

УДК 678.6,629.7.036.7

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПОЛИМЕР-КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СОЗДАНИИ ГРК ВЧИД****© 2019 г. В. В. Балашов¹, В. В. Нигматзянов¹, В. А. Погодин²,
Л. Н. Рабинский², С. А. Ситников^{2, *}**¹*Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики,
НИИ ПМЭ МАИ, Москва, Россия*²*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия***e-mail: s.sitnikov@mail.ru*

Поступила в редакцию 08.04.2019 г.

После доработки 19.04.2019 г.

Принята к публикации 24.04.2019 г.

Работа посвящена исследованию диэлектрического полимер-керамического материала на основе кремнийорганического эластомера для изготовления газоразрядных камер (ГРК) высокочастотных ионных двигателей (ВЧ ИД). В работе было установлено, что материал на основе метилфенилсиланового каучука, наполненного порошком нитрида кремния, соответствует требованиям высокой стойкости к вибрации и электрофизическим свойствам материала стенок газоразрядных камер ВЧ ИД, в части пропускания электромагнитных волн средней и высокой частоты без затухания. Экспериментально установлено, что данный материал длительное время выдерживает воздействие температуры до 370°C без потери механических и электрофизических свойств.

Ключевые слова: керамика, кремнийорганические эластомеры, полимер-керамические материалы, электроракетные двигатели, газоразрядная камера

DOI: 10.1134/S0002331019030051**ВВЕДЕНИЕ**

Электрические ракетные двигатели (ЭРД) нашли широкое применение в качестве двигателей стабилизации положения и коррекции орбиты космических аппаратов (КА). Данные двигатели позволяют значительно сократить запасы рабочего тела на борту КА, и, следовательно, сократить затраты на вывод полезной нагрузки.

Принцип работы электрических двигателей состоит в образовании плазмы рабочего газа с последующим ускорением её компонентов с помощью электрического поля. Плазма образуется в объеме, ограниченном стенками — газоразрядной камеры. К данному узлу ЭРД предъявляют требования к воздействию механических нагрузок, стойкости к ионному распылению, а также определенные электрофизические требования [1–9, 21].

Данная работа посвящена исследованию перспективного полимер-керамического материала на основе кремнийорганических соединений для газоразрядной камеры ВЧИД (показан на рис. 1а). Процесс образования плазмы в данном двигателе происходит под воздействием высокочастотного электромагнитного поля внутри ГРК. Требования, предъявляемые для маршевых двигателей данного типа, приводят к увеличе-

