

Утверждаю

Генеральный директор

ОАО НИИ АТ

В.Х. Зиннуров

«ноябрь» 2017 г.

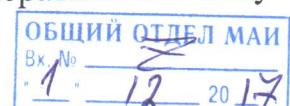


Отзыв

ведущей организации на диссертацию 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 работы.**

Преимущества электроракетных двигателей (ЭРД) перед другими системами управления и перемещения космических аппаратов становятся все более весомыми с увеличением эксплуатационного срока их существования. В конструкции большинства перспективных ЭРД используются детали из керамических материалов, определяющие основные параметры двигателей. Данные керамические композиции обладают высокими диэлектрическими свойствами и устойчивы к ионно-плазменному распылению. В стационарных плазменных двигателях главным фактором, ограничивающим его ресурс, является стойкость к распылению керамического узла. При разработке перспективных ЭРД керамические детали требуют значительных временных затрат на отладку производства каждого нового изделия, снижая возможности конструктора быстро вносить изменения в конструкцию разрабатываемого двигателя и проверять его эффективность на практике. Техническая керамика на основе нитрида кремния давно и успешно конкурирует с металлическими сплавами, оксидными керамиками и другими материалами во многих областях техники, обладая такими свойствами, как высокая твердость, термическая и химическая стойкость, электроизоляционные свойства, малая зависимость механических свойств от температуры и т.п. Сочетание указанных свойств позволяет ожидать перспективного применения этого материала для изготовления деталей различных ионных и плазменных устройств, в том числе и ЭРД. Используемые до этого материалы и технологии получения керамических изделий из них малоприспособны для оперативного получения



узлов ЭРД по причине значительных затрат времени и средств на изготовление технологической оснастки, использования дорогостоящего оборудования, что значительно снижает эффективность исследовательской работы при разработке новых двигательных установок для ориентации и перемещения космических летательных аппаратов.

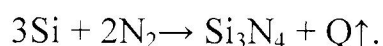
Рассматриваемая работа посвященная, разработке стойких к ионной эрозии материалов на основе нитрида кремния, является весьма актуальной, так как позволяет обеспечить широкое применение данной керамики, которая в настоящее время имела ограниченное применение из-за недостаточности проработки данной темы (не были рассмотрены вопросы получения керамических деталей ЭРД, отсутствуют работы по альтернативным решениям проблемы обеспечения эрозионной стойкости керамики и возможности снижения материальных затрат на их изготовление).

#### **Научная новизна работы.**

Научно обоснован подход по изготовлению разрядных камер электроракетных двигателей из керамических материалов на основе нитрида кремния. Подход опирается на одностадийную технологию реакционного спекания в среде азота заготовок, предварительно отформованных одним из методов трехмерного моделирования (методом наплавленного слоя (FDM) или методом впрыска связующего (Binder Jetting)) или классическим методом горячего литья.

Исследованные зависимости процесса ионно-плазменного распыления позволили установить закономерности процесса распыления керамических материалов на основе BN-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Показано, что фазы BN гексагональной модификации и α-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> тригональной модификации устойчивы к распылению ионами Ar<sup>+</sup>, Xe<sup>+</sup>, фаза β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> гексагональной модификации подвержена интенсивному распылению. Общая деградация структуры материалов системы BN-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> происходит в результате распыления матрицы на основе β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и последующего выкрашивания одиночных частиц BN и α-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, утративших связь с основной массой керамики.

Установлены закономерности влияния параметров технологического процесса реакционного спекания в среде азота отформованных заготовок на механические свойства изделий. В частности, увеличение темпов нагрева до 100 град/час в диапазоне температур от 473 К до 1443 К процесса приводит к возникновению напряжений в объеме получаемых изделий, а увеличение темпов нагрева до 30 град/час в диапазоне температур от 1443 К до 1673 К приводит к повышению пористости изделий в результате потери исходного кремния за счет его частичного выплавления, связанного с высокой экзотермичностью реакции



### Практическая значимость работы.

Достигнуто повышение эксплуатационных характеристик керамических материалов и изделий из них в условиях ионно-плазменной эрозии путем выбора оптимальных видов и концентраций наполнителей в матрицу из нитрида кремния. В частности, наиболее эффективно себя показала керамика системы BN-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с весовым содержанием нитрида бора на уровне 50-90 вес. %.

