

Определение динамических характеристик многослойных углепластиковых пластин конструкции сканера высокого разрешения

В.Н. Маслей¹ • Н.Г. Крищук²

1- ДКБ «Южное», г.Днепр, Украина

2- КПИ им. Игоря Сикорского», г.Киев, Украина

Received: 07 August 2017 / Accepted: 05 September 2017

***Аннотация.** Представлены результаты сравнительного анализа численного определения динамических характеристик многослойных углепластиковых пластин конструкции сканера космического аппарата по различным типам конечно-элементной аппроксимации физико-механических свойств композитного материала. Используя топологическую структуру построения армирующих слоев материала в плоскости пакета пластин, экспериментальные данные для упругих и массовых характеристик однородных углепластиковых волокон, определены эквивалентные конструктивно-ортотропные жесткостные и упругие характеристики материала композитных пластин.*

***Ключевые слова:** многослойные углепластиковые пластины, композиционные материалы, методика расчета, конечно-элементные аппроксимации, упругие и массовые характеристики, проектирование, сканер*

Введение

Современная ракетно-космическая техника немыслима без применения композиционных материалов (КМ). Последние достижения в сфере материаловедения и новых технологий дают возможность усовершенствовать физико-механические характеристики композиционных материалов применяемых для изготовления конструктивных элементов корпуса объектива сканеров высокого разрешения (КСВР) и ферменных конструкций для космических аппаратов (КА), разрабатываемых ГП «КБ Южное» [1-3].

Основные узлы данного типа изделий необходимой геометрической формы для КСВР или КА включают различные конструкции из сопряженных пластинчато-стержневых элементов или корпусных монолитных коробов сопряженных со съемными углепластиковыми прямоугольными плитами. От весового совершенства каркаса КСВР и присоединенных плит, их прочностных и жесткостных характеристик, температурной размерностойкости и стойкости к факторам силового нагружения при выводе на орбиту и эксплуатации в условиях космического пространства во многом зависит качество, надежность и длительная работоспособность КА в целом. Поэтому внедрение КМ [4] для изготовления изделий данного типа приобрело весьма актуальное значение, как наиболее эффективного пути снижения веса в различных деталях КСВР, на основе синхронности конструктивных решений при проектировании материала и конструкции [5-8]. Последнее открывает возможности управления схемой армирования КМ, определения способов их формования, ликвидации многих промежуточных операций, характерных для традиционных технологических процессов создания материалов с заданными механическими свойствами.

Цель работы. Сравнительный анализ методов численного определения динамических характеристик композиционных многослойных углепластиковых размерностойких плит по экспериментально-расчетным данным физико-механических свойств материала для последующего учета в динамической модели конструкции плит корпуса сканера космического аппарата.

Материалы и методы

Применяемые в настоящее время методы создания конструкций силового каркаса КСВР из КМ не в полной мере отвечают требованиям по обеспечению температурно-размерной стабильности, прочности и жесткости конструкций КА, а применение механических соединений снижает эффективность использования КМ. Все панели, плиты и трубы силового каркаса КСВР (рис.1) представляют собой клееные конструкции

✉ Н.Г. Крищук
krys@ukr.net

изготовленные из композитных материалов. Квадратные углепластиковые трубы соединены между собой в каркас с помощью фрезерованных титановых фитингов.

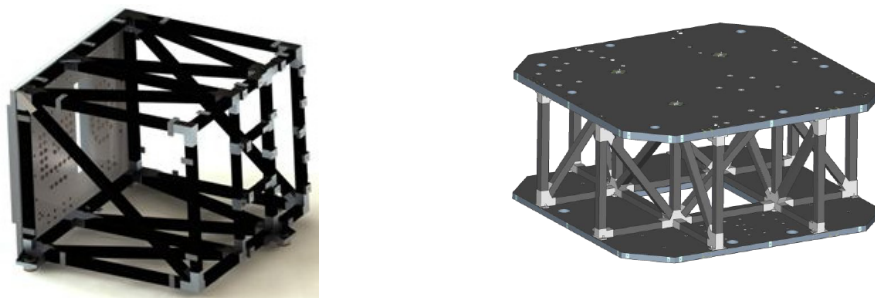


Рис. 1. Терморазмеростабильные конструкции платформ ферменного типа с углепластиковыми плитами

