

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ И ЖЕСТКОСТИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ ЗАЩИТНОГО ЭЛЕМЕНТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А. В. Купряшов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева,
Россия, 660037, г. Красноярск, проспект им. газеты «Красноярский рабочий», 31

В статье с помощью конечно-элементного исследования численно решена задача динамического поведения многофункционального покрытия защитного элемента летательного аппарата, также определено значение жесткости конструкции. В результате модального анализа определены собственные и вторичные формы колебаний многофункционального покрытия защитного элемента летательного аппарата, получено распределение эффективных модальных масс. Представленные в работе результаты позволяют обоснованно анализировать поведение как всей защитной системы, так и отдельных элементов конструкции летательного аппарата, состоящих из нанесенного на внешней поверхности многофункционального покрытия в эксплуатационных условиях, и повысить эффективность разработки новых конструкций и структур композиционно-го покрытия полифункционального назначения, защитных элементов и материалов космической и авиаракетной техники.

Ключевые слова: метод конечных элементов, жесткость, численное моделирование, частота колебаний, модальный анализ, многофункциональное покрытие.

Введение

Современные космические летательные аппараты исследуют аэротории Вселенной далеко за пределами околоземного пространства, где условия эксплуатации значительно более жесткие, а требования по весу и прочности конструкции существенно выше. Кроме силовых воздействий, корпус космического аппарата в процессе эксплуатации подвергается широкому комплексу физических влияний разнопланового вида: ионизирующие излучения, высокие температурные возмущения, электромагнитные поля, климатические факторы. Поэтому создание внешнего материала для защиты ракетно-космических объектов (многофункциональное защитное покрытие), обладающего огромным спектром условий по прочности, жесткости и отвечающему требованиям комплекса физических аспектов, является актуальной задачей.

В аэрокосмической технике основное назначение многофункционального (функционально-градиентного) покрытия состоит в защите от ионизирующего, электромагнитного и радиоизлучения, отражение лазерного луча, а также увеличение устойчивости, прочности и жесткости как отдельных внешних частей, так и всего изделия в целом [1]. На рис. 1 представлена конструкция защиты системы управления двигательного блока летательного аппарата. На корпусе двигательного блока установлена специальная защитная система из панелей и пластин с нанесенным на внешней стороне специальным защитным покрытием полифункционального назначения рис. 2, которое предназначено для защиты от внешнего воздействия (электромагнитного и лазерного излучения) на кабельную систему и элементы управления двигателя, а также необходимо с целью увеличения прочности и жесткости конструкции системы защиты.

Постановка задачи

Одним из назначений многофункционального покрытия является увеличение жесткости конструкций систем защиты космического аппарата. Для того чтобы понять, насколько покрытие улучшает механические характеристики всей защитной конструкции летательного аппарата, необходимо проанализировать показатели динамики и жесткости элементов многофункционального покрытия.

Конечно-элементное моделирование является основным точным инструментом решения задач динамической устойчивости конструкций в аэрокосмической отрасли, целью которого представляется определение запасов прочности конструкции при динамических воздействиях [2–4].

В качестве объекта исследования было смоделировано многофункциональное покрытие самого большого по размеру и цельного элемента системы защиты системы управления двигательного блока — флора продольного, на рис. 3 представлены геометрическая и конечно-элементная модели исследуемого объекта. Флор продольный имеет конструкторское исполнение в виде одной пятой части цилиндрической оболочки радиусом 1,6 м. Габаритные размеры исследуемого объекта: ширина 1 м, высота 2 м, толщина 0,005 м. В центре находится вырез размерами — 0,89 м (ширина); 1,36 м (высота). Радиус скругления внутренних поверхностей флора — 0,005 м. Таким образом, площадь объекта исследования равна 0,89 м², а объем — 0,00445 м³.

Теория

Современное многофункциональное покрытие, используемое для защиты корпуса и наружных узлов летательного аппарата в ракетно-космической технике от внешнего агрессивного воздействия,

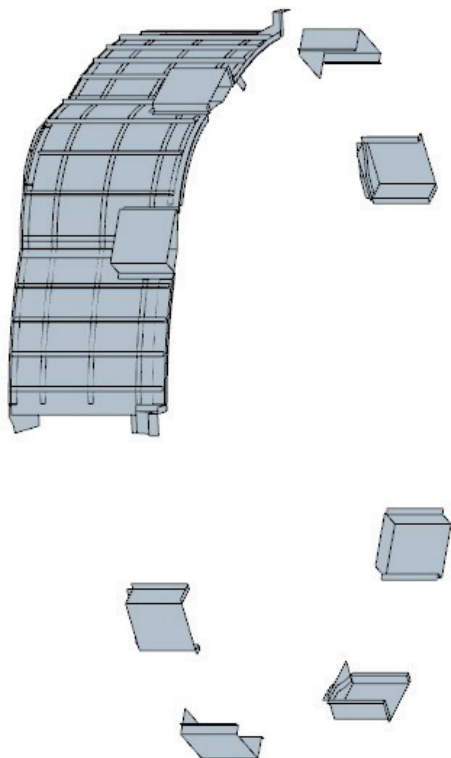


Рис. 1. Конструкция защиты системы управления двигательного блока летательного аппарата

