

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЗМЕРОСТАБИЛЬНОЙ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

© 2016 В.Е. Биткин, О.Г. Жидкова, А.В. Денисов, А.В. Бородавин, Д.В. Митюшкина

ООО «СКТБ «Пластик», г. Сызрань

Статья поступила в редакцию 21.10.2016

Отражены аспекты применения полимерных композиционных материалов в несущих конструкциях оптических телескопов с учетом современных требований по размерной стабильности, массовым характеристикам, прочности и стойкости конструкции к внешним воздействующим факторам. Представлены результаты проектирования и выбора конструктивно-силовой схемы размеростабильной интегральной конструкции корпуса оптико-электронного модуля (ОЭМ), выполненной из композиционного материала. Показаны расчетные зависимости, определяющие двухоснейтральные изотропные структуры композита, используемые при создании размеростабильных конструкций. Приведены характеристики материалов, использованные в конструкции корпуса. Проанализирована возможность создания размеростабильной конструкции корпуса ОЭМ с уровнем размеростабильности порядка 10^{-6} методом подбора рациональных схем армирования и выбора материала при исследовании напряженно-деформированного состояния. Проведен модальный анализ, расчет напряженно-деформированного состояния конструкции корпуса при воздействии эксплуатационных нагрузок.

Ключевые слова: корпус оптико-электронного модуля, композиционные материалы, размеростабильные конструкции, прочность, жесткость, размеростабильность

Конструкция корпуса оптико-электронного модуля (ОЭМ) для крепления оптических элементов и узлов космического аппарата (КА) из полимерных композиционных материалов (КМ) на основе углеродных волокон является одним из типов космических размеростабильных конструкций, гарантирующих высокую степень разрешения при сканировании объектов наблюдения. Применение углепластика позволяет создать конструкцию не только с малыми деформациями, но и хорошей массовой эффективностью [1].

Применение композиционных материалов в размеростабильных конструкциях неизбежно ставит задачу синтеза или конструирования самого материала, его качественного и количественного состава, схем армирования для обеспечения необходимых значений коэффициентов линейного температурного расширения при определенном уровне прочностных и жесткостных характеристик [2].

Условия эксплуатации размеростабильных космических конструкций из композиционных материалов (КМ) предъявляют жесткие требо-

вания к физико-механическим и термоупругим свойствам используемых композитов. Конструкция и силовые элементы, спроектированные из КМ, должны обладать минимально возможной массой при условии сохранения высокой прочности, жесткости, стабильности линейных и угловых размеров в заданном диапазоне температур, значительным ресурсом работы при соответствующем уровне надежности. Эти аспекты проектирования и изготовления размеростабильных конструкций описаны в работах [3, 4, 5, 6].

Наибольший вклад в отклонения посадочных поверхностей оптических элементов от заданных теоретических значений вносят термоупругие деформации, возникающие вследствие температурного перепада и зависящие от коэффициента линейного термического расширения (КЛТР), состава и схем армирования композиционных материалов.

Анализ деформативности, прочности и стойкости корпуса ОЭМ к внешним воздействующим факторам с учетом выбора типа структурных элементов этой формостабильной конструкции, оптимальных схем армирования и физико-механических свойств волокон и матриц различного типа является сложной и актуальной задачей с точки зрения определения работоспособности конструкции. Разработка технологических процессов и технологической оснастки на принципе совмещенного во времени формования всех элементов конструкции позволяет изготавливать и собирать наиболее эффективные по массе, высокоточные и стабильные по геометрии конструкции интегрального типа [3, 4]. Проведение комплекса необходимых испытаний для подтверждения размеростабильности, прочности

Биткин Владимир Евгеньевич, первый заместитель генерального директора – генеральный конструктор по СИ. E-mail: gksi@sktb-plastik.ru

Жидкова Ольга Геннадьевна, заместитель генерального конструктора по научной работе. E-mail: oprioqr-prg@sktb-plastik.ru

Денисов Александр Владимирович, начальник отдела. E-mail: oprioqr@sktb-plastik.ru

Бородавин Андрей Викторович, заместитель начальника отдела. E-mail: oprioqr-zn3@sktb-plastik.ru

Митюшкина Диана Викторовна, ведущий инженер. E-mail: oprioqr-prg@sktb-plastik.ru

и выполнения требований по надежности подтверждает правильность выбора конструктивно-технологических решений.