Для изготовления конструкционного материала плиты используется углепластиковая лента, состоящая из матрицы высокопрочного угольного наполнителя фирмы TAIRYFIL (Англия) марки TC 36S-12K и эпоксидного связующего марки ЭДТ-10 ОСТ 92-0957. Технология изготовления углепластиковой ленты отработана для изделий космического назначения [1]. Из лент препрега поочередно выкладываются слои пакетов конструкционного материала до набора требуемой технологической толщины плиты с учетом припуска на ее механическую обработку. В одном пакете композиционного материала плиты используется четырехслойная схема армирования лентами углепластика, имеющего 30% слоев в продольном (0°) и 30% в поперечном (90°) направлениях с толщиной 0,24 мм каждый и по 20% в диагональном направлении ($\pm 45^\circ$) толщиной 0,16 мм. Количество пакетов может быть скорректировано после определения толщины слоя на образцах. В рассмотренном случае количество пакетов композиционного материала плиты с приведенной схемой армирования каждого слоя по ее толщине составляло 16.

Для определения механических свойств композиционного материала плиты применяли расчетно-экспериментальные методы [9-11]. Величину продольного модуля упругости монослоя углепластиковой ленты (вдоль волокон) $E_x = 150$ ГПа считали известной по экспериментальным данным испытаний ее образцов, а поперечные модули упругости определяли по формуле, приведенной в работе [4]

$$E_y = E_z = \frac{E_g E_c}{E_g V_c + E_c V_g} = 8,1 \text{ ГПа}, \quad (1)$$

где $E_g = 250$ ГПа – модуль упругости волокна; $E_c = 2,5$ ГПа – модуль упругости эпоксидного связующего; $V_g = 0,7$ – объемная доля волокон; $V_c = 0,3$ – объемная доля эпоксидного связующего.

Модуль упругости для деформаций сдвига $G_{yz} = 7,0$ ГПа и коэффициент Пуассона $\mu_{yz} = 0,22$ соответствуют экспериментальным величинам для образцов углепластиковой ленты с плотностью 1490 кг/м^3 . Предел прочности однонаправленного углепластика на разрыв составляет 900 МПа.

Для многослойной плиты из углепластиковых лент модули упругости в плоскости пакета могут быть определены численно по правилу смесей

$$E^* = \sum E_i V_i, \quad (2)$$

где E_i и V_i – модуль упругости и объемная доля монослоев каждого направления в пакете.

Для данного вида углепластиковых лент величины модули упругости в двух взаимно перпендикулярных направлениях укладки ортогональных волокон вычислены без учета диагональных слоев и отнесены ко всей толщине композита в соответствии с методикой работы [4]

$$E_x^* = E_y^* = E_x V_x + E_y V_y = 47,44 \text{ ГПа}, \quad (3)$$

где $V_x = V_y = 0,3$ – объемные доли продольных и поперечных слоев.

Для определения модулей упругости и коэффициентов Пуассона углепластиковой ленты с учетом схемы армирования диагональных слоев проведен расчет их жесткости в продольном направлении (поочередно в направлении осей X и Y) совместно с поперечными слоями (рис. 2а, в). Из анализа условий статического равновесия элементарного объема углепластиковой ленты для заданных величин распределения погонных усилий (рис. 2б, г), следует, что они равны между собой, а соответствующие им напряжения обратно пропорциональны толщине этих слоев. Так как поперечных слоев ленты в 1,5 раза больше, чем диагональных одного направления, то напряжения в ее диагональных слоях в 1,5 раза больше, чем в поперечных.