Fig. 1. Protection design of the aircraft engine block control system

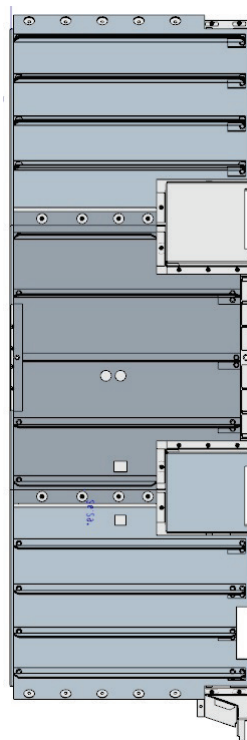


Рис. 2. Конструкция системы защиты из панелей и пластин с нанесённым на внешней стороне специальным многофункциональным покрытием

Fig. 2. The design of the protection system consisting of panels and plates with a special multifunctional coating applied on the outside

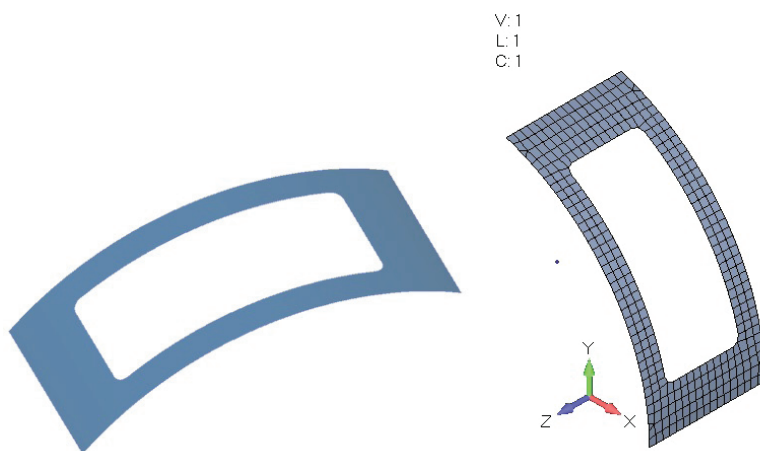


Рис. 3. Геометрическая и конечно-элементная модели многофункционального покрытия флора

Fig. 3. Geometric and finite element models of the multifunctional coating flora

имеет сложный состав и структуру. Аэрокосмические мультимнофункциональные покрытия представляют собой сложные полимерные композиции. Они состоят из следующих основных компонентов: низко- или высокомолекулярная полимерная основа, наполнитель (основной компонент), отвердитель (катализатор) и вспомогательные вещества, предназначенные для осуществления процесса нанесения [5, 6].

Основным способом получения многофункциональных (функционально-градиентных) покрытий в ракетно-космической технике сегодня является газотермический способ. Сущность процессов газотермического нанесения покрытий заключается

в образовании направленного потока дисперсных частиц напыляемого материала, обеспечивающего перенос их на поверхность обрабатываемого изделия и формирование слоя покрытия. Покрытие создается за счет адгезии, возникающей при соударении частиц на поверхности основания. Газотермические методы нанесения многофункциональных покрытий широко используются для получения слоёв покрытия различной сложности. Их главное преимущество в производительности, универсальности, доступности, относительной простоте, а главное в способности к образованию покрытий любой сложности, различной формы и конфигурации. Также стоит отметить высокую производи-

тельность процесса напыления защитных слоёв покрытия при хорошем качестве.

Из описания состава, структуры и способа получения слоистой системы многофункционального аэрокосмического покрытия видно, что задача определения основных динамических характеристик наносимого покрытия является сложной.

Современный программный комплекс *Femap with NX Nastran*, основанный на методе конечных элементов, позволяет максимально полно произвести динамический анализ многофункционального покрытия. Благодаря своим широким возможностям по созданию геометрической, конечно-элементной модели многофункционального покрытия элемента защитной системы летательного аппарата и способности достоверного исследования динамической устойчивости, а также оптимизации конструкции объекта анализа.

Согласно принципу метода конечно-элементного моделирования, для динамического анализа применяется динамическая модель многофункционального покрытия флора продольного, основой которой являются матрицы жёсткости, матрицы масс и демпфирования. Динамическая модель является математическим отображением композиционной конструкции и её важнейших параметров: геометрических характеристик, массовых характеристик, упругих свойств конструкционных материалов, диссипативных свойств материалов и конструкции [7–11].

Динамический анализ исследуемого объекта основывается на решении общего уравнения движения:

$$[M]\{\ddot{u}^n\} + [C]\{\dot{u}^n\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}, \quad (1)$$

где параметры модели: $[M]$ — матрица масс, $[C]$ — матрица демпфирования (сопротивлений), $[K]$ — матрица жёсткости; кинематические параметры: $\{u^n\}$ — вектор узловых ускорений, $\{\dot{u}^n\}$ — вектор узловых скоростей, $\{u\}$ — вектор узловых перемещений; внешние воздействия: $\{F\}$ — вектор нагрузок, $\{t\}$ — время.

Результатом модального анализа является определение частотных характеристик многофункционального покрытия флора, а именно собственные частоты, формы колебаний и доля участия каждого отдельного тона в колебании конструкции.

Нормальная мода мультифункционального покрытия одного элемента защитной системы двигателя блока летательного аппарата (форма собственных колебаний) — это правильный стандарт движения, при котором все части мультифункционального покрытия перемещаются синусоидально с одной частотой и фазой. Набор частот собственных колебаний составляет колебательный спектр всей системы. Произвольное колебание физической системы можно представить в виде суперпозиции собственных колебаний. Вынужденные колебания физической системы имеют резонанс на частотах, совпадающих с частотами нормальных колебаний [12].

