидации, фазообразования и структурообразования в условиях ИПС с последующей разработкой прототипов изделий, обеспечивает получение системных результатов, имеющих фундаментальное и прикладное значение.

Общая характеристика работы

Диссертация Папынова Е.К. представляет собой комплексное исследование, в котором на единой методологической основе изучены процессы консолидации, фазообразования и структурообразования при искровом плазменном спекании для четырех классов керамических систем различной природы – от минералоподобных алюмосиликатов до высокотемпературного карбида кремния и оксидных биоматериалов. Работа отличается широтой охвата материалов, глубиной их физико-химического анализа с привлечением современных методов, включая *in situ* синхротронные дифракционные исследования, и завершается созданием опытных образцов изделий, прошедших испытания в реальных условиях эксплуатации. Такой подход позволил автору работы не только установить общие закономерности формирования структуры и свойств керамик в условиях ИПС, но и разработать технологические решения высокого уровня готовности для практического применения.

Научная новизна

В диссертации получен ряд новых результатов. Из наиболее значимых на мой взгляд следует выделить следующие:

– Установлены особенности кинетики консолидации для разных классов керамических систем. Впервые показано, что спекание высокодисперсных алюмосиликатов, насыщенных цезием, протекает по одностадийному механизму, характерному для наноразмерных систем, тогда как консолидация грубодисперсных реакционных смесей из SrCO_3 и TiO_2 имеет многостадийный характер, связанный с перегруппировкой частиц, разложением и фазообразованием, что достоверно доказано высокоточными *in situ* синхротронными методами анализа.

– Разработаны и обоснованы механизмы формирования функционально-градиентных материалов на основе SiC-керамики и жаропрочных сплавов. Впервые описан механизм образования неразъемного соединения, включающий миграцию Ag, диффузию Ti, Mo и C с формированием связующих микрослоев из сплавов α -Ti, β -Ti и карбида MoTiC_2 , обеспечивающих компенсацию разницы коэффициентов термического расширения.

– Обосновано применение ИПС для получения радиозащитной и биокерамики. Доказана высокая эффективность Ta_2O_5 керамики для поглощения рентгеновского излучения и предотвращения повреждений органов зрения, а также установлен механизм остеоинтеграции биокерамических имплантатов на основе ZrO_2 -фосфатной системы, подтвержденный *in vivo* исследованиями. Получены опытные образцы медицинских изделий.

Полученные результаты, решающие сформулированную в работе научную проблему, вносят существенный вклад в теоретические и экспериментальные основы материаловедения.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке научно-технологических основ получения минералоподобных керамик для иммобилизации радионуклидов и изготовления активных зон источников ионизирующего излучения (патенты РФ); создании технологических подходов к формированию неразъемных соединений в функционально-градиентных материалах на основе SiC-керамики и жаропрочных сплавов, результаты которых полезны в реализации проектов «ОКБ им. А. Льюльки» для проектирования изделий перспективных энергетических установок; разработке радиозащитного медицинского изделия для глаз, прошедшего успешные испытания в специализированном диспансере и рекомендованного к клиническому применению; создании биокерамики для костной имплантологии, биосовместимость которой подтверждена всесторонними биоиспытаниями (патенты РФ). Кроме того, результаты диссертации внедрены в учебный процесс Дальневосточного федерального университета при подготовке материаловедческих кадров.

Достоверность полученных результатов

Обоснованность научных положений и выводов подтверждается комплексным применением современных аналитических методов, включая рентгеновскую дифракцию (в том числе в режиме реального времени на синхротронных источниках), электронную микроскопию высокого разрешения, термический анализ, дилатометрию, а также широкий спектр методик для оценки физико-механических и функциональных свойств. Использование взаимодополняющих подходов, стандартизированных процедур измерений, статистическая обработка экспериментальных данных и их согласованность с результатами, представленными в мировой научной литературе, свидетельствуют о высокой степени достоверности полученных в работе результатов.

Соответствие автореферата диссертации

Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертационного исследования. Автореферат дает целостное представление о решаемой научной проблеме, содержит в структурированном виде основные результаты, научные положения и выводы, выносимые на защиту.

Диссертация объемом 430 страниц включает введение, семь глав, заключение, список литературы из 550 наименований и приложения. Работа иллюстрирована 264 рисунками и 37 таблицами, что наглядно демонстрирует полученные экспериментальные данные.

Замечания по диссертационной работе

1. При описании кинетики консолидации используются преимущественно качественные характеристики усадки. Дополнительный расчет энергий активации процессов спекания для изученных систем мог бы способствовать более точной идентификации доминирующих механизмов массопереноса и их сопоставлению с литературными данными.
2. Для разработанных функционально-градиентных материалов на основе SiC-керамики и жаропрочных сплавов исследована механическая прочность соединения при статической нагрузке. Вместе с тем, вопросы термической усталости и сохранения целостности соединения при циклических температурных воздействиях, характерных для реальных условий эксплуатации, требуют дополнительного изучения.
3. При определении предела прочности при сдвиге для образцов функционально-градиентных материалов было бы желательно провести испытания большего количества образцов и использовать методы статистической обработки для более обоснованной оценки прочности соединения.

4. Эксперименты с применением синхротронного излучения для изучения реакционного спекания является несомненным достоинством работы, однако температурный диапазон *in situ* дифракционной съемки был ограничен 1000 °С, тогда как для ряда исследованных систем (например, ZrO₂ и SiC) ключевые фазовые превращения и процессы спекания протекают при более высоких температурах (≥1300 °С). Вследствие этого за пределами исследования осталась динамика высокотемпературного фазообразования указанных материалов.

Приведенные выше замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы и не снижают её научной и практической ценности.

Заключение

Тема диссертации соответствует заявленной специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки), а полученные результаты полностью согласуются с поставленной целью и задачами исследования. Диссертация выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и практической значимостью, представляет собой самостоятельное и завершённое научно-квалификационное исследование, в котором изложены научно обоснованные технические и технологические решения в области получения функциональных керамических материалов и опытных изделий методом искрового плазменного спекания, включая физико-химические закономерности контроля их эксплуатационных характеристик и свойств. Полученные результаты вносят существенный вклад в развитие материаловедения и открывают новые перспективы для высокотехнологичных отраслей: атомной промышленности (для иммобилизации радионуклидов и производства радиоизотопной продукции), авиадвигателестроения (при создании высокотемпературных керамических и металл-керамических компонентов двигателей), медицины (для производства радиозащитных изделий и биокерамических имплантатов), а также в учебном процессе при подготовке материаловедческих кадров.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на российских и международных научно-технических конференциях, опубликованы в 41 печатной работе, в том числе 20 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК (из них 15 статей в журналах первого и второго квартилей по SJR Scopus).

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-16 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Папынов Евгений Константинович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Официальный оппонент

Кашкаров Егор Борисович,

доктор физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, заведующий лабораторией перспективных материалов и обеспечения безопасности водородных энергосистем Отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Тел.: +7(3822)701777 (вн.т. 1562), E-mail: ebk@tpu.ru.

Я, Кашкаров Егор Борисович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Кашкаров Егор Борисович

«01» апреля 2026 г.

Подпись д.ф.-м.н. Кашкарова Е.Б. удостоверяю

Ученый секретарь

Новикова Валерия Дмитриевна



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Почтовый адрес: 634050, обл Томская, г Томск, пр-кт Ленина, д 30

Тел.: 8-(382-2)-70-17-77.

E-mail: tpu@tpu.ru.