

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
(ФИЦ КНЦ РАН)

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор
ФИЦ КНЦ РАН
академик РАН

С.В. Кривовичев
С.В. Кривовичев

24 марта 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации 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 работы

Диссертационная работа Папынова Е.К. посвящена решению важной научно-технической проблемы — установлению фундаментальных закономерностей формирования структуры и свойств широкого спектра функциональных керамических материалов, получаемых методом искрового плазменного спекания (ИПС). Актуальность темы не вызывает сомнений и определяется несколькими факторами. Во-первых, технология ИПС является одним из наиболее перспективных методов консолидации порошковых материалов, позволяющим получать материалы с уникальным комплексом свойств за короткое время при относительно низких температурах. Во-вторых, работа охватывает создание материалов для критически важных отраслей промышленности: атомной энергетики (матрицы для иммобилизации

радионуклидов цезия и стронция), авиадвигателестроения (высокотемпературная керамика и функционально-градиентные материалы), медицины (радиозащитные изделия и биокерамика для остеосинтеза). Несмотря на значительный мировой опыт в области ИПС, многие вопросы, касающиеся физико-химических механизмов формирования структуры и фазового состава, особенно для многокомпонентных систем и изделий сложной формы, остаются не полностью изученными. Работа Папынова Е.К. восполняет эти пробелы, предлагая научно-обоснованные подходы к проектированию функциональных керамик с заданными эксплуатационными характеристиками, что подтверждает её высокую актуальность.

Общая характеристика работы

Диссертация представляет собой законченное научное исследование, в котором автор успешно решил поставленные задачи. Работа имеет четкую логическую структуру, состоит из введения, семи глав, заключения и обширного списка литературы. В первой главе представлен глубокий и всесторонний анализ современного состояния технологии ИПС, рассмотрены фундаментальные основы процесса, влияние мультифизических полей, а также обобщен опыт получения различных типов функциональных керамик, что позволило автору корректно сформулировать цель и задачи исследования. Во второй главе подробно описаны объекты исследования, методы синтеза исходных материалов (гидротермальный синтез, механохимическая активация) и консолидации (ИПС, реакционное ИПС, горячее прессование и др.), а также современные методы анализа структуры, фазового состава и свойств. Экспериментальные главы (3–7) содержат огромный объем новых данных по пяти ключевым направлениям, объединенных общей методологией. Автором впервые детально исследована кинетика консолидации и фазообразования при ИПС для широкого круга систем: алюмосиликаты, титанат стронция, карбид кремния, оксид тантала и биокерамические композиты на основе оксидов циркония и алюминия в составе с кальций-фосфатными фазами. Особого внимания заслуживает использование современных методов *in situ* диагностики, включая дифракцию на источниках

синхротронного излучения, для изучения процессов фазообразования в реальном времени. Важным итогом работы является не только создание лабораторных образцов, но и разработка способов получения опытных изделий (источников ионизирующего излучения, прототипов лопаток ГТД, радиозащитных экранов, костных имплантатов), успешно прошедших испытания в организациях-партнерах («ОКБ им. А. Льюльки», Приморский краевой онкологический диспансер, ТГМУ и др.), что подтверждает высокую практическую значимость результатов.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы Папынова Е.К. не вызывает сомнений и заключается в следующих основных результатах:

1. Впервые установлены закономерности влияния температуры искрового плазменного спекания на кинетику консолидации синтетических алюмосиликатов (цеолитов Na-A, Na-Y, магнитного нозеана), адсорбционно насыщенных цезием, и реакционной смеси (SrCO_3 и TiO_2), в том числе допированной Y^{3+} и Zr^{4+} . Показано, что механизм уплотнения высокодисперсных систем является одностадийным, а для грубодисперсных реакционных смесей — многостадийным, включающим стадии перегруппировки, разложения и твердофазного синтеза.

2. Впервые получены новые данные о фазообразовании в керамиках на основе поллуцита ($\text{CsAlSi}_2\text{O}_6$) и перовскита (SrTiO_3) при ИПС, включая сведения о формировании композитных фаз пирохлора ($\text{Y}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, $\text{Y}_2(\text{Zr}_{0,6}\text{Ti}_{0,4})_2\text{O}_{6,99}$) в присутствии допантов, моделирующих продукты распада радионуклидов. Установлен механизм выщелачивания иммобилизованных ионов, характеризующийся их диффузией с поверхности без разрушения структуры керамики.