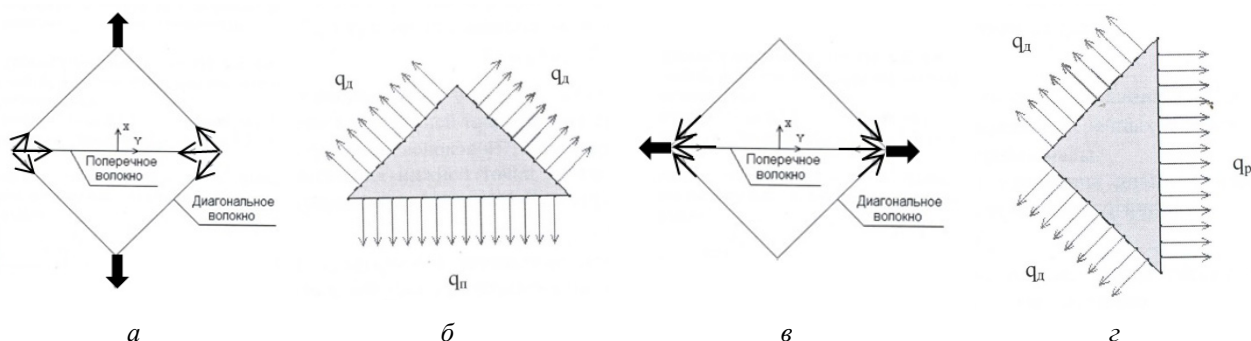


Рис. 2. Направление силовых линий в волокнах углепластика (а, в); погонные усилия для разных слоев углепластиковой ленты (б, г): q_d - в диагональных волокнах; q_n - в поперечных волокнах; q_p - приведенная величина в продольном направлении от усилий в поперечных и диагональных волокнах

Деформация волокон для одной четвертой элементарного объема углепластиковой ленты при силовом нагружении (рис.2) показана на рис. 3. Если в соответствии с рис. 3а, деформационное сокращение длины поперечных волокон принять за δ_n , то удлинение диагональных волокон может быть определено как $\delta_d = 1,5 \times \sqrt{2} \times \delta_n$, так как напряжения в них в 1,5 раза больше и их длина в $\sqrt{2}$ раза больше. При этом вертикальное перемещение нижней точки δ_1 за счет сжатия поперечных волокон равно δ_n поскольку наклон диагональных волокон составляет 45° , а перемещения частиц углепластика малы. Перемещения нижней точки за счет удлинения диагональных волокон проиллюстрировано на рис. 3б и определено аналогично $\delta_2 = \sqrt{2} \times \delta_d = 3\delta_n$. Суммарное перемещение нижней части рассматриваемого элементарного объема углепластиковой ленты под действием результирующего усилия q_r равно

$$\delta_c = \delta_1 + \delta_2 = \delta_n + 3\delta_n = 4\delta_n \quad (4)$$

В свою очередь, продольные волокна под действием продольного усилия, равного q_p , деформируются на величину δ_n , т.е. в четыре раза меньше, чем фрагмент из поперечных и диагональных волокон.

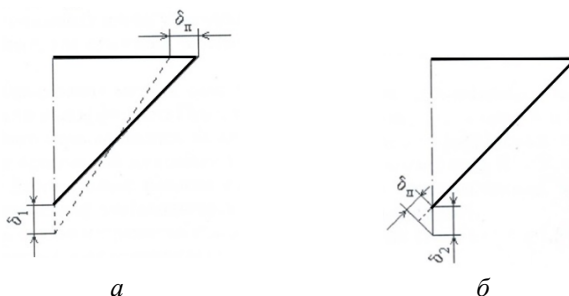


Рис.3. Схема удлинения поперечных (а) и диагональных (б) волокон части элементарного объема углепластиковой ленты при силовом нагружении

Ввиду неразрывности, перемещения нижней точки, элементарного объема углепластиковой ленты (рис. 3), как за счет деформации продольных волокон, так и за счет диагональных с поперечными, одинаковы. Таким образом, при единичном продольном удлинении, поперечное удлинение будет в четыре раза меньше, а значит коэффициенты Пуассона $\mu_{xy} = \mu_{yx} = 0,25$. Продольное погонное усилие, воспринимаемое диагональными с поперечными волокнами, также будет в четыре раза меньше, чем воспринимаемое продольными волокнами, а значит суммарная продольная, а также поперечная жесткость составляет

$$E_{x_\Sigma} = E_{y_\Sigma} = (1 + \mu_{xy}) \times E_x^* \approx 59,3 \text{ ГПа}$$

Знак « \approx » в данной формуле означает, что при расчете диагональных слоев не учитывалась сдвиговая жесткость смолы. Она учтена косвенно, поскольку жесткость диагональных слоев учитывалась, беря за основу жесткость ортотропного композита, где сдвиговая жесткость смолы учтена. Во всяком случае считали, что ее доля мала.