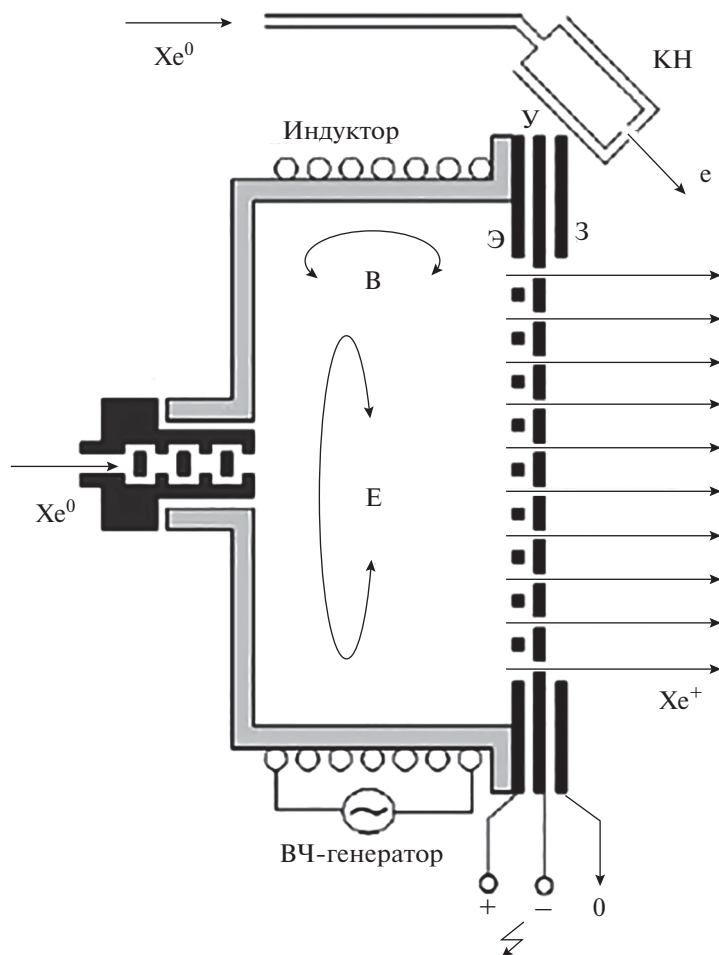


Рис. 1. Принципиальная схема ВЧИД.

нию мощности, и как следствие, к увеличению диаметра ГРК до значения 500 мм и более. При этом толщина стенки должна быть не более 4–5 мм, иначе масса ГРК значительно возрастет. Эксплуатируемые на сегодняшний день образцы ГРК обычно изготавливаются из керамики (Al_2O_3 , Si_3N_4) и имеют диаметр не более 160 мм (см. рис. 2).

Увеличение диаметра ГРК на величину более 300 мм, наряду с требованиями к повышенной вибростойкости приводит к существенным технологическим сложностям при производстве ГРК из керамических материалов [4–7, 9–11, 22].

Поэтому, в целях значительного упрощения и удешевления технологии изготовления ГРК для ВЧИД необходимо рассмотреть альтернативные способы создания данных изделий [12–19], а именно изучение возможности использования материала в системе: кремнийорганический эластомер – керамика.

В рамках экспериментальной работы были рассмотрены два типа ГРК:

- ГРК ламельно-клееной конструкции (рис. 3 слева);
- ГРК, отформованная целиком из полимер-керамического материала (рис. 3 справа).

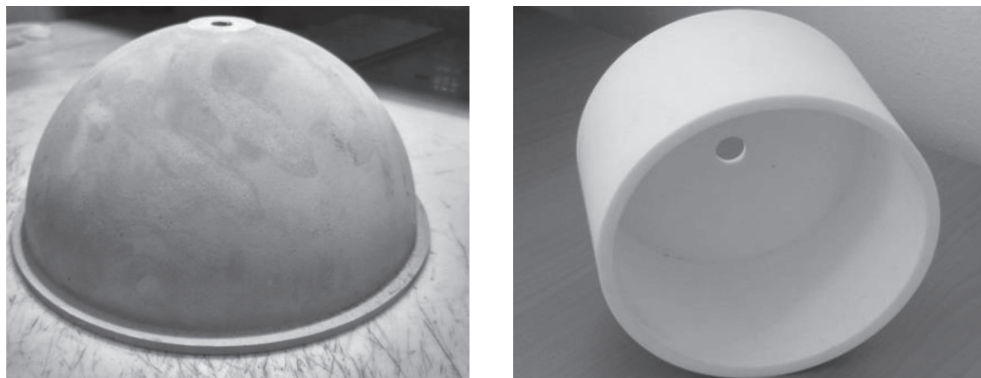


Рис. 2. Образцы ГРК из нитрида кремния (Si_3N_4 , слева) и корунда (Al_2O_3) ВК-100-2 (справа).

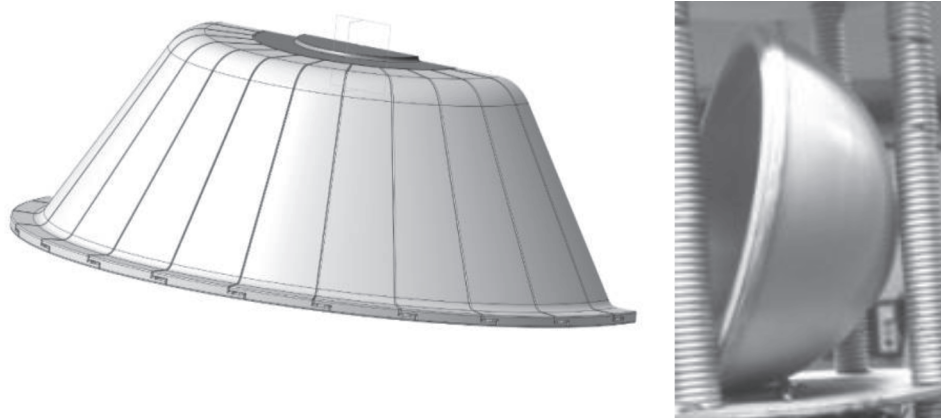


Рис. 3. ГРК из материалов с разным типом использования системы кремнеорганический эластомер — керамика.

