

160 мм затруднительно в рамках технологии изготовления керамических изделий. Наряду с трудностями изготовления непреодолимой проблемой ГРК из оксидной керамики является низкая стойкость к вибрационным нагрузкам тонкостенных керамических изделий, которые возникают при выводе КА на околоземную орбиту. Особенностью таких композиционных материалов являются их высокие диэлектрические свойства и феноменальная стойкость к вибрации. К существенным недостаткам следует отнести узкий (по сравнению с керамикой) интервал рабочих температур (до +300 °С).

Наполненные конструкции ГРК представляют собой композиционный материал, в качестве матрицы которого возможно применение силиконовых эластомеров, а в качестве дисперсионного наполнителя – ультрадисперсные порошки, такие как порошки оксидов алюминия, бериллия, кремния или нитридов бора, кремния и т.д.

Работа выполнена в Московском авиационном институте при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-29-18083/18).

Список литературы

- 1 Rabinsky, L. N. Development of technologies for obtaining composite material based on silicone binder for its further use in space electric rocket engines / L. N. Rabinsky, S. A. Sitnikov // *Periodico Tchê Quimica*. – 2018. – Vol. 15 (Special Issue 1). – P. 390–395.
- 2 Ситников, С. А. Разработка стойких к ионной эрозии материалов на основе нитрида кремния для разрядных камер электроракетных двигателей / С. А. Ситников : дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05. – М. : Московский авиационный институт (НИУ), 2017. – 103 с.

УДК 629.7.036.7

РАЗРАБОТКА АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ИЗ ПОЛИМЕР-КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

В. А. ПОГОДИН, Л. Н. РАБИНСКИЙ, С. А. СИТНИКОВ

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Электрические ракетные двигатели (ЭРД) используются в космической технике для стабилизации и коррекции орбит геостационарных спутников [1–3]. Существует большой задел по применению ЭРД в качестве маршевых двигателей для межпланетных автоматических и пилотируемых аппаратов. Работа ЭРД основана на образовании плазмы рабочего газа и последующим ускорении её компонентов с помощью электрического поля. Высокий необходимый ресурс (более 10000 часов) в сочетании с большим количеством циклов включения – выключение генерирует множество конструкторских и технологических проблем при разработке и производстве этого устройства. Например, в таком ЭРД, как высокочастотный ионный двигатель (ВЧИД) образование плазмы рабочего газа происходит под воздействием высокочастотного электромагнитного поля внутри тонкостенной чаши керамической газоразрядной камеры (ГРК) [4, 5]. Увеличение КПД, а также мощности ВЧИД приводит к увеличению диаметра ГРК до значения 500 мм, при сохранении толщины стенки 4–5 мм. Рост диаметра ГРК ВЧИД и высокие требования к диэлектрическим свойствам материалов для изготовления ГРК приводит к ряду непреодолимых технологических сложностей при их производстве. На сегодняшний день изготавливаются экспериментальные образцы ГРК из алюмооксидной и композитной керамики на основе нитрида кремния для ВЧИД с диаметром камеры порядка 160 мм [6–11]. Эти ГРК обладают высокими эксплуатационными характеристиками: проницаемостью в электромагнитном поле (мегагерцовом диапазоне частот), механической прочностью к вибрации, эрозионной стойкостью к ионно-плазменному воздействию низкотемпературной плазмы разряда. Дальнейшее увеличение диаметра ГРК выше 160 мм затруднительно в рамках современных технологий изготовления керамических изделий. Наряду с трудностями изготовления непреодолимой проблемой ГРК из керамики является низкая стойкость этого материала к вибрационным нагрузкам. Тонкостенные керамические изделия, которыми являются ГРК, подвергаются достаточно высоким значениям знакопеременных механических нагрузок при выводе космического аппарата на околоземную орбиту. Решением этой проблемы может стать переход на композиционные материалы, более устойчивые к вибрации. В качестве материала матрицы для такого композиционного материала авторами предложены кремнийорганические полимерные связующие.

В результате проведенной авторами серии экспериментов, включавших в себя:

- отработку композиций системы кремнийорганический эластомер – керамика;
- отработку технологии изделий из композита системы кремнийорганический эластомер – керамика формовки в жесткую металлическую форму;
- отладку температурной экспозиции образцов кремнийорганических материалов (при температурах до 370 °С в вакууме) во избежание загрязнений внутренних поверхностей ЭРД и вакуумного испытательного стенда продуктами пиролиза материала ГРК;
- проверку эксплуатационных свойств изделий из композита системы кремнийорганический эластомер – керамика в условиях, близких к условиям эксплуатации ГРК ВЧИД.