Это и определяет важность модального анализа многофункционального покрытия защитной системы двигателя блока летательного аппарата, на которое передаются вибрации от внешней среды, а также от работающих внутренних приборов, двигательной установки, радиоаппаратуры, трансмиссии, блока подачи и топливной системы летательного аппарата.

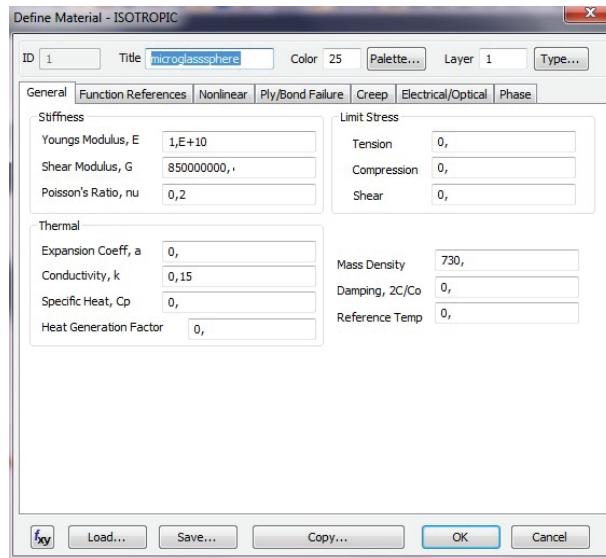


Рис. 4. Интерфейс процесса создания материала мультифункционального покрытия флора
Fig. 4. Interface for creating a multifunctional coating flora

Основное уравнение, описывающее собственные колебания при модальном анализе:

$$([K] - \omega^2[M])\{\hat{u}\} = 0, \quad (2)$$

где ω — собственная частота, $\{\hat{u}\}$ — собственные формы колебаний.

Результаты экспериментов

С помощью команд *Material (Model → Material)* и *Property (Model → Property)* создадим сложный изотропный состав материала мультифункционального покрытия с необходимыми свойствами и характеристиками.

На рис. 4 представлен интерфейс процесса создания материала исследуемого объекта. Как было сказано выше, спроектированное многофункциональное покрытие представляет собой многослойную структуру композиционного материала на основе твёрдого дисперсного наполнителя, полимерных связующих компонентов и элемента гомологического ряда ароматических углеводородов. Свойства и параметры создаваемого композиционного материала мультифункционального покрытия отобраны из [13–25]. Материал изотропный, модуль Юнга, $E = 10 \times 10^9$ Па; плотность покрытия, $\rho = 730$ г/см³; модуль сдвига, $G = 8,5 \times 10^8$ Па; коэффициент Пуассона, $\nu = 0,2$; удельная теплопроводность, $k = 0,15$ Вт/м×К. Исследуемый объект спроектирован элементом типа конечных элементов *Plate*.

В качестве граничных условий использована жёсткая заделка по всему внутреннему контуру покрытия (*Fixed*), имитируя реальное размещение мультифункционального покрытия поверхности защищаемого элемента.

Для равномерного распределения нагрузки к исследуемому объекту прикладывалась нагрузка, равная 1000 Н.

Для анализа собственных форм и частот с анализом чувствительности воспользуемся видом исследования *Normal Modes / Eigenvalues*.

Таблица 1. Собственные частоты колебания многофункционального покрытия флора
 Table 1. The values of the Natural frequencies of vibration of the protective coating of the protection element of the spacecraft — flora

Тон №	Частота, Гц	Эффективные массы, %					
		X	Y	Z	RX	RY	RZ
1	32,60	0,00	0,00	0,00	0,26	0,10	0,00
2	32,61	1,41	2,67	0,00	0,40	0,15	1,03
3	51,11	14,13	7,46	0,00	1,12	1,52	0,00
4	51,46	2,22	4,21	0,00	0,63	0,24	0,10
5	56,61	0,00	0,00	0,60	0,48	0,66	0,00
6	56,80	0,12	0,06	0,00	0,01	0,01	0,00
7	98,22	0,00	0,00	9,79	7,22	9,78	0,00
8	99,35	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
9	104,73	0,00	0,00	0,00	0,08	0,03	0,00
10	104,74	0,66	1,25	0,00	0,19	0,07	0,51
...							
14	113,11	4,56	2,41	0,00	0,36	0,49	0,00
...							
41	318,95	4,45	2,35	0,00	0,35	0,48	0,00
...							
44	331,19	11,41	6,02	0,00	0,91	1,23	0,00
...							
51	380,50	14,72	7,77	0,00	1,17	1,58	0,00
...							
55	417,69	0,00	0,00	4,18	1,79	2,43	0,00
...							
59	445,67	0,00	0,00	6,02	4,25	5,76	0,00
...							
116	833,93	1,28	2,43	0,00	0,37	0,14	4,78
...							
170	1208,95	0,00	0,00	0,00	7,32	2,76	0,00
171	1211,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
172	1219,95	0,00	0,00	0,00	4,29	1,62	0,00
...							
179	1268,94	16,03	30,36	0,00	4,57	1,73	57,05
180	1272,95	0,00	0,00	0,00	0,17	0,06	0,00
...							
196	1381,64	0,00	0,00	7,76	3,22	4,36	0,00
...							
206	1453,73	1,07	0,56	0,00	0,08	0,11	0,00
...							
213	1493,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Итого		86,14	82,47	39,21	51,28	48,44	73,18

Результаты динамического анализа, полученные с помощью специально разработанного макроса программы *Microsoft Office Excel* на языке *VBA*, в виде спектра собственных частот с распределением эффективных модальных масс в диапазоне от 0 до 1500 Гц представлены в табл. 1.

