

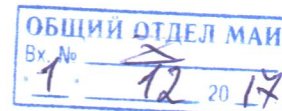
ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физико-математических наук, Ризаханова Ражудина Насрединовича, начальника Центра по применению нанотехнологий в энергетике и электроснабжении космических систем Государственного научного центра Российской Федерации — федерального государственного унитарного предприятия «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», на диссертационную работу Ситникова Сергея Анатольевича «Разработка стойких к ионной эрозии материалов на основе нитрида кремния для разрядных камер электроракетных двигателей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Актуальность темы. Детали из керамических материалов используются в конструкции большинства перспективных электроракетных двигателей (ЭРД) и зачастую определяют основные параметры таких установок. Применяемые в настоящее время керамические композиции с высокими диэлектрическими свойствами и технологии получения изделий не дают возможности оперативного изготовления узлов ЭРД по причине значительных затрат времени и средств на изготовление технологической оснастки, использования дорогостоящего оборудования, что значительным образом снижает эффективность исследовательской работы при разработке новых двигательных установок для космических летательных аппаратов. В работе исследуется возможность изготовления керамических изделий сложной геометрической формы, в том числе деталей, получение которых при помощи мехобработки невозможно или нерационально, а также возможность изготовления крупногабаритных керамических изделий.

Положения, выносимые на защиту, представляются обоснованными, они коррелируются с пунктами научной новизны и практической значимости.

Достоверность. Достоверность полученных автором диссертации результатов, научных положений и выводов, содержащихся в диссертации, обуславливается удовлетворительным совпадением теоретических и экспериментальных результатов, полученных с использованием современных методов измерения электрофизических свойств разрабатываемых керамических материалов, а также таких современных методов структурно-фазовых исследований как сканирующая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ.



Научная новизна результатов, полученных автором диссертации, состоит в следующем:

1. Разработан подход по изготовлению разрядных камер ЭРД из керамических материалов с добавкой из нитрида кремния, устойчивых к ионно-плазменному распылению. Подход опирается на одностадийную технологию низкотемпературного реакционного спекания в среде азота заготовок, предварительно отформованных из смеси порошка поликристаллического кремния и неорганического порошка наполнителя. Осуществление низкотемпературного реакционного спекания при низком (не более до 0,15 МПа) давлении азота в печи обусловлено разработанными в работе режимами механоактивации исходного порошка кремния, предшествующей формовке, и отработанными автором температурным и газовым режимами в печи при осуществлении синтеза.

2. Установлено, что входящие в композиционный керамический материал $\text{BN-Si}_3\text{N}_4$ фазы BN гексагональной модификации и $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ тригональной модификации устойчивы к распылению ионами Ar^+ , Xe^+ , а фаза $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ гексагональной модификации подвержена интенсивному распылению. Таким образом, материал нитридной связки, полученный методом реакционного спекания, по большей части состоящий из $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$, особенно стоек к ионно-плазменному распылению.

3. Впервые предложены и реализованы аддитивные методы производства деталей ЭРД из высокотемпературной керамики. Это является следствием того, что автору удалось подобрать режимы, при которых конечная деталь не требует финишной мехобработки.

Практическая значимость результатов, полученных автором диссертации, состоит в следующем:

1. Достигнуто повышение эксплуатационных характеристик керамических материалов и изделий из них в условиях ионно-плазменной эрозии путем выбора оптимальных видов и концентраций компонентов.

2. Применение материалов с добавками нитрида кремния в совокупности с разработанными методами получения деталей из него позволяет существенно упростить и ускорить процедуру создания образцов ЭРД.

3. Проведенные экспериментальные исследования электрофизических свойств и стойкости к ионно-плазменному распылению разработанной керамики, а затем и эксплуатационные испытания изделий в

составе стационарных плазменных и ионных двигателей подтвердили возможность применения этого материала для изготовления деталей ЭРД по предложенным технологиям.

Содержание диссертации. Диссертация представляет собой рукопись объемом 151 страниц печатного текста, включая 80 рисунков, 19 таблиц, а также список цитируемой литературы, содержащий 120 наименования. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во **Введении** поднята проблема выбора керамического материала для диэлектрических деталей ЭРД и выделена решающая роль состава керамик в обеспечении требуемого ресурса. Кроме того, подчеркнута необходимость разработки новых керамических материалов с повышенной стойкостью к ионно-плазменным воздействиям

В первой главе представлен обзор работ, посвященный керамикам, используемым в разрядных камерах электроракетных двигателей. На основе анализа межатомных взаимодействий предложена система $\text{BN} + \text{Si}_3\text{N}_4$, удовлетворяющая комплексу требований, предъявляемых к материалам, устойчивых к ионно-плазменному распылению. Осуществлен выбор нескольких технологий для получения композиционной керамики.