Для определения модуля сдвига G_{xy} в плоскости углепластиковой ленты применяли вышеизложенный подход для вычисления значений нормального модуля упругости E_{45} и коэффициента Пуассона μ_{45} под углом

45° к осям X и Y. Диагональные волокна считались ортогональными и их было в элементарном объеме ленты по 20%, а количество ортогональных к диагональным составляло по 30%.

В этом случае напряжения в диагональных слоях будут в 1,5 раза меньше, чем в поперечных, а их удлинение составит $\delta_d = \sqrt{2}/1,5 \times \delta_{\Pi}$. Перемещение нижней точки элементарного объема углепластиковой ленты за счет этих напряжений составит $\delta_2 = 2/1,5 \times \delta_{\Pi} = 1,33 \times \delta_{\Pi}$, а с учетом сокращения поперечных слоев будет равно

$$\delta_c = \delta_1 + \delta_2 = \delta_{\Pi} + 1,33\delta_{\Pi} = 2,33\delta_{\Pi}.$$

Расчетные величины коэффициента Пуассона μ_{45} и модуля упругости E_{45} определены формулами

$$\mu_{45} = \delta_{\Pi}/2,33\delta_{\Pi} = 0,429; E_{45} = (1 + \mu_{45}) \times E_x^*/1,5 = 45,5 \text{ ГПа}.$$

для вычисления модуля сдвига углепластиковой ленты

$$G_{xy} = E_{45}/2(1 + \mu_{45}) = 15,9 \text{ ГПа}.$$

Приведенные упругие характеристики материала многослойной композитной плиты на основе угольных волокон марки ТС 36S-12K и эпоксидного связующего марки ЭДТ-10 ОСТ 92-0957 для рассмотренной выше схемы армирования определены (табл. 1) как конструктивно-ортотропные с учетом влияния диагональных слоев углепластиковых лент в плоскости XOY пакета углепластика.

Таблица 1

Эффективные упругие характеристики модели материала многослойной композитной плиты

$E_x, \text{ ГПа}$	$E_y, \text{ ГПа}$	$E_z, \text{ ГПа}$	$G_{xy}, \text{ ГПа}$	$G_{yz}, \text{ ГПа}$	$G_{zx}, \text{ ГПа}$	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{zx}
59,3	59,3	8,1	15,9	7,0	7,0	0,25	0,22	0,25

Возможности существующих видов расчета (аналитический, полуаналитический, численный) показывают, что адекватную методику для определения динамических характеристик тонкостенных конструкций, состоящих из множества неоднородных слоев композиционных материалов с известными физико-механическими свойствами можно получить только на основе численных методов [9-11]. Использование метода конечных элементов удовлетворяет всем требованиям для решения краевых задач данного типа. Однако для получения корректных результатов при его использовании необходимо создавать адекватные дискретные модели исследуемых объектов из конечных элементов (КЭ) специального вида, которые отражают неоднородные конструктивно-ортотропные свойства слоев композитных материалов и позволяют многократно снизить размерность задачи. Другой путь - использовать КЭ аппроксимации эквивалентного упругого слоя, для которого численно или аналитически должны быть определены анизотропные жесткостные характеристики.

В данной работе в качестве имитационной модели плиты с описанной выше схемой армирования композиционного материала с плотностью 1490 кг/м³ выбран ее прототип-аналог прямоугольной формы с линейными размерами 710 мм x 445 мм x 12,8 мм без технологических отверстий. Базис осей декартовой системы координат X и Y определен в центре масс плоскости максимальных размеров плиты.

Для сравнительного анализа методов численного определения динамических характеристик многослойных углепластиковых размеростабильных плит по экспериментально-расчетным данным физико-механических свойств композиционного материала разработаны различные расчетные схемы модели плиты. Приближенную динамическую модель пластины с эквивалентными ортотропными характеристиками материала упругого слоя (табл. 1) и две уточненные модели с угловыми аппроксимациями направлений армирования слоев ленты углепластика и упругими трансверсально-изотропными свойствами (табл. 2). В данной модели материала поверхность изотропии ZOY (рис.4а) выбрана ортогональной армирующим волокнам, которые направлены по оси X. Матрица упругих характеристик модели материала является симметричной и определена пятью независимыми упругими постоянными.

В уточненной модели плиты, каждый углепластиковый слой ленты конструкции ее материала разделялся на четыре слоя согласно заявленной схеме армирования. Этот подход применялся для учета направлений ортотропных свойств множества пакетов слоев используемого материала.