Ламельные конструкции ГРК являются наиболее близким аналогом уже существующих керамических ГРК, сохраняя все положительные свойства последних. В это же время вибростойкость и технологичность таких конструкций оказалась неудовлетворительной. Основные усилия в поиске материала для ГРК, заменяющего керамику, были направлены на разработку ГРК, отформованных из полимер-керамических материалов, на основе кремнийорганического каучука, в том числе, модифицированного нитридом кремния. Было исследовано два типа образцов — из каучука силиконового поликонденсационного отверждения (КСПК) и каучука силиконового полимеризационного отверждения (КСПМ). Отверждение материала проводилось полимеризацией по двойным связям винильных групп у атома кремния и поликонденсацией, реакцией гидросилилирования (рис. 4).

ЭТАПЫ РАБОТЫ

На первом этапе работ по получению ГРК, отформованных из полимер-керамических материалов, была произведена отработка физико-химических основ получения



Рис. 4. Формовка испытательных образцов из кремнийорганического каучука в металлическую форму.

сложносоставных материалов с полимерной матрицей и керамическим порошком в качестве наполнителя для повышения вибрационной стойкости тонкостенных изделий больших размеров. Оработан способ формования в металлическую форму крупногабаритных изделий из кремнийорганических каучуков, получаемых реакцией поликонденсации и полимеризации. Были изготовлены лабораторные участки для этих альтернативных методов формовки заготовок, в том числе адаптированные для дальнейшего использования в аддитивном производстве.

На втором этапе работ был проведен комплекс исследований свойств разрабатываемых полимер-керамических материалов, позволивший сформулировать рекомендации по применению и адаптации полученных материалов в космической технике.

Для оценки механических свойств материалов проводились следующие испытания:

- Изотермическая термообработка образцов с экспозицией 5 ч в вакуумной электропечи СШВЭ 1.2,5/25 при остаточном давлении $P = 6 \times 10^{-3}$ Па;
- Измерение прочности на разрыв σ_b на универсальной испытательной машины Instron серии 5960 для образцов толщиной 2 ± 0.2 мм. Испытания проводились при температуре 28°C и скорости нагружения 500 мм/мин;
- Измерение усадки после отверждения;
- Измерение твердости образцов до и после термообработки в вакууме на приборе ТШР;
- А также виброиспытания полученных прототипов ГРК ВЧИД диаметром 100 мм.

Подтверждение электрофизических свойств проводилось при испытании ГРК, изготовленной из нового материала, в составе лабораторной модели двигателя с диаметром ионно-оптической системы 100 мм. Для этого использовалась готовая лаборатор-

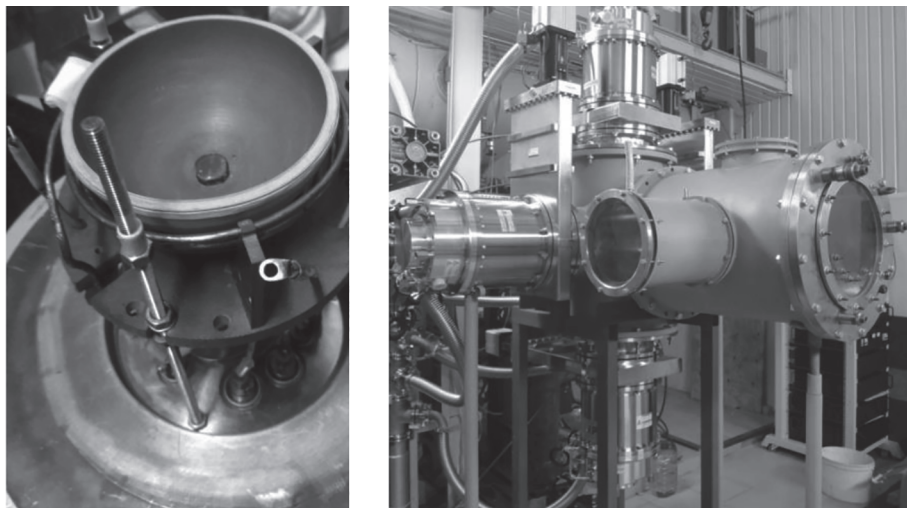


Рис. 5. ГРК из КСПК, установленная на макете ВЧИД (слева) и общий вид вакуумного стенда для испытания ВЧИД (справа).