Эффективные модальные массы всех тонов колебаний в исследуемом частотном диапазоне дают представления о важности конкретного тона с точки зрения их вклада в реакцию конструкции. Тоны, модальная эффективная масса которых превышает 10 % от суммарной физической массы (момента

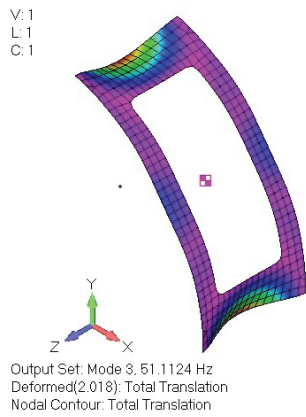


Рис. 5. Собственная форма колебаний мультифункционального покрытия флора (51,11 Гц)

Fig. 5. Eigenmodes of oscillations of the multifunctional coating flora (51,11 Hz)

инерции), считаются основными тонами, а тоны, у которых эффективная масса меньше 5 %, считаются несущественными. Из данных табл. 1 можно

сделать вывод, что главным основным тоном является третий тон с частотой 51,11 Гц с эффективной массой смещения по оси X 14,13 % (основное движение), по оси Y 7,46 % и вращения вокруг оси Z 1,52 %. Соответствующая собственная форма колебаний представлена на рис. 5.

Остальные основные собственные формы колебаний мультифункционального покрытия флора продольного представлены на рис. 6. Это сорок четвертый, пятьдесят первый и сто семьдесят девятый тона.

Тоны, модальная эффективная масса которых не превышает 10 %, но при этом выше 5 % от суммарной физической массы (момента инерции), считаются вторичными целевыми тонами. Помимо основных целевых, именно эти моды при исследовании динамики используются для регулирования и корректировки конечно-элементной модели исследуемого объекта. Формы колебаний вторичных целевых тонов представлены на рис. 7. В свою очередь, это седьмой, пятьдесят девятый, сто семидесятый и сто девяносто шестой тоны.

Массу исследуемого объекта определим с помощью команды *Mass Properties (Tools → Mass Properties → Mesh)*. На рис. 8 представлено окно вывода результата вычисления массы исследуемого объекта.

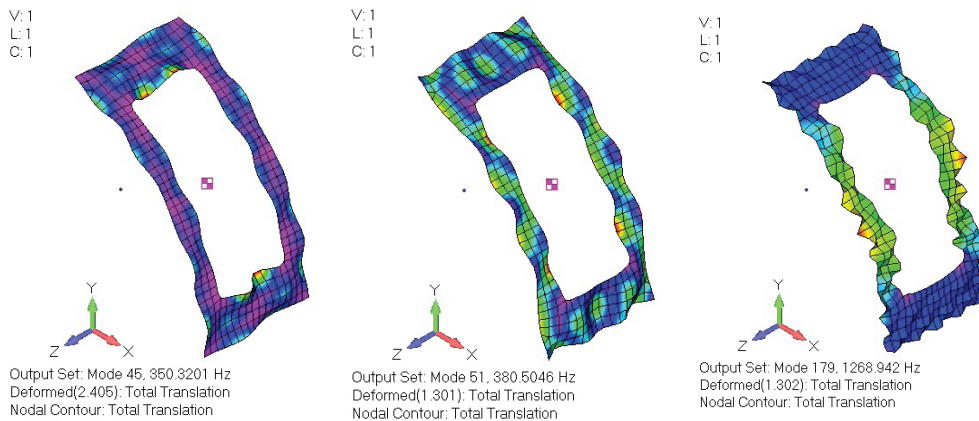


Рис. 6. Собственные формы колебаний мультифункционального покрытия флора: а) частота 331,19 Гц (тон 44); б) частота 380,5 Гц (тон 51); в) частота 1268,94 Гц (тон 179)

Fig. 6. Eigenmodes of oscillations of the multifunctional coating flora: а) frequency 331,19 Hz (tone 44); б) frequency 380,5 Hz (tone 51); в) frequency 1268,94 Hz (tone 179)