С использованием высокомодульных углеродных волокон изготавливаются композиционные материалы, имеющие высокие жесткостные характеристики и заданные значения коэффициента линейного термического расширения (КЛТР). Эти композиционные материалы на основе непрерывных волокон по многим показателям, в частности по удельной прочности и жесткости, превосходят металлы и обеспечивают значительную экономическую эффективность при использовании в качестве основных материалов для создания конструкций с заданными свойствами.

Конструкция корпуса опико-электронного модуля состоит из непосредственно корпуса и съемной крышки, обеспечивающей возможность доступа к оптическим элементам, расположенным внутри корпуса.

На рис. 1 представлен общий вид конструкции корпуса ОЭМ.

В процессе эксплуатации корпус ОЭМ должен сохранять геометрические параметры в заданных пределах, быть прочным и жестким при воздействии линейных перегрузок с учетом соответствующих коэффициентов безопасности. Несущая конструкция корпуса ОЭМ должна обеспечивать стабильность угловых и линейных размеров (угловых и линейных расстояний между посадочными поверхностями М1÷М5 оптических узлов конструкции) с заданной точностью в процессе орбитальной эксплуатации и наземной юстировки.

Требования к взаимному смещению площадок М1÷М5 крепления элементов РСНК с установленными зеркалами при предварительной и окончательной юстировке следующие:

- смещение площадок М2, М4 относительно площадок М1 и М3 по осям Х и У не должно превышать 0,01 мм;

- разворот площадок М2, М4, М5 относительно площадок М1 и М3 не должен превышать 3 угловых секунды.

При проверке оптического качества в рамках испытаний аппарат крепится на биподах, и

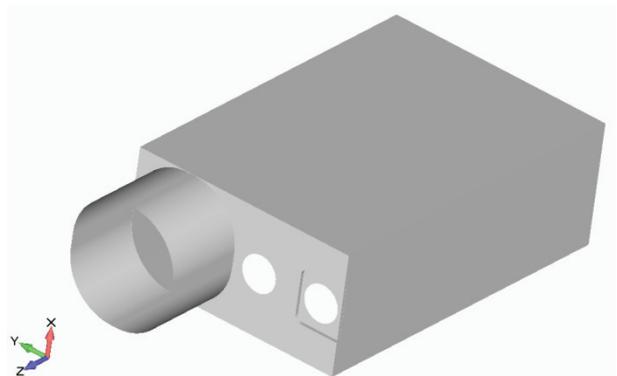


Рис. 1. Общий вид конструкции корпуса ОЭМ

требования к взаимному смещению площадок М1÷М5 (с установленной крышкой) следующие:

- смещение площадок М2, М4 относительно площадок М1 и М3 по осям Х и У не должно превышать 0,04 мм;

- разворот площадок М2, М4, М5 относительно площадок М1 и М3 не должен превышать 6 угловых секунд.

Обеспечение столь жестких требований по прецизионности конструкции требует специальных проектно-конструкторских решений, к которым относятся:

- выбор конструктивно-силовой схемы, обеспечивающей минимальные деформации конструкции при одновременном удовлетворении прочностных требований;

- минимизация диапазона изменения температур эксплуатации (стабильность температурного поля конструкции);

- минимизация коэффициентов линейного термического расширения конструкции [6].

К числу основных методов управления конструктивно-силовой схемой относятся интеграция конструктивных элементов и геометрическая компактность зоны размеростабильности прецизионной конструкции, позволяющие уменьшить точностные погрешности вследствие исключения люфтовых соединений конструктивных элементов и минимизации числа конструктивных связей между ними [6].

Если снижение массы является общей задачей при проектировании конструкций оптических систем различного назначения, то минимизация деформаций является частной задачей.

При создании слоистых композитов с необходимыми термомеханическими свойствами управляемыми параметрами являются исходные термоупругие свойства наполнителя и матрицы, их объемное содержание в КМ и углы ориентации слоев. Эти параметры однозначно определяют область возможных значений термомеханических характеристик структуры композиционного материала, что позволяет проектировать конструкции посредством рационального выбора композиционного материала, его структуры и схемы армирования.