3. Впервые установлены физико-химические закономерности формирования функционально-градиентных материалов (ФГМ) дискретного типа на основе SiC-керамики, ее армированной формы (SiC/SiCw), и высоколегированной стали или жаропрочного сплава

(ЖС6У-ВИ) с использованием металлических связок (Ti-Ag, Ni-Ag) и демпфера (Mo) по технологии ИПС. Раскрыт механизм формирования неразъемного соединения, основанный на межфазных взаимодействиях, объемной миграции и диффузии атомов с образованием упрочненных микрослоев (α -Ti, β -Ti, MoTiC₂).

4. Впервые доказана высокая эксплуатационная эффективность керамики на основе Ta₂O₅, в том числе модифицированной LiF и биополимерным покрытием, для поглощения рентгеновского излучения и защиты структур глаза в условиях лучевой терапии на моделях *in vivo*, что подтверждено морфометрическими и гистологическими исследованиями.

5. Впервые изучены процессы образования и термостабильности биоактивных фаз (гидроксиапатита и ортофосфата кальция) в результате *in situ* твердофазного взаимодействия в составе оксидов Al₂O₃ и ZrO₂ при их искровом плазменном спекании. Показана возможность направленного формирования пористой структуры и на моделях *in vivo* доказана биосовместимость и установлен механизм остеоинтеграции полученных имплантатов.

6. Разработаны новые способы искрового плазменного спекания для получения опытных изделий: активных зон источников ионизирующего излучения закрытого и открытого типа, металл-керамических композитов сложного профиля (лопатка ГТД), радиозащитных изделий для глаз, биокерамических имплантатов для костной хирургии. Новизна технических решений защищена 8 патентами РФ.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в установлении фундаментальных корреляций между параметрами ИПС (температура, давление, скорость нагрева), структурно-фазовым состоянием материалов и их конечными функциональными свойствами (гидролитическая стойкость, механическая прочность, теплопроводность, биосовместимость, радиационная защита). Сформулированные физико-химические принципы и механизмы формирования неразъемных соединений в системе «керамика-металл» и биоактивных фаз в

оксидных матрицах создают теоретическую базу для прогнозирования свойств новых материалов.

Практическая значимость работы подтверждена разработкой технологических рекомендаций и способов получения материалов и изделий, востребованных в различных отраслях:

- Разработаны способы получения керамических матриц на основе поллуцита и титаната стронция для надежной иммобилизации радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr , а также опытных изделий ИИИ, соответствующих ГОСТ Р 50926–96 для отвержденных форм радиоактивных отходов.
- Созданы технологические основы формирования неразъемных соединений SiC-керамики с жаропрочными сплавами, позволяющие изготавливать металл-керамические изделия (конструктивно подобный элемент лопатки ГТД) с высокими эксплуатационными характеристиками. Результаты используются в деятельности «ОКБ им. А. Люльки» и ЗАО «Авиационные технологии».
- Разработан способ производства радиозащитного изделия для глаз на основе Ta_2O_5 , обеспечивающего 94–100 % поглощения рентгеновского излучения. Эффективность подтверждена испытаниями в ГБУЗ «Приморский краевой онкологический диспансер», изделие рекомендовано к клинической практике.
- Разработана биокерамика на основе ZrO_2 и Al_2O_3 с биоактивными кальций-фосфатными компонентами, эффективность которой подтверждена биоиспытаниями.
- Результаты внедрены в учебный процесс по подготовке студентов и аспирантов Института наукоемких технологий и передовых материалов ДВФУ.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечена применением комплекса современных и взаимодополняющих методов исследования, в т.ч. на синхротронном излучении, а также методов всесторонних методов испытания керамик и изделий, включая натурные испытания, с использованием

