

ские образцы ГРК отличаются низкой стойкостью к вибрационным нагрузкам, возникающим при выводе КА на околоземную орбиту. Решением этой проблемы стало изготовление ГРК из композиционного материала на кремнийорганическом связующем. Матрица таких материалов может быть изготовлена из силиконовых эластомеров. В качестве дисперсионного наполнителя можно использовать мелкодисперсные порошки таких неорганических материалов, как оксиды алюминия, бериллия или кремния, нитриды бора или кремния и т. д. К недостаткам этого материала относится его низкая рабочая температура (до +270 °С). Так как проведение непосредственных измерений температуры внутри работающего ВЧИД является сложной технической задачей, то большой практический интерес представляет моделирование физико-химических процессов, протекающих при работе ВЧИД, и, в том числе, численные расчеты температур элементов конструкции и, в частности, ГРК с целью определения пригодности того или иного материала на необходимом режиме работы двигателя.

Численные расчеты температур в ВЧИД-10 с ГРК, изготовленной из полимер-керамического композиционного материала системы нитрид кремния (дисперсный наполнитель) – кремнийорганический каучук типа СКТВ (матрица) проводились с использованием программного комплекса ANSYS [1], в котором используется метод разбиения объекта на большое количество элементов. В данных расчетах число элементов сетки разбиения ВЧИД составило $\sim 10^5$.

Плазмофизические процессы, протекающие в разряде, приводят к выпадению ионов, электронов и фотонов из плазмы на поверхности ГРК и электродов ионно-оптической системы. Предполагается, что приносимая компонентами плазмы мощность поглощается элементами двигателя, граничащими с плазмой, в виде тепла. Также в индукторе и других проводящих элементах конструкции ВЧИД предположительно выделяется тепло вследствие протекающих в них вихревых токов, индуцируемых высокочастотным электромагнитным полем. Образующиеся тепловые потоки использовались в численном расчете в качестве граничных условий II рода. Выражения для расчёта тепловых потоков в ВЧИД приведены в [2, 3].

Была успешно проведена серия расчетов температурных полей в ВЧИД – 10 с диаметром основания цилиндрической ГРК, равным 100 мм, при значениях ионного тока от 0,1 и 0,2 А, что соответствовало мощностям ВЧИД 100 и 200 Вт. Максимальные, минимальные и средние температуры на поверхности ГРК при значениях ионного тока 0,2 А составили 250, 170 и 220 °С соответственно, что находится в пределах допустимых значений температур работы матрицы композита – кремнийорганического каучука. В перспективе планируется проведение численных расчетов и экспериментов с различными составами компаундов для ГРК для выявления предельных режимов работы ВЧИД при их использовании.

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

Список литературы

- 1 ANSYS [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа : www.ansys.com. – Дата доступа : 28.09.2020.
- 2 **Абгарян, В. К.** Тепловая модель высокочастотных ионных двигателей и источников ионов / В. К. Абгарян, К. И. Круглов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2015. – № 11. – С. 21–27.
- 3 **Abgaryan, V. K.** Ion-Electron Recombination and Heat Fluxes in High-Frequency Ion Sources / V. K. Abgaryan, A. A. Semenov // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2018. – Vol. 12. – No. 5. – P. 1022–1031.

УДК 593.3

ПОЛИМЕРНЫЕ ПРЕКУРСОРЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

*В. А. ПОГОДИН, Л. Н. РАБИНСКИЙ, С. А. СИТНИКОВ
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

*В. В. НИГМАТЗЯНОВ
НИИ Прикладной механики и электродинамики МАИ, г. Москва, Российская Федерация*

Электрические ракетные двигатели (ЭРД) широко используются в космической технике. Стабилизация, коррекция геостационарных спутников, осуществляется за счет ЭРД [1]. Работа двигателя заключается в генерации плазмы рабочего тела (ксенона) в объеме камеры и ускорения продуктов ионизации электромагнитным полем ВЧ-генератора. Основными требованиями к материалу камеры являются: электромагнитная проницаемость в мегагерцовом диапазоне, виброустойчивость не менее 150 Дб, термостойкость до 600 °С [2].

Для снижения массы камеры и повышения рабочих характеристик ЭРД был предложен композиционный материал на основе кремнийорганической полимерной матрицы с наполнителем из порошка нитрида кремния, полученного в СВС процессе и тканого материала на основе кварцевого волокна.

Исходный полимер получали частичным согидролизом тетраметоксисилана, метилтриметоксисилана, винилтриметилксилана и γ -аминопропилтриметоксисилана [3]. Кремнийорганическая смола использовалась в виде 55 % мас. раствора в ацетонитриле, с средневязкостной молекулярной массой 2700–3500 г/моль. В качестве армирующего наполнителя использовали материал марки ТС-8/3-К производства НПО «Стеклопластик».

По данным ДСК/ТГА, теплостойкость полученного композиционного материала, наполненного Si_3N_4 60 % мас., составила 400 °С. В зависимости от доли нитрида кремния, потеря массы пропорционально снижается. В процессе пиролиза при 800 °С, образуется аморфная оксинитридная фаза, это связано с гидролизом наполнителя нитрида кремния и выделением аммиака, что было экспериментально установлено. Несмотря на потерю гибкости, свойственную эластомерам, камера из данного материала, в составе ЭРД, сохранила рабочие характеристики на испытательном стенде.

Полученный композиционный материал, характеризуется следующими свойствами:

- твердость по Шору –85–90 (шкала D);
- плотность –1,65–1,67 г/см³;
- напряжение на разрыв при растяжении – по основе ткани 1000 кгс;
- напряжение на разрыв при растяжении – по утку 550 кгс;
- объемная усадка после отверждения – 3–4 %;
- температурный коэффициент линейного расширения – $1,0 \dots 1,1 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$;
- электрическая прочность 15–20 кВ/мм;
- тангенс угла диэлектрических потерь – 0,2–0,02.

В рамках проведенной работы установили, что полученный материал характеризуется термостойкостью до 400 °С. В композиции с нитридом кремния термостойкость связующего остается на прежнем уровне, за счет минерального наполнения потери массы пропорционально уменьшаются. Нитрид кремния не влияет на процесс термодеструкции, синергического эффекта между нитридом кремния и связующим, не наблюдается.

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. – С. 37.
- 2 **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. – Vol. 15, no. 1. – P. 390–395.
- 3 **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.

УДК 620.192.4

ДЕФОРМИРОВАНИЕ БАЛКИ ПРИ ВНЕЗАПНОМ ИЗМЕНЕНИИ СТРУКТУРЫ УПРУГОГО ОСНОВАНИЯ

А. А. ПОДДУБНЫЙ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В. А. ГОРДОН

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

Построена математическая модель динамического процесса в нагруженной постоянной равномерно распределенной нагрузкой конструктивно-нелинейной системе «балка – двухпараметрическое основание», возникающего в результате внезапного изменения физико-механических свойств основания, приводящего к обнулению его сдвиговой жесткости. Решение статической задачи изгиба шарнирно закрепленной по концам балки опертой на основание Пастернака служит начальным условием задачи о вынужденных колебаниях балки на основании Винклера, возникших после внезапного образования дефекта. Решения статической и динамической задач строятся методом начальных параметров с привлечением векторов состояний сечений балки и матриц влияния начальных параметров на состояние произвольных сечений. При анализе вынужденных колебаний применяется разложение