С использованием самосогласованной модели для трансверсально-изотропной смеси в [5] получены следующие выражения для коэффициентов линейного термического расширения композита вдоль и поперек волокон (в осях материала 1, 2):

$$\alpha_1 = \alpha_m + \nu_\epsilon (\alpha_\epsilon - \alpha_m) L_1,$$

$$\alpha_2 = \alpha_m + \nu_\epsilon (\alpha_\epsilon - \alpha_m) L_2,$$

$$\text{где } L_1 = \frac{(1 + \nu_\epsilon)(E_1 - \nu_m E_m) - (1 + \nu_m)\nu_m E_m}{\nu_\epsilon (\nu_\epsilon - \nu_m) E_1},$$

$$L_2 = \frac{(1 + \nu_\epsilon)(\nu_m E_1 \nu_{12} - \nu_m G_{12}) + \nu_\epsilon \nu_{12} E_\epsilon (1 + \nu_m)}{\nu_\epsilon (\nu_\epsilon - \nu_m) G_{12}},$$

Е, G, α , ν – модули упругости, сдвига, коэффици-

циенты линейного температурного расширения, объемное содержание, коэффициенты Пуассона компонентов композита соответственно.

Для гексагональной двоякопериодической модели, находящейся в условиях плоской температурной деформации, найдены выражения для коэффициентов температурного расширения композита:

$$\alpha_1 = \alpha_m - (\alpha_m - \alpha_e) \frac{(1 + \nu_m) \nu_e E_e - (1 + \nu_e)(E_1 - \nu_m E_m)}{E_1(\nu_m - \nu_e)},$$

$$\alpha_2 = \alpha_m + (\alpha_m + \alpha_e) \nu_{12} - (\alpha_m - \alpha_e)(1 - \nu_e) \frac{\nu_m - \nu_e}{\nu_m - \nu_{12}}.$$

Данные выражения – точные и зависят только от эффективности упругих модулей композита. Разработанные формулы для расчета термоупругих констант волокнистых композиционных материалов позволяют на стадии проектирования элемента конструкции проводить его структурную и технологическую оптимизацию, комбинируя имеющиеся в распоряжении материалы матриц, армирующиеся волокон и их объемное соотношение.

На основании вышеизложенного были исследованы термоупругие характеристики двухоснейтральных структур КМ на основе углерент ЛУ-П/0,1, КУЛОН-500/0,07 и связующего ЭНФБ, а также на основе препрега М55J/НИИКАМ-РС для степени армирования слоя $V_b = 0,6$.

Основные физико-механические характеристики материалов, использованные в расчетах, приведены в табл. 1.

Анализ результатов исследований показал, что, варьируя углы армирования слоев пакета, можно получить термомеханические характеристики композита, позволяющие свести к минимуму деформации конструкции от воздействия температуры, также создать двухоснейтральные структуры пакета КМ, притом эти возможности могут быть в значительной степени расширены путем использования методов технологического воздействия, выбора режима отверждения, степени армирования композита, технологического напряжения и др.

Проектирование и оптимизация вариантов интегральной конструкции корпуса ОЭМ осуществлялось с использованием традиционных подходов представления конструктивной схемы в виде оболочки, усиленной жестким и прочным каркасом из подкрепляющих ребер.

Создание расчетных моделей осуществлялось с использованием широко применяемого метода конечных элементов на базе профессионального пакета прикладных программ NASTRAN [8-10].

Корпус конструкции, ребра жесткости в расчетной схеме представлены оболочечными элементами, навесные элементы – элементами массы с учетом положения центра масс каждого моделируемого элемента, материал конструкции корпуса ОЭМ при расчетах принят ортотропным.

На предварительном этапе проведена оптимизация конструктивно-силовой схемы конструкции корпуса ОЭМ с учетом того, что при этом особенно важно, чтобы несимметричное расположение подкрепляющих ребер относительно оболочки оказывало незначительное влияние на напряженно-деформированное состояние конструкции.

Рассматривалось 3 основных вида подкрепления конструкции ребрами:

- 1) слабое подкрепление: $F/L \ll h, J/L \ll h^3/12$;
- 2) мощное подкрепление: $F/L \gg h, J/L \gg h^3/12$;
- 3) наиболее часто встречающееся в технике: $F/L \sim h, J/L \gg h^3/12$; где F – площадь поперечного сечения ребра, J – момент инерции сечения ребра, L – расстояние между подкрепляющими ребрами, h – толщина обшивки.