Таблица 2

Эффективные упругие константы углепластиковой ленты на основе угольных волокон марки ТС 36S-12K и эпоксидного связующего марки ЭДТ-10 ОСТ 92-0957

$E_x, \text{ ГПа}$	$E_y, \text{ ГПа}$	$E_z, \text{ ГПа}$	$G_{xy}, \text{ ГПа}$	$G_{yz}, \text{ ГПа}$	$G_{zx}, \text{ ГПа}$	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{zx}
150,0	8,1	8,1	15,9	7,0	15,9	0,25	0,22	0,25

Для каждой разделенной части создавалась своя система координат, в которой ось X - совпадала с нулевым направлением в соответствии со схемой армирования, ось Y – перпендикулярна оси X и лежит в

плоскости монослоя углепластика, ось Z – перпендикулярна плоскостям XU . В предложенной модели сделаны следующие предположения: - все слои композиционного материала углепластика являются линейно упругими; - при деформировании плиты имеет место жесткая связь между соседними слоями; - имеет место однородность величин компонент тензора напряжений в каждом слое углепластика.

Для разработанных приближенной и уточненных динамических моделей слоистой структуры композитной плиты на основе метода конечных элементов [10], дискретная форма системы уравнений собственных колебаний с главными граничными условиями имеет вид

$$\left([M]^{-1} [K] - \omega^2 [E] \right) \{W\} = 0; \quad (5)$$

$$\{W\}_{S=S_1} = \{W_1\}, \quad (6)$$

где $[M]$ - матрица масс системы элементов; $[K]$ - матрица жесткости системы элементов; $[E]$ - единичная матрица; ω - собственная частота; $\{W\}$ - вектор узловых перемещений системы; $\{W_1\}$ - кинематические ограничения на границе S_1 . Собственные числа $\lambda = \omega^2$ матрицы $[M]^{-1}[K]$ системы уравнений (5) с наложенными ограничениями для вектора $\{W_1\}$ в форме (6) характеризуют спектр собственных частот системы.

Для проведения модального анализа приближенной и уточненных моделей композитной плиты заданных размеров с кинематическим опиранием на двух противоположных сторонах (рис. 4а) использовали систему инженерного анализа ANSYS v12.1 [11].

В уточненных моделях дискретизацию тела по толщине пластины не проводили. Для двух расчетных схем использовали восьмиузловые КЭ: - многослойный пластинчатый, SHELL181; - твердотельный КЭ, SOLSH190, разработанный для моделирования композиционных многослойных оболочек типа “сендвич”. В каждом КЭ дискретной модели плиты учитывали схему армирования 64-х однородных слоев однонаправленного углепластика в эпоксидной основе (рис.4б). Направление слоев – 16 x (0°, 90°, 45°, -45°) от оси X . Топологическое расположение 16 слоев в КЭ SOLSH190 и SHELL181 по толщине пластины $16 \times (0.24 + 0.24 + 0.16 + 0.16) = 12,8$ мм соответствует ее технологическому проектированию с заданной схемой армирования.

Для приближенной модели плиты четырехслойные пакеты из углепластиковых лент аппроксимировали отдельными твердотельными КЭ SOLSH190. Количество данных КЭ по толщине пластины равнялось 16. Физико-механические свойства материала каждого КЭ соответствовало приведенным ортотропным упругим характеристикам пакета 4 слоев углепластиковых лент (табл. 1).

Количество КЭ SOLSH190 и SHELL181 в плоскости пластины для обеих дискретных моделей задавали одинаковым (рис. 4а). Разработанные конечно-элементные модели плиты (рис.4б) содержат 315 / 5335 узлов и 280 / 4480 элементов соответственно для сетки из пластинчатых (SHELL181) и твердотельных (SOLSH190) КЭ.