Вторая глава содержит описание методики проведения экспериментов по получению образцов и результаты исследования их физических свойств, наиболее важным из которых является стойкость к ионному воздействию. Показано, что система $\text{BN} + \text{Si}_3\text{N}_4$ является перспективным материалом для изготовления диэлектрических деталей электрических ракетных двигателей (по механическим, структурно-фазовым, электрическим и др. характеристикам).

Третья глава, наиболее объемная, посвящена разработке оборудования и выбору технологических режимов для изготовления керамических деталей электрических ракетных двигателей. Исследован широкий спектр вопросов, сопровождающих получение деталей на всем протяжении технологической цепочки – от контроля исходной засыпки до реакционного спекания. Установлено, что методы горячего литья, трехмерного моделирования методами наплавленного слоя (аддитивных технологий) и впрыска связующего, а также реакционного спекания позволяют обеспечить точность размеров от 0,01 до 0,2 мм без дополнительной механической обработки. Таким образом, показано, что выбранные материалы и технологические процессы перспективны для быстрого, относительно дешевого изготовления деталей сложной формы для ЭРД.

В четвертой главе приведены результаты использования изготовленных деталей в различных узлах электрических ракетных двигателей. Так, ускорительный канал стационарного плазменного двигателя, изготовленный из разработанной керамики, способен обеспечить повышение ресурса на 20 – 50 % без ухудшения функциональных характеристик. Также не выявлено отклонений в работе высокочастотного ионного двигателя, у которого разрядная камера была изготовлена из исследуемой керамики. Однако замена традиционных материалов на новые позволяет снизить затраты на изготовление в 3 раза, а сроки разработки – в 2 раза.

В **заключении** автор делает закономерный вывод о том, что диэлектрические и прочностные свойства керамики на основе нитрида кремния, изготовленной по технологиям разработанным в рамках данной работы, позволяют использовать ее для изготовления деталей различных типов ЭРД для космических летательных аппаратов.

Диссертация С.А. Ситникова является законченной работой, в которой предложены и апробированы новые керамические материалы, а также технологические процессы их получения с возможностью применения в качестве диэлектрических деталей ЭРД.

Однако следует учесть следующие замечания:

1. Отсутствуют конкретные значения продолжительности изготовления конечных изделий средних размеров и сложности по разработанным технологиям, например, от момента получения конструкторской документации.

2. Не указано, коррелируют ли полученные данные по стойкости к ионно-плазменной эрозии материала $S_3N_4 + BN$ с результатами аналогичных исследований в других научных организациях.

3. Известно, что небольшие (до 0,5 %) добавки наночастиц способны заметно изменить свойства керамик. Автор, к сожалению, ограничился исследованием влияния процентного содержания керамики на ее характеристики, не уделив должного внимания добавкам.

4. Формулу Бёте (2.3) автор комментирует следующим образом: «...тормозная способность увеличивается с уменьшением атомного номера элементар...» и связывает рассеяние энергии с упругими столкновениями электронов. На самом деле, тормозная способность растет с ростом атомного номера, а снижение энергии электрона связано с ионизационными потерями.

В целом отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертация Ситникова С.А. является законченной научно-квалификационной работой, посвященной исследованию вопроса создания керамики с лучшими технологическими и эксплуатационными характеристиками. Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации. Результаты работы опубликованы в 18 научных трудах, из них 1 – в журнале, входящем в международные реферативные базы данных и системы цитирования, 7 – в реферируемых журналах из перечня ВАК, 11 – в материалах международных конференций и симпозиумов

Представленная работа соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Ситников С.А., заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Официальный оппонент

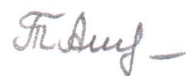
кандидат физико-математических наук,
начальник Центра по применению
нанотехнологий в энергетике и
электроснабжении космических систем
Государственного научного центра Российской
Федерации — федерального государственного
унитарного предприятия «Исследовательский
центр имени М.В.Келдыша»



Р.Н. Ризаханов

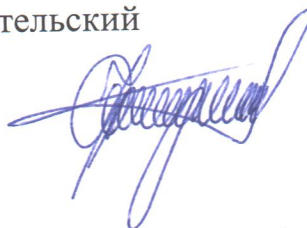
125438, Москва, Онежская ул., д. 8
Телефон +7 (495) 456 80 83
e-mail: nanocentre@kerc.msk.ru

05.12.2017г



Подпись удостоверяю:

Ученый секретарь
Государственного научного центра Российской
Федерации — федерального государственного
унитарного предприятия «Исследовательский
центр имени М.В.Келдыша»
кандидат военных наук



Ю.Л. Смирнов