С учетом результатов оптимизации выбран наиболее часто встречающийся вид подкрепления, когда отношение площади поперечного сечения ребра к расстоянию между ребрами сопоставимо с толщиной оболочки, но при этом отношение момента инерции сечения ребра к расстоянию между ребрами гораздо больше $h^3/12$.

Несколько рассмотренных вариантов конструктивно-силовых схем конструкции ОЭМ приведены на рис. 2.

Таблица 1. Физико-механические характеристики однонаправленных углепластиков

Характеристика	Наименование материала		
	ЛУ-П/0,1+ЭНФБ	КУЛОН-500/0,07+ЭНФБ	М55J/НИИКАМ-РС
Модуль упругости E , ГПа (кгс/мм ²)	140 (14 000)	270 (27 000)	300 (30 000)
Модуль сдвига G_{12} , ГПа (кгс/мм ²)	5 (500)	5 (500)	6 (600)
Коэфф. Пуассона μ_{12}	0,251	0,302	0,28÷0,3
КЛТР по основе $\alpha_1 \cdot 10^6, K^{-1}$	-0,5	-0,98	-1,0
Плотность материала ρ , кг/м ³	1 500	1 700	1 620

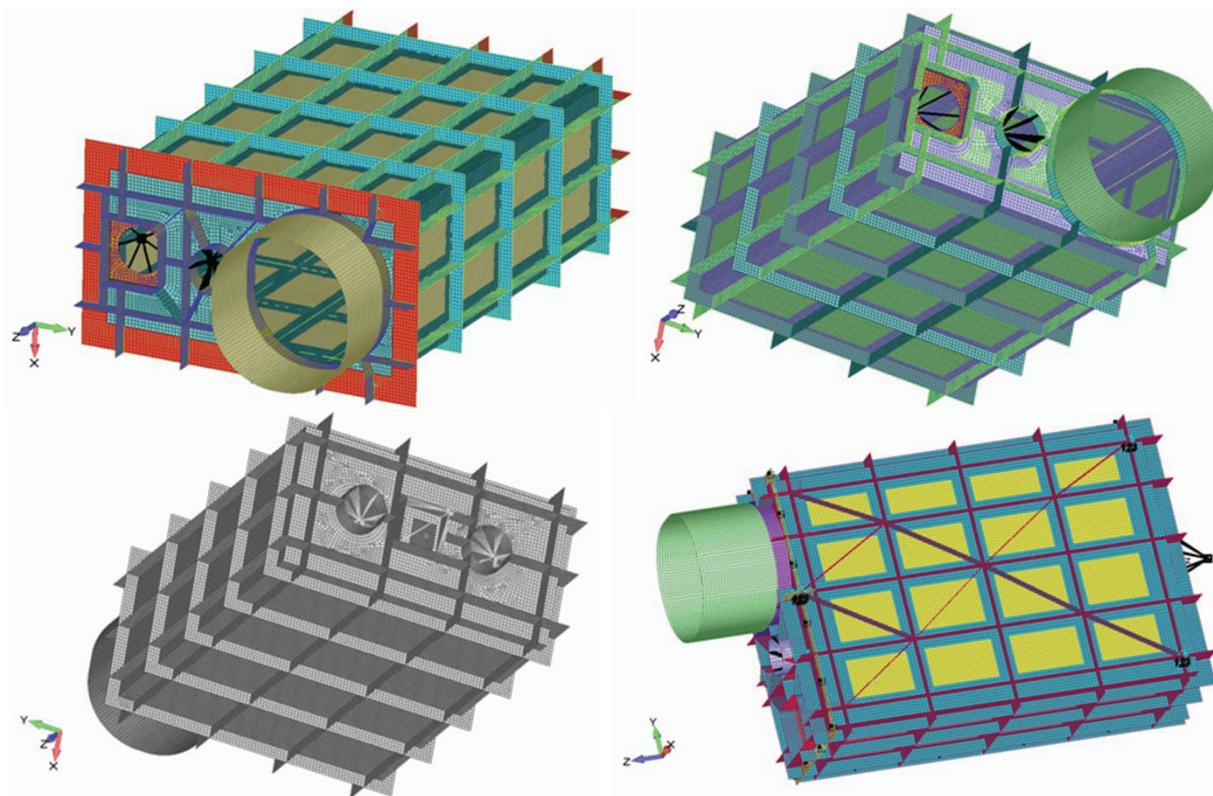


Рис. 2. Несколько рассмотренных вариантов конструктивно-силовых схем конструкции корпуса ОЭМ