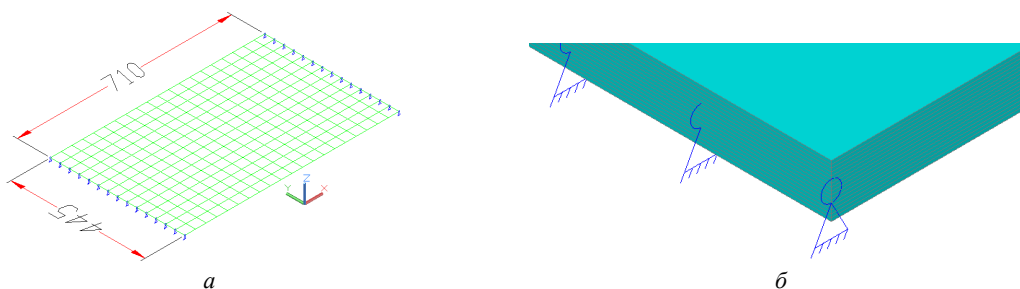


Рис. 4. Узлы сетки КЭ на поверхности пластины и схема ее кинематических опор (а). Дискретизация твердотельными КЭ SOLSH190 по толщине модели пластины (б)

Результаты модального анализа двух уточненных моделей многослойной углепластиковой пластины представлены значениями 6 собственных частот (табл. 3) и картинами трех типичных форм ее колебаний (рис. 5). Из анализа полученных данных следует хорошее совпадение численных расчетов при использовании как пластинчатых, так и твердотельных КЭ. Погрешность расчета не превышает 0.7%.

Из результатов численных расчетов динамических характеристик приближенной модели углепластиковой плиты (табл. 4) видно, что значения собственных частот отличаются на 3% - 14% от данных для уточненной модели. Из этого следует вывод, что эффективнее использовать методики прямого моделирования многослойных композиционных материалов углепластиковых пластин конструкции сканера космического аппарата описанных выше.

Таблица 3

**Результаты численного эксперимента для уточненных моделей
углепластиковой пластины с применением КЭ SOLSH190 и SHELL181**

№	Собственная частота, Гц		Погрешность расчета, %
	КЭ SHELL181	КЭ SOLSH190	
1	78.52	78.46	0.076
2	180.40	180.12	0.154
3	316.77	315.81	0.302
4	452.15	450.72	0.317
5	572.55	572.07	0.085
6	720.40	715.50	0.682

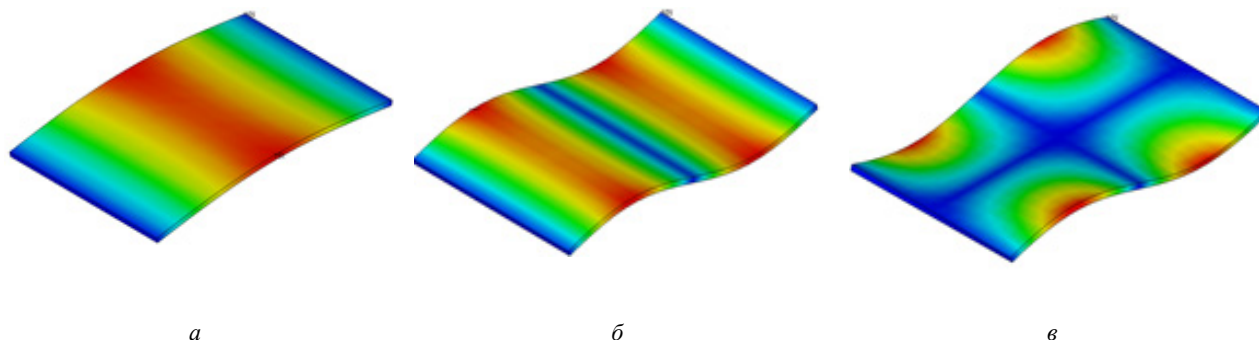


Рис. 5. Первая (а), третья (б) и четвертая (в) формы собственных колебаний углепластиковой пластины

Таблица 4

**Результаты численного эксперимента для уточненной и приближенной моделей
углепластиковой пластины с применением КЭ SOLSH190**

№	Собственная частота, Гц		Погрешность расчета, %
	Уточненная модель плиты с упругими свойствами углепластиковой ленты	Приближенная модель плиты с эквивалентными упругими свойствами пакета слоев	
1	78.52	73.57	6.3
2	180.40	150.51	13.8
3	316.77	301.88	4.7
4	452.15	411.46	9.0
5	572.55	539.91	5.7
6	720.40	699.51	2.9