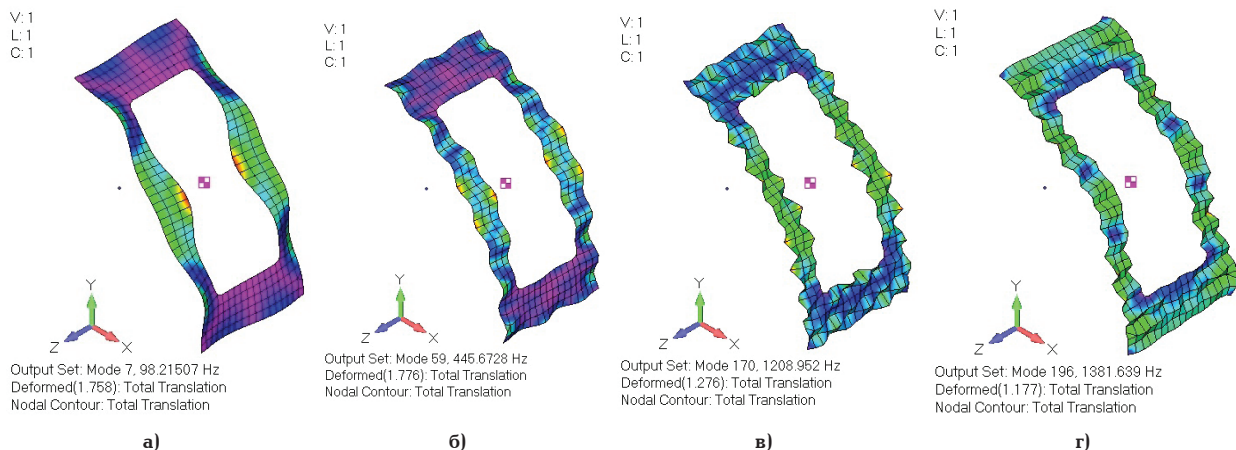


Рис. 7. Собственные формы колебаний вторичных целевых тонов мультифункционального покрытия флора: а) частота 98,22 Гц (тон 7); б) частота 445,67 Гц (тон 59); в) частота 1208,95 Гц (тон 170); г) частота 1381,64 Гц (тон 196)

Fig. 7. Eigenmodes of oscillations of the secondary target tones of the multifunctional coating flora: а) frequency 98,22 Hz (tone 7); б) frequency 445,67 Hz (tone 59); в) frequency 1208,95 Hz (tone 170); г) frequency 1381,64 Hz (tone 196)

Check Mass Properties 332 Element(s) Selected...	Mass		Center_of_Gravity_in_CSys_1			
	Structural	NonStructural	Total	X	Y	Z
	3.243129	0	3.243129	1.363383	0.	36.
						0.416667
Inertias_in_CSys_1	Ixx	Iyy	Izz	Ixy	Iyz	Izx
About_CSys	4.338186	5.620567	7.988409	1.973381	1.082902	1.490487
About_CG	1.692394	1.111907	1.960043	-0.893277	9.39769E-9	-7.2637E-9
Total_Length (Line_Elements_only) =	0.					
Total_Area (Area_Elements_only) =	0.888528					
Total_Volume (All_Elements) =	0.00444264					

Рис. 8. Окно вывода результата определения массы мультиматериального покрытия флора

Fig. 8. Window for outputting the result of determining the mass of the multifunctional coating flora

Обсуждение результатов

Жёсткость конструкции определяется из (2) по формуле:

$$K = \omega^2 \times m. \quad (3)$$

Результаты модального анализа мультиматериального покрытия элемента защиты системы управления двигательного блока летательного аппарата — флора продольного представлены в табл. 2.

Выводы и заключение

Применение современных методов численного моделирования позволяет обоснованно анализировать поведение как всей защитной системы, так и отдельных элементов конструкции летательного аппарата, состоящей из нанесенного на внешней поверхности многофункционального покрытия в условиях реальной эксплуатации.

По результатам динамического анализа можно сделать вывод, что конструкция мультиматериального покрытия защитного элемента летательного аппарата имеет высокие показатели жёсткости системы, при этом обладая допустимой массой. Это свидетельствует о целесообразности использования данного многофункционального покрытия в аэрокосмической технике.

Результаты данной работы могут быть использованы как при исследовании, так и при проектировании новых конструкций и структур композитного покрытия полифункционального назначения, защитных элементов и материалов в ракетно-космической технике.

Список источников

- Шестаков И. Я., Купряшов А. В., Утенков В. Д., Ремизов И. А. Получение мелкодисперсного порошка из графита электролизом // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, № 4. С. 574–580. DOI: 10.31772/2587-6066-2020-21-4-574-580.
- Рычков С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. Москва: ДМК Пресс, 2013. 784 с. ISBN 978-5-94074-638-6.
- Urdeix P., Doweidar M. H. A computation model for cardiomyocytes mechano-electric stimulation to enhance cardiac tissue regeneration // Mathematics. 2020. Vol. 8 (1875). 8111875. DOI: 10.3390/math8111875.
- Мокин Н. А., Кустов А. А., Ганджунцев М. И. Численное исследование собственных частот и форм колебаний воздухо-

Таблица 2. Результаты модального анализа
Table 2. Main results of modal analysis

Характеристика	Значение
Частота собственных колебаний, Гц	51,11
Масса, кг	3,243
Жёсткость, Н/м	8471,806

опорных сооружений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14, № 4. С. 337–347. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-337-347.

5. Tang D., Zhang X., Hu S. The reuse of red brick powder as a filler in styrene-butadiene rubber // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 261 (12). 120966. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120966.

6. Wang Z. S., Zhen Z. H. Study on the Silicone Coating with Heat Insulation and Resistance // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 680. P. 35–38. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.680.35.

7. Gardowski T., Gajewski T., Grabski J. K. Torsional and Transversal stiffness of orthotropic sandwich panels // Materials. 2020. Vol. 13 (21). 5016. DOI: 10.3390/ma13215016.

8. Крисилов А. В., Карамов С. В. Применение хаотической динамики в системах радиосвязи // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сб. тр. Междунар. науч. конф. Воронеж, 2020. С. 264–272.