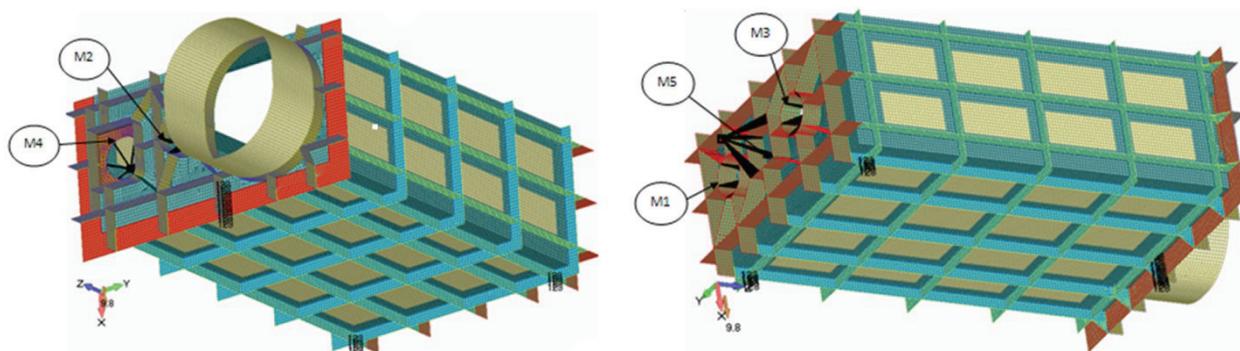


Рис. 3. Схема разбивки на конечные элементы и закрепление варианта конструкции с выбранной в результате оптимизации конструктивно-силовой схемой при юстировке

С учетом результатов оптимизации выбраны геометрические параметры конструкции и схема подкрепления.

Конечноэлементная модель корпуса ОЭМ с навесными элементами и схемой расположения посадочных поверхностей оптических элементов M1 - M5, выбранная в результате оптимизации, представлена на рис. 3.

Геометрические параметры конструкции, полученные в результате параметрической оптимизации следующие. Толщина обшивки корпуса 2 мм. Подкрепляющие ребра таврового сечения имеют толщину от 4 до 8 мм и высоту от 30 до 80 мм. Съемная крышка также имеет толщину 2 мм и ребра высотой 30 мм, толщина ребер 4 мм.

На рис. 4 и в табл. 2-3 показаны результаты предварительной и окончательной юстировки

корпуса, когда аппарат установлен на боковую сторону. Корпус опирается на 3 точки.

В табл. 4 приведены результаты проверки оптического качества в рамках испытаний корпуса с крышкой, аппарат крепится штатно на биподах. Сила тяжести направлена вдоль оси X вертикально вниз.

Развороты посадочных поверхностей масс M2, M4 и M5 относительно посадочных поверхностей масс M1 и M3 под действием силы тяжести в случае проверки оптического качества в рамках испытаний для всех рассмотренных вариантов материала гораздо меньше регламентированного значения 6 угл.сек.

Анализ расчетных жесткостных характеристик конструкции ОЭМ для трех вариантов углепластика при юстировке без крышки, а также в случае про-

