

Федеральное государственное унитарное предприятие  
«ОПЫТНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО «ФАКЕЛ»  
ОКБ «ФАКЕЛ»

Россия 236001. г. Калининград обл., Московский проспект, 181,  
Факс: 8-(4012) 538-472. e-mail: info@fakel-russia.com  
ОКПО 07556982, ОГРН 1023901002927, ИНН 3906013389, КПП 392550001

УТВЕРЖДАЮ

ИО генерального конструктора

ФГУП ОКБ "Факел"



А. И. Корякин

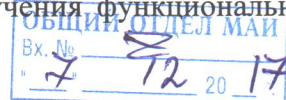
27 ноября 2017 г.

О Т З Ы В

на автореферат диссертационной работы Ситникова Сергея Анатольевича «Разработка стойких к ионной эрозии материалов на основе нитрида кремния для разрядных камер электроракетных двигателей», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук в диссертационный совет Д212.125.08 при Московском авиационном институте (государственном техническом университете) по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» (технические науки).

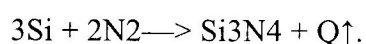
Преимущества электроракетных двигателей (ЭРД) перед другими тяговыми системами становятся все более весомыми с увеличением срока активного существования космических аппаратов. В конструкции большинства перспективных ЭРД используются детали из керамических материалов, определяющие основные параметры двигателей. Это керамические композиции с высокими диэлектрическими свойствами и устойчивые к ионно-плазменному распылению. В ряде случаев, например, в стационарном плазменном двигателе одним из факторов, ограничивающих его ресурс, является именно стойкость керамического узла к распылению. Эффективность исследовательской работы при разработке новых двигательных установок для космических летательных аппаратов существенно зависит от материалов и технологий получения керамических изделий. И актуальность темы диссертационной работы Ситникова С.А., в которой решается одна из основных проблем, возникающих при разработке перспективных ЭРД, а именно разработка стойких к ионной эрозии материалов на основе нитрида кремния и технологии изготовления керамических деталей разрядных камер ЭРД, очевидна.

Автором разработаны композиционные керамические материалы, с матрицей из нитрида кремния и дисперсными неорганическими наполнителями, стойкие к ионно-плазменной эрозии, и технологические процессы быстрого получения функциональных



прототипов керамических деталей (разрядных камер) электроракетных двигателей. Основные положения, которые выносятся на защиту обоснованы и не вызывает сомнений.

Научная новизна работы заключается в том, что автором созданы научное обоснование подхода 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; установлены закономерности процесса ионно-плазменного 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 Ag<sup>+</sup>, Xe<sup>+</sup>, фаза P-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 p-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



Научная новизна материаловедческих, технических и конструкторских решений защищена двумя заявками на изобретения РФ (заявка на патент РФ № 2016143185 от 03.11.2016 г., заявка на патент № 2017108155 от 13.03.2017 г.).

Практическая значимость выполненной автором работы подтверждена экспериментальными исследованиями функционирования разработанной керамики в различных типах ЭРД : модели стационарного плазменного двигателя (СПД) мощностью 300-500 Вт с ускорительным каналом из электропроводящей секции с керамическими кольцами на выходе и модели высокочастотного ионного двигателя (ВЧИД). .

Стойкость к ионному распылению новой керамики на основе нитрида кремния оценена проведением испытаний вышеуказанной модели СПД и сравнением с испытаниями в аналогичных условиях работы данного двигателя с кольцами из традиционной керамики БГП-10. «Износ» новой керамики в выходном сечении составил 0,1 мм, «износ» керамики БГП- составил 0,15...0,22 мм. Можно отметить как преимущество выполненной автором работы, что полученный результат подтверждает потенциальную способность новой керамики при применении в СПД повысить ресурс СПД по разрушению керамики не менее, чем в 1,2 раза.