Установлено, что материал, состоящий из порошка α -нитрида кремния со средним размером частиц 10– 50 мкм, диспергированного в кремнийорганическом связующем, в количестве до 70 % масс., отвечает всем необходимым требованиям. В частности, ГРК из композиционного материала на основе силиконового каучука, наполненного нитридом кремния (с массовой долей 60 %), изготовленная в лаборатории 9-го института МАИ, прошла испытания в составе макета ВЧИД 100 на стенде кафедры 208 МАИ, в условиях, максимально приближенным к эксплуатации в космосе (рисунок 1).

Также в ходе проведенной работы был разработан технологический процесс получения ГРК методом 3D-печати [12–15] из материала системы кремнийорганический эластомер – керамика [15–18]. В качестве рабочего прототипа был выбран процесс 3D-печати по методу послойного наплавления (англ. fused deposition modeling, FDM). Была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка для получения заготовок методом послойного нанесения исходного состава композита из предварительно отвакуумированного бункера на платформу, программно перемещаемую по осям X , Y и Z . Подача исходного материала полимеркерамического композита к поверхности построения изделия обеспечивался электромеханическим шприцевым дозатором через подогреваемую (для снижения вязкости) фильеру. Ускорение процесса поликонденсации полимерной матрицы в составе композита осуществлялась инфракрасным нагревом при помощи перемещаемого источника. Введение управления дозатором и источником инфракрасного нагрева в единую систему управления установкой позволило управлять балансом между скоростью упрочнения свеженанесенного слоя исходного состава и его адгезионной способностью по отношению к следующему (наносимому) слою. Метод позволяет получать ГРК с точностью не ниже 0,3 мм. Скорость роста заготовок составляет не менее 0,5 см/ч.

В результате разработки этой технологии открылась возможность получения деталей ЭРД из полимеркерамического композита с высокими механическими и диэлектрическими свойствами, стойких к нагреву до 400 °С. Проведенные испытания продемонстрировали, что разработанный полимеркерамический композит, является конструкционным материалом деталей ЭРД, стойким к вибрации и нагреву до 400 °С, а разработанный технологический процесс позволяет обеспечить быстрое изготовления функциональных прототипов ГРК. При этом возможности данного материала можно менять, варьируя соотношение наполнитель – матрица, на стадии составления исходного состава.

Работа выполнена в Московском авиационном институте при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-29-18083/18).

Список литературы

- 1 Импульсные плазменные двигатели в системах управления космических аппаратов / Н. Н. Антропов [и др.] // Прикладная физика. – 2002. – № 1.
- 2 Горшков, А. С. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов / А. С. Горшков, В. А. Муравьев, А. А. Шагайда ; под ред. академика РАН А. С. Коротева. – М. : Машиностроение, 2008. – С. 42–55.
- 3 Loeb, H. W. A realistic concept of a manned Mars mission with nuclear-electric propulsion / H. W. Loeb // Acta Astronautica. – 2015. – P. 299–306.
- 4 Ситников, С. А. Разработка стойких к ионной эрозии материалов на основе нитрида кремния для разрядных камер электроракетных двигателей : дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / С. А. Ситников. – М. : Московский авиационный институт (НИУ), 2017. – 103 с.

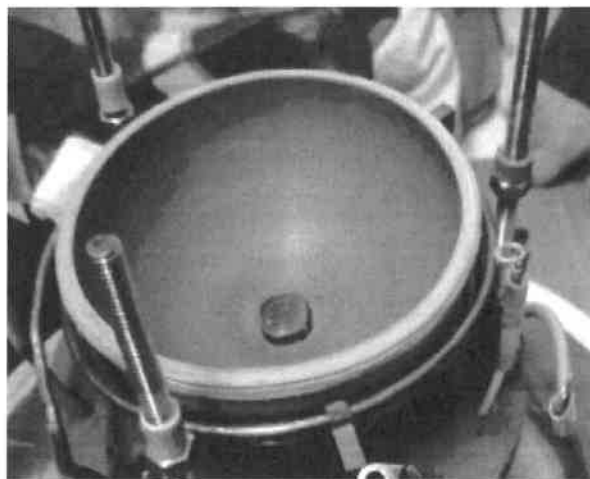


Рисунок 1 – Газоразрядная камера из материала системы кремнийорганический эластомер – керамика в составе макета ВЧИД