ная модель ВЧ ИД. Для данной лабораторной модели ранее были получены зависимости тока ионного пучка от расхода и вложенной высокочастотной мощности (ВЧ-мощности) при использовании ГРК из керамики. Испытательный вакуумный стенд для проведения испытаний полимер-керамических ГРК в составе лабораторной модели ВЧ ИД обеспечивал динамический вакуум на уровне 10^{-3} Па при расходах ксенона до 0.65 мг/с. Задача данных испытаний состояла в сравнении ранее полученных интегральных характеристик двигателя на керамической ГРК с новыми, когда ГРК была заменена на полимер-керамическую.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 6 представлен график потери массы образцов в зависимости от температуры термообработки в вакууме. Потеря массы испытуемых образцов до 400° составляет порядка 20 мас. % (КСПМ, КСПК) и около 10 мас. % для полимер-керамического композита (КСПМ + 50% Si_3N_4 , КСПК + 60% Si_3N_4). Несмотря на различие в способе отверждения полимеров, значения потери массы близки и характерны для данного класса соединений. Материал на основе КСПК, ввиду содержания в композиции катализатора Спайера характеризуется несколько большим значением потери массы, что обусловлено процессом удаления низкокипящих компонентов отвердителя.

Рост потери массы после термообработки свыше 300°С обусловлен инициацией процесса термодеструкции основной полимерной цепи полимера. Таким образом, процессы которые протекают до 300°С, главным образом связаны с протеканием реакции по не вступившим функциональным группам, реакцией теломеризации, внутримолекулярной перегруппировки и удаления низкокипящих веществ. В результате этих процессов наблюдается увеличение прочности на разрыв (см. рис. 7) вследствие образования дополнительных связей между макромолекулами.

Согласно графику зависимости прочности на разрыв от температуры обработки образцов, представленному на рис. 7, образец КСПК и образец КСПК + 60% Si_3N_4 характеризуются большим значением прочности на разрыв после обработки при 370°С.

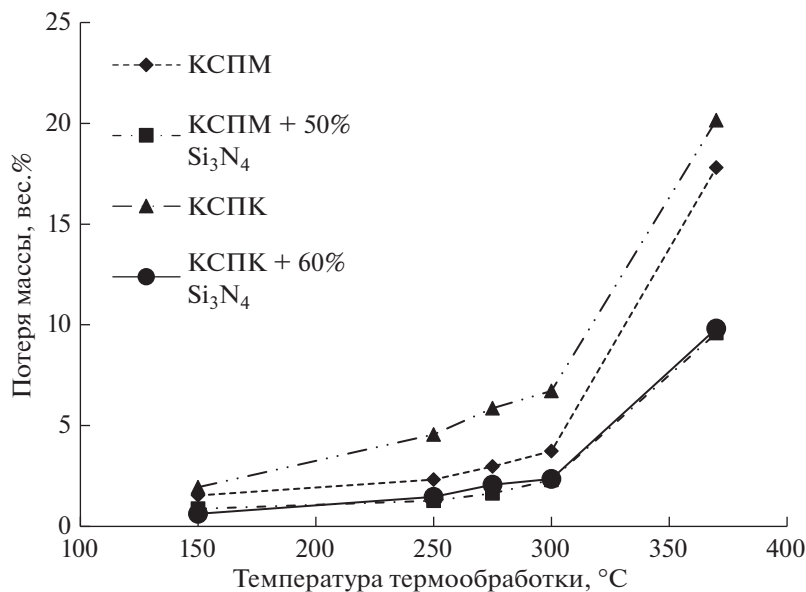


Рис. 6. Зависимость потери массы от температуры термообработки в вакууме ($P = 6 \times 10^{-3}$ Па, экспозиция 5 ч) образцов из кремнийорганического каучуков поликонденсационного отверждения (КСПК) и полимеризационного отверждения (КСПМ).