Разработаны технологические процессы формования заготовок деталей ЭРД из поликристаллического кремния с добавками необходимых неорганических наполнителей (BN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC и др.):

- по методу горячего литья керамики. Спроектирован и изготовлен участок для получения заготовок методом заливки термопластичного шликера с содержанием парафинов на уровне 12-30 вес. % под давлением 0,5-0,6 МПа и при температуре 343 – 363 К в металлические формы. Метод позволяет получать заготовки с точностью не ниже 0,01 мм;

- путем трехмерного моделирования по методу послойного наплавления (FDM) спроектирована и изготовлена установка для получения заготовок методом послойного нанесения термопластичного шликера с содержанием парафинов на уровне 12-30 вес. % под давлением 0,10-0,15 МПа и при температуре 343 – 363 К на платформу, программно перемещаемую по осям X, Y и Z, метод позволяет получать заготовки с точностью не ниже 0,2 мм, скорость роста заготовок оставляет не менее 0,5 мм/час;

- путем трехмерного моделирования по методу послойного впрыска связующего (Binder Jetting) спроектирована и изготовлена установка для получения заготовок методом послойного нанесения исходного порошка с содержанием эпоксидных диановых смол (например, ЭД-20) на уровне 12-20 вес. % с последующим ультразвуковым уплотнением порошка и нанесением на его поверхность связующего (отвердителя) по программно заданной траектории, этот метод позволяет получать заготовки с точностью не ниже 0,2 мм. при скорости роста заготовок не менее 0,5 мм/час.

Впервые предложен способ повышения плотности заготовок, формирующихся трехмерным моделированием при помощи метода впрыска связующего (Binder Jetting). Суть предложенного способа заключается в использовании послойного уплотнения исходного порошка методом его подпрессовки с незначительным давлением (до 0,25 МПа) при помощи пуансона перед каждым нанесением связующего. Активация уплотнения обеспечивается продольными ультразвуковыми колебаниями, возбуждаемыми в пуансоне пьезоэлектрическим излучателем. Применение ультразвукового уплотнения порошка позволяет более чем в 2 раза повышать прочность на изгиб моделируемых изделий.

Разработан технологический процесс реакционного спекания заготовок из поликристаллического кремния с добавками необходимых неорганических наполнителей, отформованных методом горячего литья керамики или



методами трехмерного моделирования. Реакционное спекание осуществляется в герметизированной печи при максимальной температуре спекания ниже 1673 К в среде технического азота с низким (до 0,15 МПа) его давлением. В результате открывается возможность получения деталей ЭРД из керамики на основе нитрида кремния с высокими механическими и диэлектрическими свойствами, стойкой к термическим ударам, высокотемпературному окислению и ионно-плазменной эрозии.

Технические решения, полученные автором, реализованы в изделиях из керамических материалов на основе нитрида кремния, соответствуют критериям мировой новизны и защищены двумя заявками на изобретение РФ (заявка на патент РФ № 2016143185 от 03.11.2016 г., заявка на патент № 2017108155 от 13.03.2017 г.). Рекомендованы для внедрения в узлы и агрегаты ракетно-космической техники, в том числе для получения газоразрядных камер ЭРД.

**Достоверность результатов** научных положений и сделанных выводов достигается совпадением теоретических и экспериментальных результатов, полученных с использованием современных лазерно-оптических методов измерения параметров, а также сравнением с результатами других авторов, исследовавших устройства аналогичного назначения.

В качестве замечаний можно отметить:

1.Глава 2.2. посвящена исследованиям распыляемости, сформированных керамик при воздействии ионов Ar и Xe, однако результаты исследований приведены только для Xe. Эффект воздействия ионов Ar на керамику, с научной точки зрения, интересен тем, что в потоке Ar, как правило, содержится остаточный кислород, разрушающий керамику в ускорителях типа УЗДП, применяемых в установках для ВИП обработки (нанесение покрытий).

2. В тексте диссертации нет четкости в изложении вопроса применения конкретного типа композита для различных типов ЭРД и требуется пояснение отличий в использовании этого материала для различных типов СПД.

Сделанные замечания не снижают научную и практическую ценность рассматриваемой диссертации.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 8 научно-технических конференциях, опубликованы в 20 печатных работах, в том числе 9 статьей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в области создания тепловых, электроракетных

двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа является законченной научно-исследовательской и квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития авиакосмической и двигателестроительной отрасли, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а её автор Ситников Сергей Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Отзыв рассмотрен на заседании НТС лаборатории ионно-вакуумной обработки поверхности (протокол № 7 от 29 ноября 2017 года). На заседании присутствовало 7 членов из 9. Результаты голосования: «за» – 7, против – нет, воздержавшихся – нет.

Зам. Генерального директора по  
науке, д.т.н., проф.



В.Н. Егоров

Начальник НИЛ, к.т.н.



С.Б. Иванчук

ОАО «Национальный институт авиационных технологий»  
117587, г. Москва, Кировоградская ул., д. 3, info@niat.ru

Егоров Виталий Николаевич  
Иванчук Светлана Борисовна

05.12.2017 *Тубец -*