9. Яушев А. А., Тараненко П. А., Жестков А. В. [и др.]. Расчетно-экспериментальное исследование частот и форм собственных колебаний сварного корпуса кориолисового расходомера // Вестник Южно-Уральского университета. Серия «Математика. Механика. Физика». 2018. Т. 1, № 1. С. 45–51. DOI: 10.14529/mmp180106.

10. Шевченко А. В., Ротэрмель А. Р., Шевченко В. И. [и др.]. Определение собственных частот и форм колебаний ротора окислителя турбонасосного агрегата ракетного двигателя // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. № 2. С. 461–467.

11. Wu Y., Yang L., Xu T. [et al.]. Thermo-elasto-hydrodynamic characteristics analysis of journal microbearing lubricated with rarefied gas // The micromachines. 2020. Vol. 11 (11). 955. DOI: 10.3390/mi11110955.

12. Павлов В. П., Нусратуллина Л. Р. Метод расчёта собственных частот и форм поперечных колебаний стержня переменного сечения с упругим закреплением // Вестник УГАТУ. 2019. Т. 23, № 3 (85). С. 24–38.

13. Волков Д. П., Егоров А. Г., Мироненко М. Э. Теплофизические свойства полимерных композиционных материалов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17, № 2. С. 287–293. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-287-293.

14. Колосова А. С., Сокольская М. К., Виткалова И. А. [и др.]. Наполнители для модификации современных полимерных

композиционных материалов // *Фундаментальные исследования*. 2017. № 10. С. 459–465.

15. Запонов А. Э. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов химического разложения модифицированного низкомолекулярного полимера стирол в непрерывном поле лазерного излучения // *Вестник Военной академии РВСН им. Петра Великого*. 2018. № 11 (43). С. 295–302.

16. Пат. 2631302 Российская Федерация, МПК С 09 D 183/04, С 09 D 5/00, С 09 D 5/18. Теплозащитное покрытие / Орлов В. Г., Савватеева О. А., Шумов А. Е. [и др.]. № 2015105402; заявл. 18.02.15; опубл. 20.09.17, Бюл. № 26.

17. Пат. 2658327 Российская Федерация, МПК G 21F 1/10. Способ изготовления полимерного композиционного радиационно-защитного материала / Дорофеев А. А., Бочкарева Н. Н., Ключева Т. А. [и др.]. № 2017125609; заявл. 17.07.17; опубл. 20.06.18, Бюл. № 17.

18. Пат. 2686196 Российская Федерация, МПК В 05 D 1/38, В 32 В 27/20, В 32 В 27/24, В 32 В 27/26, С 09 D 183/04. Способ получения высокотемпературного теплозащитного покрытия / Орлов В. Г., Савватеева О. А., Шумов А. Е. [и др.]. № 2017140275; заявл. 21.11.17; опубл. 24.04.19, Бюл. № 12.

19. Пат. 2690814 Российская Федерация, МПК С 09 D 5/00, С 09 D 183/04. Состав для получения теплозащитного покрытия / Коврова Н. В., Кузина Е. В., Некрасова Т. И. [и др.]. № 2017115354; заявл. 03.05.17; опубл. 05.06.19, Бюл. № 16.

20. Пат. 2702881 Российская Федерация, МПК С 23 С 26/00, С 23 С 4/04, С 23 С 4/12. Градиентное металлополимерное покрытие / Балдаев Н. Х., Маньковский С. А. № 2018134148; заявл. 28.09.18; опубл. 11.10.19, Бюл. № 29.

21. Пат. 2721323 Российская Федерация, МПК С 09 К 21/14, А 62 С 2/00, В 32 В 3/24, В 32 В 9/04, В 32 В 7/02, В 32 В 15/06, В 32 В 15/08, В 32 В 27/12. Композиционный материал для защиты от внешних воздействующих факторов и способ

его получения / Есаулов С. К., Есаулова Ц. В. № 2018143354; заявл. 07.12.18; опубл. 18.05.20, Бюл. № 14.

22. Пат. 2017115354 Российская Федерация, МПК С 08 L 9/00. Состав для получения теплозащитного покрытия / Коврова Н. В., Кузина Е. В., Некрасова Т. И. [и др.]. № 2017115354; заявл. 03.05.17; опубл. 06.11.18, Бюл. № 31.

23. Serra A., Ramis X., Fernandez-Francos X. Epoxy Sol-Gel Hybrid Thermosets // *Coatings*. 2016. Vol. 6. 6010008. DOI: 10.3390/coatings6010008.

24. Maia F., Yasakau K. A., Carneiro J. [et al.]. Corrosion protection of AA2024 by sol-gel coatings modified with MBT-loaded polyureas microcapsules // *Chemical Engineering Journal*. 2016. Vol. 283. P. 1108–1117. DOI: 10.1016/j.cej.2015.07.087.

25. Malucelli G. Hybrid organic/inorganic coatings through dual-cure processes: State of the art and perspectives // *The Coatings*. 2016. Vol. 6. 6010010. DOI: 10.3390/coatings6010010.

КУПРЯШОВ Андрей Викторович, аспирант кафедры электронной техники и телекоммуникаций.

SPIN-код: 9093-4774

AuthorID (РИНЦ): 1087238

ORCID: 0000-0003-1296-4942

Адрес для переписки: KupryashovAndrey@yandex.ru

Для цитирования

Купряшов А. В. Исследование динамики и жёсткости многофункционального покрытия защитного элемента летательного аппарата // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2021. Т. 5, № 1. С. 86–94. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-86-94.