По испытаниям новой керамики в составе ВЧИД, следует отметить, автором было установлено что применение новых материалов не ухудшает работу ВЧИД. Так как при

замене традиционных для ВЧИД материалов (кварцевое стекло и окись алюминия (керамика марки ВК-100-2)) стенок газоразрядной камеры в которой происходит ионизация ксенона новой керамикой, полученной в рамках диссертационной работы технологии горячего литья керамики из кремния с последующим реакционным превращением (связыванием) кремния в нитрид кремния (РСНК)- керамического композита, содержащего равные доли корунда и нитрида кремния, никаких существенных отклонений в параметрах двигателя выявлено не было.

Следует отметить что на основании результатов этих испытаний автором сделан вывод о том, что диэлектрические и прочностные свойства керамики на основе нитрида кремния позволяют использовать ее для изготовления деталей различных типов ЭРД для космических летательных аппаратов. Замена традиционно применяемых в таких узлах керамических материалов на разработанные позволяет более чем в три раза снизить затраты на изготовление и в два раза снизить сроки на их разработку при эквивалентных или даже лучших эксплуатационных свойствах.

Особый интерес вызывают разработанные автором материалы и технологии изготовления деталей для двигателей космических аппаратов, существенно снижающие временные затраты на изготовление и значительно повышающие точность геометрических размеров без дополнительной механической обработки, вычислительные алгоритмы позволившие снизить количество дорогостоящих натуральных экспериментов по отладке температурного и газового режимов получения отформованной заготовки практически безусадочным синтезом.

Проделанная работа имеет значимую практическую ценность

Полученные результаты сопоставлялись с данными независимых исследователей. Численное моделирование температурного и газового режимов при реакционном спекании основано на использовании физико-математической модели, основанной на законах сохранения массы, импульса и энергии двухфазной смеси, записанных в дифференциальной форме.

Личный вклад и апробация работы и новаторский стиль разработки подтверждаются публикациями автора и патентами на изобретения.

Автором достаточно подробно описаны закономерности процесса ионно-плазменного распыления керамических материалов подробно исследована решающая роль состава новых керамических материалов с повышенной устойчивостью к ионно-плазменным воздействиям в обеспечении требуемого ресурса на основании системного подхода и литературных источников, однако при этом следует отметить, что не указаны физические свойства новой керамики в продольном и поперечном направлениях; автор не отметил, что ОКБ «Факел» успешно использует разрядные камеры СПД из керамики чистого NB, что как отмечено в работе является одним из перспективных материалов, и двигателя СПД ОКБ «Факел» с чистым NB имеют летную историю.

Диссертационная работа «Разработка стойких к ионной эрозии материалов на основе нитрида кремния для разрядных камер электроракетных двигателей» удовлетворяет всем требованиям Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к

кандидатским диссертациям, а ее автор, Ситников Сергей Анатольевич, заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Отзыв на диссертационную работу Ситникова Сергея Анатольевича утвержден на заседании НТС ОКБ «Факел» 27 ноября 2017 г. протокол № 14-11-2017с1.

Заместитель начальника отдела 301  
ФГУП ОКБ "Факел",  
кандидат технических наук  
Главный специалист комплекса 500  
ФГУП ОКБ "Факел"

 Приданников С.Ю.

 Панфилов В.А.

Учёный секретарь НТС  
ФГУП ОКБ «Факел»  
Ведущий специалист

 Нятин А.Г.

Подписи Приданникова Сергея Юрьевича и  
Панфилова Виталия Алексеевича  
удостоверяю  
Начальник общего отдела



 Шевченко Л.Г.

Полное название организации: Федеральное государственное унитарное предприятие  
«ОПЫТНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО «ФАКЕЛ»

Почтовый адрес: Россия 236001, г. Калининград обл., Московский проспект, 181

Телефон: 8(4012) 53-84-72

Официальный сайт:

Электронная почта: [info@fakel-russia.com](mailto:info@fakel-russia.com)

07.12.2017г. 