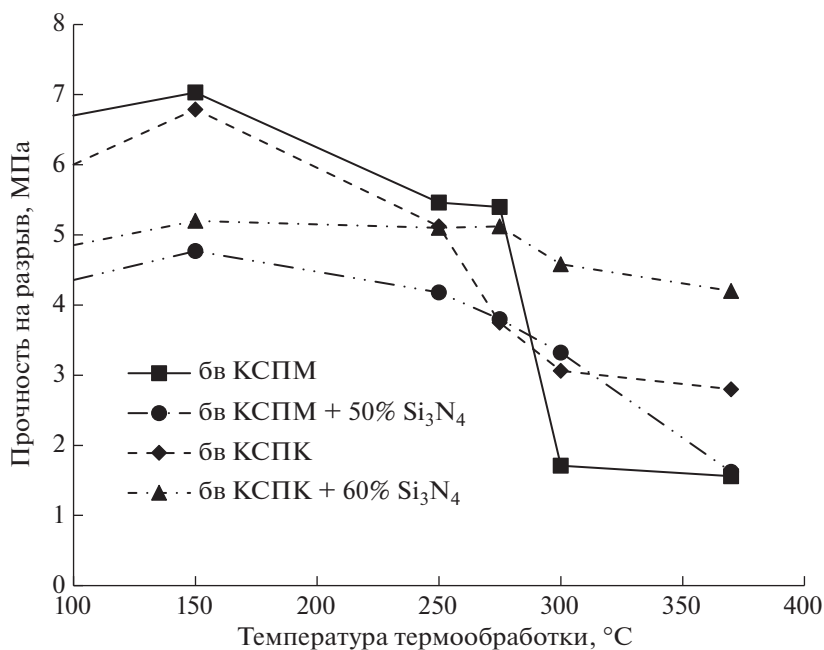


Рис. 7. Зависимость прочности на разрыв от температуры обработки в вакууме ($P = 6 \times 10^{-3}$ Па, экспозиция 5 ч) для образцов из кремнийорганического каучуков поликонденсационного отверждения (КСПК) и полимеризационного отверждения (КСПМ).

Несмотря на схожий химический состав КСПМ, КСПК, полимер отверждаемый по радикальному механизму (КСПМ и КСПМ + 50% Si_3N_4), характеризуется большим значением усадки (4–5%) и меньшим значением прочности на разрыв.

Вероятной причиной наблюдаемого явления, может являться тот факт, что полимер, отверждаемый поликонденсацией (КСПК, КСПК + 60% Si_3N_4) в боковом обрамлении полимерной цепи, содержит гидридный водород у атома кремния. В процессе отверждения, реакцией гидросилирования по поликонденсационному механизму, доля конверсии функциональных групп не превышает 0.7, что характерно для реакции поликонденсации. Таким образом, не вступившие в реакцию атомы водорода могут реагировать с концевыми гидроксильными группами силаксановой цепи. В результате этой реакции вырастает молекулярная масса КСПК, соответственно, возрастает прочность на разрыв.

Резкое увеличение потери массы КСПМ после термообработки при температуре 300°C, который отверждается полимеризацией по винильным группам, можно объяснить β -распадом этильной группы у атома кремния, характерной для термодеструкции этилсилаксанов при температуре термообработки свыше 250°C, в результате происходит выделение этилена. Это в свою очередь, приводит к уменьшению числа межмолекулярных связей, снижению молекулярной массы полимера и снижению прочности.

Таким образом, наиболее подходящим (с точки зрения стабильности свойств) является материал КСПК наполненный нитридом кремния (60 мас. %). Данный материал характеризуется следующими свойствами:

- Твердость по Шору – 40–50 кгс/см².
- Плотность – 8000–1400 кг/м³.
- Эластичность – линейное удлинение 20–40% остаточной деформации.
- Относительное удлинение при разрыве – 50–70%.
- Напряжение на разрыв при растяжении – 1.2–7.05 МПа.
- Температурный коэффициент линейного расширения – $1.0\text{--}1.5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.
- Электрическая прочность 15–20 кВ/мм.
- Тангенс угла диэлектрических потерь: 0.2–0.02.
- Максимальная рабочая температура – 370°C (400°C – кратковременно).