- 5 Выбор конструкционных материалов для высокочастотных ионных двигателей / С. А. Хартов [и др.] // Труды МАИ [Электронный ресурс]. – 2013. – № 63. – Режим доступа : <http://trudymai.ru>. – Дата доступа : 27.07.2019.
- 6 Рабинский, Л. Н. Создание действующих прототипов керамических газоразрядных камер высокочастотных ионных двигателей, стойких к ионно-плазменному распылению методом послойного моделирования / Л. Н. Рабинский, С. А. Ситников, С. А. Хартов // Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы : тезисы докладов V Междунар. науч. семинара (Москва, 17–19 ок-тября 2016 г.). – М. : Изд-во ООО «ТР-принт», 2016. – С. 159–160.
- 7 Погодин, В. А. Исследование пористой керамики на основе нитрида кремния, полученной с использованием технологии трехмерной печати / В. А. Погодин, С. А. Ситников, Ю. О. Соляев // Новые огнеупоры. – 2016. – № 11. – С. 33–37.
- 8 Poliakov, P. O. Numerical modeling of residual thermal stresses in Si3N4 based high-porous fibrous ceramics / P. O. Poliakov, Y. O. Soliayev, S. A. Sitnikov // International Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2016. – 111(2). – P. 319–330.
- 9 Ripetsky, A. Fabrication of porous silicon nitride ceramics using binder jetting technology / A. Ripetsky, S. Sitnikov, L. Rabinskiy // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering [Electronic resource]. – 2016. – P. 1–6. – Mode of access : <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/140/1/012023/pdf>. – Date of access : 27.07.2019.
- 10 Рабинский, Л. Н. Сравнительная оценка и выбор варианта решения задачи по разработке технологии изготовления образцов и элементов конструкций из композиционной нитридокремневой керамики / Л. Н. Рабинский, С. А. Ситников, Ю. О. Соляев // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : материалы XXII Междунар. симпозиума им. А. Г. Горшкова (Вятичи, 15–19 февраля 2016). Т. 2. – М. : Изд-во ООО "ТР-принт", 2016. – С. 108–109.
- 11 Погодин, В. А. Исследование пористой керамики на основе нитрида кремния, полученной с использованием технологии трехмерной печати / В. А. Погодин, С. А. Ситников, Ю. О. Соляев // Новые огнеупоры. – 2016. – № 11. – С. 33–37.
- 12 Масштабные эффекты в механике сплошных сред. Материалы с микро- и наноструктурой / С. А. Лурье [и др.]. – М. : Изд-во МАИ-Принт, 2011. – 158 с.
- 13 Formalev, V. F. Localization of thermal disturbances in nonlinear anisotropic media with absorption High Temperature / V. F. Formalev, E. L. Kuznetsova, L. N. Rabinskiy. – 2015. – Vol. 53. – No. 4. – P. 548–553.
- 14 Rabinskiy, L. Development of technologies for obtaining composite material based on silicone binder for its further use in space electric rocket engines / L. Rabinskiy, S. Sitnikov // Periodico Tche Quimica. – 2018.
- 15 Погодин, В. А. Технологические аспекты 3D-печати деталей газоразрядной камеры электроракетного двигателя / В. А. Погодин, Л. Н. Рабинский, С. А. Ситников // СТИН 2019. – № 4. – С. 20–21.
- 16 Виноградов, С. В. Прогресс в области производства и применения MQ-смола / С. В. Виноградов, А. Н. Поливанов, Е. А. Чупрова // Химическая промышленность сегодня. – 2016. – № 1. – С. 13–18.
- 17 Молчанов, Б. В. Методы получения силиконов, содержащих [SiO₂]-звенья в основной цепи / Б. В. Молчанов, В. Д. Ким // Пластические массы. – 1997. – № 3. – С. 22–25.
- 18 Воронков, М. Г. Силоксановая связь / М. Г. Воронков, В. П. Милешкевич, Ю. А. Южелевский. – Новосибирск : Наука, 1976. – 413 с.

УДК 539.371

ДИНАМИЧЕСКОЕ ДОГРУЖЕНИЕ БАЛКИ ВСЛЕДСТВИЕ ВНЕЗАПНОГО ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ УПРУГОГО ОСНОВАНИЯ

А. А. ПОДДУБНЫЙ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

В. А. ГОРДОН

Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, Российская Федерация

Простейшей и широко применяемой в различных расчетах моделью взаимодействия нагруженной деформируемой системы, опирающейся на упругое основание, является модель Винклера.

Основание Винклера рассматривается как множество независимых пружин, работающих на растяжение – сжатие, закрепленных на абсолютно жестком континууме. Недостаток пружинной (клавишной) модели Винклера состоит в том, что при сопротивлении нагрузкам в некоторой точке основания в работу не вовлекаются соседние точки (пружины). Такая система справедлива лишь для оснований со слабой распределительной способностью (мягкие, рыхлые грунты и т.д.). Этот недостаток решается с помощью модели Пастернака (двухпараметрическое основание). Вторым параметром k_2 , вводимый дополнительно к параметру Винклера k_1 , учитывает сдвиговые реакции основания.

В работе рассматривается задача по построению математической модели динамического процесса, возникающего в несущей статическую нагрузку балке, опирающейся на двухпараметрическое основание Пастернака при внезапном образовании дефекта основания, по длине контакта с балкой, заключающегося в утрате свойств основания сдвиговой жесткости, т.е. внезапном обнулении k_2 .

До появления дефекта напряженно-деформированное состояние всей конструкции определялось статическим воздействием. Внезапное образование дефекта приводит к снижению общей жесткости