

усу r_0 . Относительные толщины слоев принимались $h_1 = 0,02$, $h_2 = 0,04$, $h_3 = 2c$, $c = 0,2$. Распределение температуры по толщине слоев предполагается равномерным.

Рисунок 1 отображает изменение радиальных перемещений u_r вдоль радиуса пластины при постоянной нагрузке. Кривые соответствуют температурам: 1 – $T = 293$ К; 2 – $T = 303$ К; 3 – $T = 323$ К. Перемещения достигают максимума на контуре пластины, в центре – равны нулю. При нагреве на 10 К радиальные перемещения увеличиваются в 1,23 раза, при нагреве на 30 К – в 1,69 раза. Влияние температуры на деформирование пластины незначительно.

Выводы. Предложенная модель позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние упругих трехслойных пластин при осесимметричном деформировании в своей плоскости.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект № Т19РМ-089).

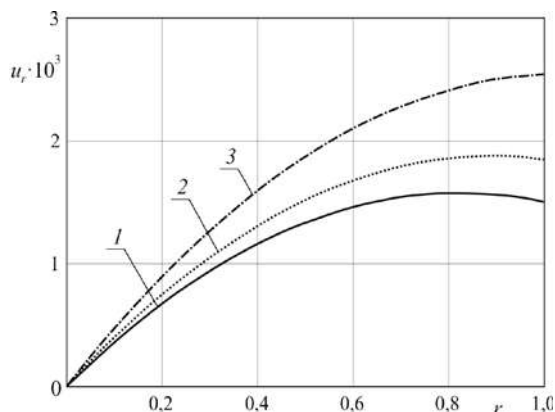


Рисунок 1 – Изменение радиальных перемещений u_r вдоль радиуса пластины

Список литературы

- 1 Старовойтов, Э. И. Деформирование упругого трехслойного стержня локальными нагрузками / Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая, Д. В. Леоненко // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2001. – № 4. – С. 37–40.
- 2 Нестерович, А. В. Напряженное состояние круговой трехслойной пластины при осесимметричном нагружении в своей плоскости / А. В. Нестерович // Механика. Исследования и инновации. – 2019. – Вып. 12. – С. 152–157.
- 3 Нестерович, А. В. Деформирование трехслойной круговой пластины при косинусоидальном нагружении в своей плоскости / А. В. Нестерович // Проблемы физики, математики и техники. – 2020. – № 1 (42). – С. 85–90.
- 4 Starovoitov, É. I. Thermoelastic bending of a sandwich ring plate on an elastic foundation / É. I. Starovoitov, D. V. Leonenko // International Applied Mechanics. – 2008. – Vol. 44, no. 9. – P. 1032–1040.
- 5 Козел, А. Г. Деформирование круговой трёхслойной пластины на основании Пастернака / А. Г. Козел // Теоретическая и прикладная механика. – 2017. – Вып. 32. – С. 235–240.
- 6 Козел, А. Г. Уравнения равновесия упругопластической круговой пластины на основании Пастернака / А. Г. Козел // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – Вып. 11. – С. 127–133.
- 7 Леоненко, Д. В. Напряженно-деформированное состояние физически нелинейной трехслойной прямоугольной пластины со сжимаемым наполнителем / Д. В. Леоненко, А. С. Зеленая // Механика машин, механизмов и материалов. – 2018. – № 2(43). – С. 77–82.
- 8 Зеленая, А. С. Деформирование упругой трехслойной прямоугольной пластины со сжимаемым наполнителем / А. С. Зеленая // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. Естественные науки. – 2017. – № 6(105). – С. 89–95.
- 9 Захарчук, Ю. В. Влияние сжимаемости наполнителя на перемещения в трехслойной круговой симметричной пластине / Ю. В. Захарчук // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2018. – № 2. – С. 14–27.
- 10 Захарчук, Ю. В. Деформирование круговой трехслойной пластины со сжимаемым наполнителем / Ю. В. Захарчук // Проблемы физики, математики и техники. – 2017. – № 4 (33). – С. 53–57.

УДК 539.3

МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ ИЗ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

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

Электрические ракетные двигатели (ЭРД) используются в космической технике для стабилизации и коррекции орбит геостационарных спутников, а также в качестве маршевых двигателей космических летательных аппаратов в нескольких межпланетных миссиях. В одной из схем ЭРД – высокочастотном ионном двигателе (ВЧИД) – образование плазмы рабочего газа происходит под воздействием высокочастотного электромагнитного поля внутри тонкостенной чаши керамической газоразрядной камеры (ГРК). Для увеличения мощности ВЧИД необходимо увеличивать диаметр ГРК до значения 500 мм и выше при сохранении толщины стенки на прежнем уровне (не толще 4–5 мм). Применяемые керамиче-

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].