Статья поступила в редакцию 11.11.2020 г.

© А. В. Купряшов

STUDY OF DYNAMICS AND RIGIDITY OF MULTIFUNCTIONAL COATING OF PROTECTIVE ELEMENT OF AIRCRAFT

A. V. Kupryashov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
Russia, Krasnoyarsk, Krasnoyarsky Rabochy Ave., 31, 660037

In this work using a finite element study the author has numerically solved the problem of the dynamic behavior of a multifunctional coating of an aircraft protective element. The researcher conducted the simulation using the Femap with NX Nastran software package. The result of the modal analysis is the values and patterns of natural and secondary vibration modes of the multifunctional coating of the protective element of the aircraft using a special module the author has determined the distribution of effective modal masses in tabular form. Also, as a result of calculations, the author of the article obtained the value of the structural rigidity of the protective coating. The results presented in this work allow us to analyze the behavior of protective systems and structural elements of an aircraft with a multifunctional coating applied to the outer surface in real operating conditions. The design team can use the research results of this article in order to increase the efficiency of the development of a new structures and structures of a composite coating for multifunctional purposes, protective elements and materials for space technology.

Keywords: finite element method, stiffness, numerical simulation, vibration frequency, modal analysis, protective coating.

References

1. Shestakov I. Ya., Kupryashov A. V., Utenkov V. D., Remizov I. A. Polucheniye melkdispersnogo poroshka iz grafita elektrolizom [Production of finely dispersed powder from graphite by electrolysis] // *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii. Siberian Journal of Science and Technology*. 2020. Vol. 21, no. 4. P. 574–580. DOI: 10.31772/2587-6066-2020-21-4-574-580. (In Russ.).
2. Rychkov S. P. Modelirovaniye konstruktsey v srede Femap with NX Nastran [Modeling structures in the Femap with NX Nastran environment]. Moscow: DMK Press Publ., 2013. 784 p. (In Russ.).
3. Urdeix P., Doweidar M. H. A computation model for cardiomyocytes mechano-electric stimulation to enhance cardiac tissue regeneration // *Mathematics*. 2020. Vol. 8 (1875). 8111875. DOI: 10.3390/math8111875. (In Engl.).
4. Mokin N. A., Kustov A. A., Gandzhuntsev M. I. Chislennoye issledovaniye sobstvennykh chastot i form kolebaniy vozdukhopornyykh sooruzheniy // [Numerical investigation of natural frequencies and mode shapes of air-supported structures] // *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsey i sooruzheniy. Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2018. Vol. 14 (4). P. 337–347. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-337-347. (In Russ.).
5. Tang D., Zhang X., Hu S. The reuse of red brick powder as a filler in styrene-butadiene rubber // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 261 (12). 120966. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120966. (In Engl.).
6. Wang Z. S., Zhen Z. H. Study on the Silicone Coating with Heat Insulation and Resistance // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 680. P. 35–38. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.680.35. (In Engl.).
7. Gardowski T., Gajewski T., Grabski J. K. Torsional and Transversal stiffness of orthotropic sandwich panels // *Materials*. 2020. Vol. 13 (21). 5016. DOI: 10.3390/ma13215016 (In Engl.).
8. Krisilov A. V., Karamov S. V. Primeneniye khaoticheskoy dinamiki v sistemakh radiosvyazi [Application of chaotic dynamics in radio communication systems] // *Aktual'nyye problemy prikladnoy matematiki, informatiki i mekhaniki. Aktual'nyye problemy prikladnoy matematiki, informatiki i mekhaniki*. Voronezh, 2020. P. 264–272. (In Russ.).
9. Yaushev A. A., Taranenko P. A., Zhestkov A. V. [et al.]. Raschetno-eksperimental'noye issledovaniye chastot i form sobstvennykh kolebaniy svarnogo korpusa koriolisovogo raskhodomera [Computational and experimental study of frequencies and modes of natural vibrations of the welded body of a Coriolis flow meter] // *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo universiteta. Seriya «Matematika. Mekhanika. Fizika». Bulletin of the South Ural State University*. 2018. Vol. 1, no. 1. P. 45–51. DOI: 10.14529/mmph180106. (In Russ.).
10. Shevchenko A. V., Rotermel' A. R., Shevchenko V. I. [i dr.]. Opredeleniye sobstvennykh chastot i form kolebaniy rotora okislitel'nykh turbonasosnogo agregata raketnogo dvigatelya [Eigenfrequencies and vibration forms determination of the oxidizer rotor of the rocket engine turbo-pump unit] // *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. Izvestiya Tula State University. Technical Science*. 2020. No. 2. P. 461–467. (In Russ.).
11. Wu Y., Yang L., Xu T. [et al.]. Thermo-elasto-hydrodynamic characteristics analysis of journal microbearing lubricated with rarefied gas // *The micromachines*. 2020. Vol. 11 (11). 955. DOI: 10.3390/mi11110955. (In Engl.).
12. Pavlov V. P., Nusratullina L. R. Metod rascheta sobstvennykh chastot i form poperechnykh kolebaniy sterzhnya peremennogo secheniya s uprugim zakrepleniyem [The method of calculating natural frequencies and forms the transverse vibrations of a rod variable cross-section with elastic securing] // *Vestnik UGATU. Vestnik USATU*. 2019. Vol. 26, no. 3 (85). P. 24–38. (In Russ.).
13. Volkov D. P., Egorov A. G., Mironenko M. E. Teplofizicheskiye svoystva polimernykh kompozitsionnykh materialov [Heat-physical properties of polymer composite materials] // *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2017. Vol. 17, no. 2. P. 287–293. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-287-2932017. (In Russ.).