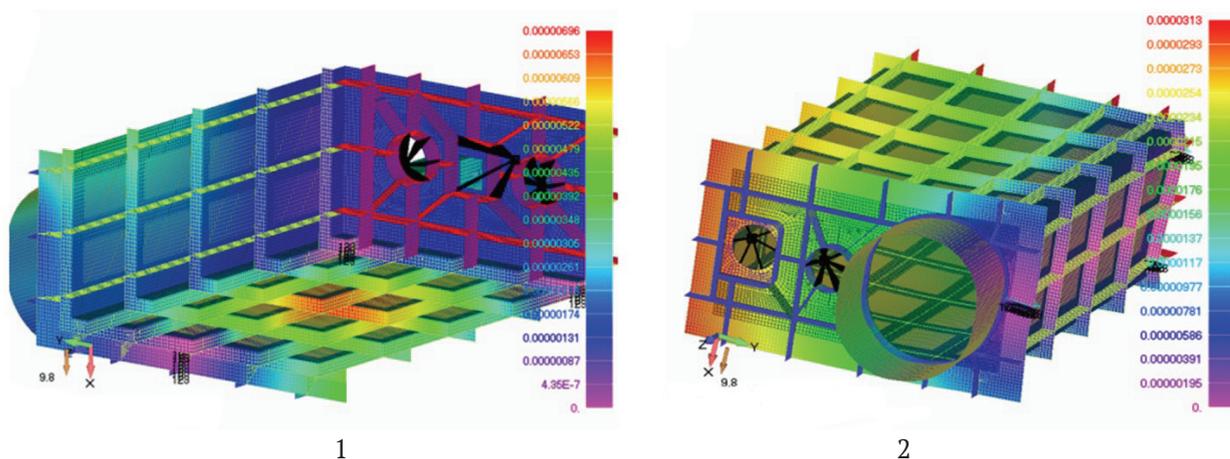


Рис. 4. Распределение эпюр суммарных деформаций конструкции корпуса ОЭМ (материал КУЛОН-500/0,07+ЭНФБ):

1 – предварительная и окончательная юстировка корпуса; 2 – проверка оптического качества в рамках испытаний

Таблица 2. Смещение посадочных поверхностей масс М2 и М4 относительно посадочных поверхностей масс М1 и М3 под действием силы тяжести. Юстировка корпуса.

Материал конструкции	Смещение, мм							
	М2				М4			
	Относительно М1		Относительно М3		Относительно М1		Относительно М3	
	По оси X	По оси Y						
ЛУ/П-0,1+ЭНФБ	0,00115	0,00358	0,00110	0,00359	0,00461	0,00367	0,00456	0,00368
КУЛОН-500/0,07+ЭНФБ	0,00071	<<0,01	0,00061	<<0,01	0,00253	<<0,01	0,00249	<<0,01
М55J/НИИКАМ-РС	0,00066	<<0,01	0,00058	<<0,01	0,00238	<<0,01	0,00230	<<0,01

Таблица 3. Разворот посадочных поверхностей масс М2, М4 и М5 относительно посадочных поверхностей масс М1 и М3 под действием силы тяжести. Юстировка корпуса.

Материал конструкции	Разворот, угл.сек.					
	М2		М4		М5	
	Относительно М1	Относительно М3	Относительно М1	Относительно М3	Относительно М1	Относительно М3
ЛУ/П-0,1+ЭНФБ	2,679	3,649	3,432	4,402	0,435	1,405
КУЛОН-500/0,07+ЭНФБ	1,440	1,642	2,098	2,302	0,182	1,918
М55J/НИИКАМ-РС	1,316	1,493	1,856	2,035	0,180	0,363

верки оптического качества в рамках предварительных испытаний корпуса с крышкой, показывает, что для достижения предъявляемых требований по деформативности в конструкции корпуса предпочтительным является использование материала М55J/НИИКАМ-РС, а также углепластика на основе ленты КУЛОН-500/0,07 на связующем ЭНФБ.

Исходя из изложенного выше в качестве основного материала был выбран композиционный

материал с использованием в качестве наполнителя углеренты КУЛОН-500/0,07 на эпоксидной матрице (связующее ЭНФБ) с учетом низкой температурной деформируемости и высокими упруго-прочностными характеристиками этого углепластика. Кроме этого данный углепластик изготавливается на основе отечественных углеродного наполнителя и связующего эпоксидного класса. Эпоксидные связующие обладают ком-

Таблица 4. Смещение посадочных поверхностей масс М2 и М4 относительно посадочных поверхностей масс М1 и М3 под действием силы тяжести. Проверка оптического качества в рамках испытаний.