сертифицированного оборудования и стандартизированных методик, а также хорошей воспроизводимостью экспериментальных данных и их соответствием теоретическим расчетам. Выводы работы базируются на представительном объеме экспериментального материала и не противоречат известным литературным данным. Апробация результатов на многочисленных российских и международных конференциях и публикация в высокорейтинговых рецензируемых журналах также подтверждают высокую степень достоверности.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, апробированы на научно-технических конференциях, опубликованы в 41 научной работе, в том числе в 20 статьях в рецензируемых журналах «Белого списка», перечня ВАК, а также индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus (из них 15 - в изданиях первого и второго квартилей), а также защищены 8 патентами РФ на изобретения.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты диссертационной работы Папынова Е.К. имеют высокую практическую значимость и могут быть рекомендованы к использованию для создания высоконадежных керамических матриц и источников ионизирующего излучения при переработке и иммобилизации радионуклидов цезия и стронция, а также для внедрения технологии искрового плазменного спекания в производство функционально-градиентных металл-керамических деталей газотурбинных двигателей, обеспечивающих работу при сверхвысоких температурах. Разработанные радиозащитные изделия на основе оксида тантала и биосовместимые имплантаты для костной регенерации могут найти применение в клинической практике онкологических и травматологических учреждений.

Разработанные методические подходы к исследованию кинетики фазообразования методом *in situ* синхротронной дифракции и принципы прогнозирования свойств керамик могут быть использованы в ведущих отраслевых и академических институтах при создании новых функциональных

материалов и могут быть рекомендованы для включения в учебные программы университетов по соответствующим дисциплинам.

Замечания

Отмечая высокий научный уровень диссертационной работы, следует сделать ряд замечаний:

1. При описании кинетики консолидации реакционных смесей (глава 4) автор выделяет несколько стадий усадки, однако количественная оценка энергий активации процессов, протекающих на разных стадиях, не проводилась, что могло бы дать дополнительную информацию о преобладающих механизмах спекания.

2. В главе 5 при исследовании влияния армирующей добавки SiCw вискером на свойства керамики (п. 5.2.2) не приведены данные по фазовому составу границ раздела «матрица-вискер», что важно для понимания механизмов упрочнения.

3. Также, в главе 5 автор демонстрирует уникальные результаты по получению ФГМ сложной формы в виде конструктивно подобного элемента лопатки ГТД. Однако критические рассуждения о масштабировании технологии ограничиваются моделированием напряжений в пресс-оснастке. В качестве рекомендательного замечания, хотелось бы отметить целесообразность обсуждения проблем перехода от лабораторного образца к промышленному изделию. В частности, не рассмотрены вопросы возникновения значительных градиентов температуры в крупногабаритной пресс-оснастке сложной формы. Это может приводить к неравномерному спеканию и разным механическим свойствам в объеме изделия (например, в тонкой лопатке и массивном замке лопатки). Отсутствие такого анализа не позволяет в полной мере оценить предсказательную способность разработанных автором подходов для реального производства.

4. В работе получен огромный объем экспериментальных данных, что иногда приводит к некоторой перегруженности графического материала и

затрудняет восприятие. Сокращение количества однотипных микрофотографий или вынос части данных в приложения могло бы улучшить структуру изложения.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей высокой научной и практической ценности диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Папынова Евгения Константиновича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена важная научно-техническая проблема — установлены закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств функциональных керамических материалов в условиях искрового плазменного спекания и разработаны научно-обоснованные технологические способы получения прототипов изделий для ядерной, авиакосмической и медицинской отраслей.

По актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований, теоретической и практической значимости полученных результатов диссертационная работа полностью соответствует требованиям п.п. 9-16 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям. Основные результаты диссертации в полной мере отражены в 41 научной работе, включая 20 статей в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus (из них 15 — в журналах первого и второго квартилей), 8 патентах РФ на изобретения. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Автор диссертации, Папынов Евгений Константинович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Отзыв рассмотрен, обсуждён и одобрен на заседании научно-технического совета Центра наноматериаловедения, подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра

«Кольский научный центр Российской академии наук» (ЦНМ КНЦ РАН),
протокол № 6 от «24» марта 2026 года.

На заседании присутствовало 27 членов из 31. Результаты голосования:
«за» — 27, «против» — нет, «воздержавшихся» — нет.

Председатель заседания
Заведующий лабораторией арктической
минералогии и материаловедения ФИЦ
КНЦ РАН, доктор химических наук

С.М. Аксенов



«24» марта 2026 года

Подпись *С.М. Аксенова*
ПО МЕ. РАБОТЫ УДОСТОВЕРЯЮ

Начальник общего отдела
ФИЦ КНЦ РАН
Л.В. Коструб
«24» марта 2026 года

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный
исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук»
184209, Апатиты, Мурманской обл., ул. Ферсмана, д.14
E-mail: ksc@ksc.ru; Тел.: +7 81555 79307