На основе этого материала была изготовлена ГРК, которая прошла испытания в составе лабораторной модели ВЧ ИД. Полученные зависимости тока ионного пучка от расхода рабочего тела и вложенной ВЧ-мощности не уступили ранее полученным значениям для двигателя с газоразрядной камерой на основе алюмооксидной керамики.

Из полученных результатов следует, что механические и электрофизические параметры ГРК из полимер-керамического материала изготовленного из КСПК наполненного нитридом кремния, соответствуют требованиям, предъявляемым к газоразрядным камерам ВЧ ИД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенной работы были изучены перспективные материалы для создания полимер-керамического материала, обеспечивающего требуемые электро-физические и эксплуатационные характеристики газоразрядных камер ВЧ ИД (радиопрозрачность, технологичность, вибростойкость). Исследованы два способа получения изделий из сложносоставных керамических материалов, основанные на применении полимер-керамических материалов на основе кремнийорганического каучука, модифицированного нитридом кремния.

Созданы экспериментальные элементы технологического оборудования для получения ГРК из разработанных полимер-керамических материалов. Показано, что материал на основе наполненного КСПМ значительно уступает своему аналогу (КСПК),

так значение удельной линейной усадки достигает порядка 4–5% ($I_{\text{КСПК}} = 1.3\text{--}2.5\%$), а значение предела прочности на разрыв составило 1.5–2.0 МПа ($\sigma_{\text{вКСПК}} = 2.5\text{--}5.0$ МПа). Экспериментально подтверждено, что температура эксплуатации ГРК из наполненного нитридом кремния каучука (КСПК) составляет, без потери механических и электрофизических свойств, 370°C.

Газоразрядная камера, изготовленная из КСПК, прошла кратковременные испытания в составе лабораторной модели ВЧ ИД и подтвердила потенциальную возможность создания и эксплуатации ГРК различных размеров из данного материала.

Для дальнейшей отработки и получения стабильных характеристик ВЧ ИД при длительном режиме работы (свыше 10000 ч) необходимо провести комплекс научных, исследовательских и конструкторских работ для подтверждения требуемых характеристик, отработки способа создания ГРК различных размеров и форм, а также провести физико-химическое исследование данных материалов с целью определения оптимального состава получаемых полимер-керамических материалов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антропов Н.Н., Дьяконов Г.А., Покрышкин А.И., Попов Г.А., Казеев М.Н., Ходненко В.П. Импульсные плазменные двигатели в системах управления космических аппаратов // Прикладная физика. 2002. № 1.
2. Горшков А.С., Муравьев В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. М.: Машиностроение, 2008.
3. Loeb H.W. A realistic concept of a manned Mars mission with nuclear-electric propulsion // Acta Astronautica. November–December 2015. V. 116. P. 299–306.
4. Тазетдинов Р.Г., Прокофьев М.В., Ситников С.А. Поиск новых керамических материалов с высокой устойчивостью к ионно-плазменной эрозии. // Тезисы докладов межотраслевой научно-практической конференции “Проблемы создания новых материалов для авиационно-космической отрасли в XXI веке” (Москва, 25–26 июня 2002), М.: 2002. С. 117(124 с.).
5. Михеев С.Ю., Шорохов В.В., Шкарбан И.И. Исследование массового состава частиц распыления с поверхности диэлектриков ионами ксенона // Генераторы плазмы и источники заряженных частиц. М.: МАИ, 1983.
6. Семенов А.А. Распыление керамик и керамических композитов потоками ионов низких энергий // Дис. канд. техн. наук по спец. 05.07.05. М., 2015.
7. Ситников С.А. Разработка стойких к ионной эрозии материалов на основе нитрида кремния для разрядных камер электроракетных двигателей // Дис. канд. техн. наук по спец. 05.07.05. М., 2017.
8. Антипов Е.А, Балашов В.В., Нигматзянов В.В. и др. Выбор конструкционных материалов для высокочастотных ионных двигателей // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35964>
9. Рабинский Л.Н., Ситников С.А., Хартов С.А. Создание действующих прототипов керамических газоразрядных камер высокочастотных ионных двигателей, стойких к ионно-плазменному распылению методом послойного моделирования // Тезисы докладов V международного научного семинара “Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы”. (Москва, 17–19 октября 2016 г.). М.: ООО “ТР-принт”, 2016. С. 159–160.
10. Янагида Х. Тонкая техническая керамика. М.: Металлургия, 1986.
11. Гнесин Г.Г. Бескислородные керамические материалы. Киев: Техника, 1987.
12. Погодин В.А., Ситников С.А., Соляев Ю.О. Исследование пористой керамики на основе нитрида кремния, полученной с использованием технологии трехмерной печати // Новые огнеупоры. 2016. № 11. С. 33–37.
13. Poliakov P.O., Soliayev Y.O., Sitnikov S.A. Numerical modeling of residual thermal stresses in Si3N4 based high-porous fibrous ceramics // International J. Pure and Applied Mathematics. 2016. V. 111(2).
14. Ripetsky A., Sitnikov S., Rabinskiy L. Fabrication of porous silicon nitride ceramics using binder jetting technology // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016.
15. Рабинский Л.Н., Ситников С.А., Соляев Ю.О. Сравнительная оценка и выбор варианта решения задачи по разработке технологии изготовления образцов и элементов конструкций из композиционной нитридокремневой керамики // Материалы XXII Международного симпозиума “Ди-