Материал конструкции	Смещение, мм							
	М2				М4			
	Относительно М1		Относительно М3		Относительно М1		Относительно М3	
	По оси X	По оси Y						
ЛУ/П-0,1+ЭНФБ	0,03000	0,00545	0,01300	0,00555	0,04260	0,00602	0,02440	0,00627
КУЛОН-500/0,07+ЭНФБ	0,0178	0,00305	0,00689	0,00304	0,0243	0,00331	0,0136	0,00336
М55J/НИИКАМ-РС	0,01606	0,00275	0,00623	0,00276	0,02197	0,00299	0,02401	0,00312

плексом благоприятных свойств, определяющих их широкое применение. К этим свойствам относятся: высокие механические и адгезионные характеристики, позволяющие достаточно полно использовать свойства армирующих волокон, хорошая технологичность, обеспечивающая создание высокопроизводительных процессов пропитки армирующих элементов, формования изделия и окончательного его отверждения. Эпоксидные связующие могут долгое время находиться в недоотвержденном состоянии, что позволяет изготавливать на их основе предварительно пропитанные и частично отвержденные полуфабрикаты (препреги). Отверждение смол можно осуществлять при необходимости в широком интервале температур без выделения летучих веществ с малой объемной усадкой 1÷5% [7].

При изменении температуры корпуса ОЭМ на 10°С в случае штатного крепления на трех опорах, обеспечивающих температурную развязку (чтобы не вызывать дополнительных монтажных

деформаций) численные значения линейных смещений вдоль оси Z посадочных поверхностей масс М2 и М4 относительно посадочных поверхностей масс М1 и М3 находятся в пределах 0,006÷0,009 мм при допуске не более 0,010 мм.

Для одного из наихудших с точки зрения возникающих деформаций и напряжений вариантов нагружения – перегрузки от собственного веса на этапе выведения на орбиту оценивались максимальные эквивалентные деформации и напряжения в конструкции. На рис. 5 приведены качественная картина, эпюры суммарных деформаций и эквивалентных напряжений в конструкции ОЭМ для этого варианта нагружения. С учетом коэффициента безопасности, конструкция обеспечивает достаточный запас прочности (не менее 10). При этом коэффициент критической нагрузки, при которой конструкция теряет устойчивость, равен 196.

Проанализированы собственные частоты и формы колебаний конструкции корпуса объекти-

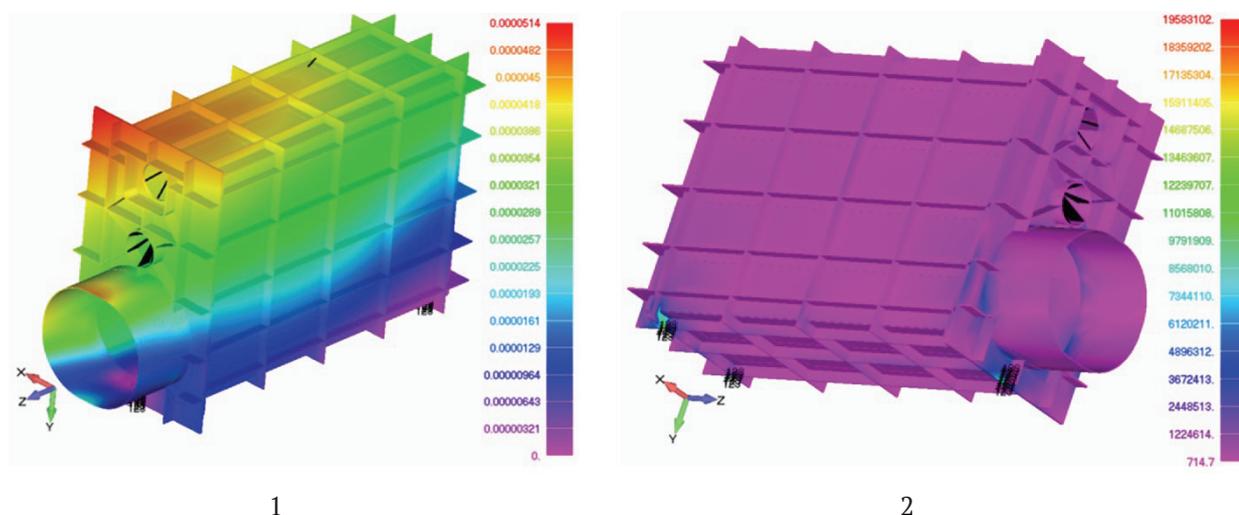


Рис. 5. Результаты анализа напряженно-деформированного состояния конструкции корпуса ОЭМ на этапе выведения на орбиту (максимум скоростного напора, материал КУЛОН-500/0,07+ЭНФБ): 1 – эпюры суммарных деформаций конструкции; 2 – эпюры эквивалентных напряжений

ва ОЭМ. Конструктивно-силовая схема конструкции корпуса ОЭМ и жесткостные характеристики опор обеспечивают первую собственную частоту колебаний конструкции не ниже 107 Гц.