14. Kolosova A. S., Sokol'skaya M. K., Vitkalova I. A. [et al.]. Napolniteli dlya modifikatsii sovremennykh polimernykh kompozitsionnykh materialov [Fillers for modification of modern polymer composite materials] // *Fundamental'nyye issledovaniya. Fundamental Research*. 2017. No. 10. P. 459–465. (In Russ.).

15. Zaponov A. E. Teoreticheskoye i eksperimental'noye issledovaniye protsessov khimicheskogo razlozheniya modifitsirovannogo nizkomolekulyarnogo polimera stirosil v nepreryvnom pole lazernogo izlucheniya [Theoretical and experimental study of the processes of chemical decomposition of a modified low-molecular-weight stirosil polymer in a continuous field of laser radiation] // *Vestnik Voennoy akademii RVSN im. Petra Velikogo. Humanitarian Bulletin of the Military Academy of Strategic Rocket Troops*. 2018. No. 11 (43). P. 295–302. (In Russ.).

16. Patent 2631302 Russian Federation, IPC C 09 D 183/04, C 09 D 5/00, C 09 D 5/18. Teplozashchitnoye pokrytiye [Thermal coating] / Orlov V. G., Savvateyeva O. A., Shumov A. E. [et al.]. No. 2015105402. (In Russ.).

17. Patent 2658327 Russian Federation, IPC G 21 F 1/10. Sposob izgotovleniya polimernogo kompozitsionnogo radiatsionno-zashchitnogo materiala [Method for manufacturing polymer composite radiation protective material] / Dorofeyev A. A., Bochkareva N. N., Klyuyeva T. A. [et al.]. No. 2017125609. (In Russ.).

18. Patent 2686196 Russian Federation, IPC B 05 D 1/38, B 32 B 27/20, B 32 B 27/24, B 32 B 27/26, C 09 D 183/04. Sposob polucheniya vysokotemperaturnogo teplozashchitnogo pokrytiya [Method of producing high-temperature heat-shielding coating] // Orlov V. G., Savvateyeva O. A., Shumov A. E. [et al.]. No. 2017140275. (In Russ.).

19. Patent 2690814 Russian Federation, IPC C 09 D 5/00, C 09 D 183/04. Sostav dlya polucheniya teplozashchitnogo pokrytiya [Composition for producing heat protective coating] / Kovrova N. V., Kuzina E. V., Nekrasova T. I. [et al.]. No. 2017115354. (In Russ.).

20. Patent 2702881 Russian Federation, IPC C 23 C 26/00, C 23 C 4/04, C 23 C 4/12. Gradyentnoye metallopolimernoye pokrytiye [Gradient metal-polymer coating] / Baldayev N. Kh., Man'kovskiy S. A. No. 2018134148. (In Russ.).

21. Patent 2721323 Russian Federation, IPC C 09 K 21/14, A 62 C 2/00, B 32 B 3/24, B 32 B 9/04, B 32 B 7/02, B 32 B 15/06, B 32 B 15/08, B 32 B 27/12. Kompozitsionnyy material dlya

zashchity ot vneshnikh vozdystviyushchikh faktorov i sposob ego polucheniya [Composite material for protection against external factors and method for production thereof] / Esaulov S. K., Esaulova Ts. V. No. 2018143354. (In Russ.).

22. Patent 2017115354A Russian Federation, IPC C 08 L 9/00. Sostav dlya polucheniya teplozashchitnogo pokrytiya [Composition for producing heat protective coating] / Kovrova N. V., Kuzina E. V., Nekrasova T. I. [et al.]. No. 2017115354. (In Russ.).

23. Serra A., Ramis X., Fernandez-Francos X. Epoxy Sol-Gel Hybrid Thermosets // *Coatings*. 2016. Vol. 6. 6010008. DOI: 10.3390/coatings6010008. (In Engl.).

24. Maia F., Yasakau K. A., Carneiro J. [et al.]. Corrosion protection of AA2024 by sol-gel coatings modified with MBT-loaded polyureas microcapsules // *Chemical Engineering Journal*. 2016. Vol. 283. P. 1108–1117. DOI: 10.1016/j.cej.2015.07.087. (In Engl.).

25. Malucelli G. Hybrid organic/inorganic coatings through dual-cure processes: State of the art and perspectives // *The Coatings*. 2016. Vol. 6. 6010010. DOI: 10.3390/coatings6010010. (In Engl.).

KUPRYASHOV Andrey Viktorovich, Graduate Student of Electronic Engineering and Telecommunications Department.

SPIN-code: 9093-4774

AuthorID (RCSI): 1087238

ORCID: 0000-0003-1296-4942

Address for correspondence: KupryashovAndrey@yandex.ru

For citations

Kupryashov A. V. Study of the dynamics and rigidity of the multifunctional coating of the protective element of the aircraft // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 1. P. 86–94. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-86-94.

Received November 11, 2020.

© A. V. Kupryashov