Выводы

1. Для определения рациональных методик модального анализа рассмотрены три типа конечно-элементных аппроксимаций имитационной модели композитной плиты с различными подходами в представлении упругих свойств материала углепластиковой ленты на основе угольных волокон марки ТС 36S-12K и эпоксидного связующего марки ЭДТ-10 ОСТ 92-0957.
2. Приведенная в работе методика позволяет на основе расчетно-экспериментальных данных физических свойств углепластиковой ленты определить эквивалентные ортотропные упругие характеристики пакета слоев модели материала пластины с различными схемами армирования.
3. Показана эффективность применения методик прямого моделирования многослойных композиционных материалов углепластиковых пластин конструкции сканера космического аппарата с применением конечных элементов SOLSH190 и SHELL181 системы инженерных расчетов ANSYS.

Визначення динамічних характеристик багатошарових вуглепластикових пластин конструкції сканера високої здатності

В.М. Маслей, М.Г. Кришук

Анотація. Представлені результати порівняльного аналізу чисельного визначення динамічних характеристик багатошарових вуглепластикових пластин конструкції сканера космічного апарату за різними типами скінченно-елементних апроксимацій фізико-механічних властивостей композитного матеріалу. Використовуючи топологічну структуру будови армуючих шарів матеріалу в площині пакета пластин, експериментальні дані для пружних і масових характеристик однорідних вуглепластикових волокон, визначені еквівалентні конструктивно-ортотропні жорсткісні і пружні характеристики матеріалу композитних пластин.

Ключові слова: багатошарові вуглепластикові пластини, композиційні матеріали, методика розрахунку, скінченно-елементні апроксимації, пружні та масові характеристики, проектування, сканер

Determination of dynamic characteristics of multi-layer carbon plastic structures of high-resolution scanner

V. Masley, N. Kryshchuk

Abstract. The comparative analysis results for the numerical determination of the dynamic characteristics of multi-layer carbon-fiber plates of the space vehicle scanner design by various types of finite element approximation of the physico-mechanical properties of the composite material are presented. Using the topological structure of the construction of reinforcing layers material in the plate package plane, experimental data for the elastic and mass characteristics of homogeneous carbon-fiber fibers, equivalent structural and orthotropic stiffness and elastic characteristics of the material of composite plates are determined.

Keywords: Multilayer carbon fiber plates, composite materials, calculation technique, finite element approximation, elastic and mass characteristics, design, scanner

References

1. Degtjarev, A.V., Kovalenko, V.A. and Potapov, A.V (2012), Primenenie kompozicionnyh materialov pri sozdanii perspektivnyh obrazcov raketnoj tehniki. Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija, no 2 (8), pp.34-38
2. Konjuhov, S.N. (2001), *Rakety i kosmicheskie apparaty konstruktorskogo bjuro «Juzhnoe»*, in Konjuhov, S. N. (ed.), OOO RA «Tandem-U», OOO «Kolor-Graf», Dnepropetrovsk, Ukraina.
3. Abibov, A.L. (1975), *Kompozicionnye materialy v konstrukcijah letatel'nyh apparatov*, in Abibova A.L. (ed.), Mashinostroenie, Moskva, RF.
4. Karpinosa, D.M. (1985), *Kompozicionnye materialy*. Spravochnik, in Karpinosa, D.M. (ed.), Naukova dumka, Kiev, Ukraina.
5. ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division Noordwijk (2012), *ECSS-E-ST-10-03C: Space engineering Testing*, The Netherlands.
6. Requirements & Standards Division Noordwijk (2013), *ECSS-E-HB-32-26A: Space engineering Spacecraft mechanical loads analysis handbook*, The Netherlands.
7. General environmental verification standard for GSFC flight programs and projects (2013), NASA goddard space flight center
8. Nacionalnyj standart RF (2015), *GOST R 56514-2015: Normy prochnosti avtomaticheskix kosmicheskix apparatov*, Moscow, Russia, 24p.
9. Babenko, A.C., Bobyr M.I., Bojko S.L. and Boronko O.O. (2009), *Teoriya pruzhnosti*. Chastina 1. Pidruchnik, Osnova, Kyiv Ukraina.
10. Bathe, K.J. and Wilson E.L. (1976), *Numerical methods in finite element analysis*, Prentice Hall.
11. "ANSYS Structural Analysis Guide ANSYS Release 12.1" (2009), available at : www.ansys.com/