Таким образом, в результате проведенного исследования в части оптимизации конструктивно-силовой схемы подкрепления интегральной конструкции корпуса ОЭМ, выбора структуры композита, удовлетворяющей условиям высокой размеростабильности и наименьшей чувствительности к отклонениям характеристик монослоя, показана возможность создания размеростабильной конструкции корпуса оптоэлектронного модуля космического базирования с использованием термически изотропных схем армирования углекомпозитного материала, уровень размерной стабильности спроектированной конструкции находится в пределах 10^{-6} . На последующих этапах с учетом уточненных экспериментальных физико-механических характеристик материала конструкции следует обратить внимание на оптимизацию ее массы при неизменных жесткостных и прочностных характеристиках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ напряженно-деформированного состояния корпуса из углепластика сканера высокой разрешающей способности для космического аппарата / А.Л. Макаров, А.М. Потапов, В.А.Коваленко, А.В.Кондратьев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. № 5(102). С. 32 -39.
2. Композиционные материалы в ракетно-космическом аппаратостроении [под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Г.П. Гардымова и д-ра техн. наук, проф. Е.В. Мешкова]. СПб.: СпецЛит, 199. 271 с.
3. Апробирование технологического комплекса изготовления силовых и высокоточных размеростабильных элементов конструкций интегрального типа из волокнистых композиционных материалов / В.Е. Биткин, А.В. Денисов, М.А. Денисова, О.Г. Жидкова, Е.В. Назаров, О.И. Рогальская, А.В. Мелентьев, И.А. Мизинова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1(5).
4. Биткина Е.В., Денисов А.В., Биткин В.Е. Конструктивно-технологические методы создания размеростабильных космических композитных конструкций интегрального типа // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т.14. №4(2). С. 555-560.
5. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов / Г.А. Молодцов, В.Е. Биткин, В.Ф. Симонов, Ф.Ф. Урмансов. М.: Машиностроение, 2000. 352 с.
6. Климакова Л.А., Половый А.О. Возможности использования углепластиков в термостабильных структурах прецизионных конструкций // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2008, №2.
7. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
8. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC. visualNASTRAN for Windows. М.: ДМКПресс 2004, 700 с.
9. MSC.NASTRAN Quick Reference Guide.
10. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.

ENGINEERING OF THE SIZE-STABLE LOAD-BEARING FRAME CONSTRUCTION OF OPTICAL ELECTRONIC CARBON MODULE FOR THE SPACECRAFT

© 2016 V.E. Bitkin, A.V. Denisov, A.V. Borodavin, O.G. Zhidkova, D.V. Mityushkina

JSC SKTB "Plastik", Syzran

The aspects of use of polymeric composite materials in the load-bearing frame constructions of optic telescopes are reflected with account of modern demands to size stability, mass characteristics, resistance and persistence of construction to external attacking factors.

The results of engineering and choice of structural arrangement of size-stable integrated load-bearing frame construction of optical electronic module (OEM), made of composite materials, are presented. The calculation dependences, determinative two-dimensional neutral isotropic structures of composite, using for generation of size-stable constructions, are shown. The characteristics of materials, used in the construction of frame, are reported. The possibility of generation of size-stable frame construction of OEM with the level of size-stability approximately 10^{-6} by numerical method of sustainable diagram of reinforcement and choice of materials for investigation of strain-stress state are analyzed. The modal analyses, the calculation of strain-stress state of frame construction from exposure to use forces are conducted.

Key words: frame of optical electronic module, composite materials, size-stable constructions, resistance, stiffness, size-stability.

Vladimir Bitkin, First Deputy General Director – Chief Designer. E-mail gksi@sktb-plastik.ru

Olga Zhidkova, Deputy Chief Designer for Academic Affairs. E-mail opriokr-prg@sktb-plastik.ru

Alexander Denisov, Head of Department.

E-mail opriokr@sktb-plastik.ru

Andrei Borodavin, Deputy Head of Department.

E-mail opriokr-zn3@sktb-plastik.ru

Diana Mityushkina, Leading Engineer.

E-mail opriokr-prg@sktb-plastik.ru