- намические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” им. А.Г.Горшкова. (Вятчи, 15–19 февраля 2016). Т. 2. М.: ООО “ТР-принт”, 2016. С. 108–109.
16. Хейч Д. Р. Огнеупоры для космоса. Справочник. М.: Металлургия, 1967.
 17. Погодин В.А., Ситников С.А., Соляев Ю.О. Исследование пористой керамики на основе нитрида кремния, полученной с использованием технологии трехмерной печати // Новые огнеупоры. 2016. № 11. С. 33–37.
 18. Лурье С.А., Белов П.А., Рабинский Л.Н., Жаворонок С.И. Масштабные эффекты в механике сплошных сред. материалы с микроструктурой и наноструктурой. М.: МАИ-Принт, 2011.
 19. Горшков А.Г., Егорова О.В., Медведев А.Л., Рабинский Л.Н. Плоская задача дифракции акустической волны давления на криволинейном препятствии // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2003. № 3. С. 148–155.
 20. Formalev V.F., Kuznetsova E.L., Rabinskiy L.N. Localization of thermal disturbances in nonlinear anisotropic media with absorption // High Temperature. 2015. V. 53. № 4. P. 548–553.
 21. Sitnikov S.A. Development of technologies for obtaining composite material based on silicone binder for its further use in space electric rocket engines // Periodico Tche Quimica. V. 15(Special Issue 1). 2018. P. 390–395.
 22. Погодин В.А., Рабинский Л.Н., Ситников С.А. Технологические аспекты 3D-печати деталей газоразрядной камеры электроракетного двигателя // СТИН – Станки Инструмент. 2019. № 4. С. 20.

Study of The Possibility of Rit Discharge Chamber Manufacturing of Polymer-Ceramic Materials

V. V. Balashov^a, V. V. Nigmatzyanov^a, V. A. Pogodin^b, L. N. Rabinskiy^b, and S. A. Sitnikov^{b, *}

^a*Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow, Russia*

^b*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

^{*}*e-mail: s.sitnikov@mail.ru*

The work is devoted to the study of dielectric polymer-ceramic material based on organosilicon elastomer as applied to the manufacture of gas-discharge chambers of radio-frequency ion thrusters (RIT). It was found out that the material based on methylphenylsiloxane rubber filled with silicon nitride powder meets the requirements on high vibration resistance and on the electrophysical properties of the material for the RIT gas-discharge chambers walls, specifically on the transmission of electromagnetic waves of medium and high frequency without attenuation. It was experimentally established that such material is capable of withstanding temperatures of up to 370°C for a long time without loss of mechanical and electrical properties.

Keywords: ceramics, organosilicone elastomers, polymer-ceramic materials, electric propulsion, gas-discharge chamber