

УДК 629.76:531.3: 534.134

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ И СЛУЧАЙНЫХ ВИБРАЦИЙ ПАНЕЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ СКАНЕРА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ЭТАПЕ ВЫВЕДЕНИЯ

Маслей¹ В.Н., Кришук² Н.Г., Цыбенко² А.С.

1 - ГКБ «Южное», г. Днепр, Украина

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

***Аннотация:** Представлены результаты численного определения динамических характеристик и напряженно-деформированного состояния конструкции панельной платформы сканера для космического аппарата при квазистатических перегрузках, гармонических и случайных вибрациях на этапе выведения на орбиту. В качестве имитационной модели исследуемой системы выбрана типовая структура композитной панели с известной схемой расположения ячеек сот и армирующих слоев материала углепластиковой ленты для верхних и нижних пластин, труб, кронштейнов с известными механическими свойствами и схемой размещения оптических приборов с заданными массовыми характеристиками. Для решения задач динамики использован метод конечных элементов в математических постановках задач модального, гармонического и спектрального анализа. Определены собственные частоты и формы колебаний панельной платформы сканера. Для исследуемых режимов нагружений панельной платформы сканера определены амплитудно-частотные характеристики и параметры напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов, отвечающих этапу выведения.*

***Ключевые слова:** композиционные материалы, сотованель, сканер, гармонические и случайные вибрации, численные расчеты, упругие и массовые характеристики, напряженно-деформированное состояние*

Композитные конструкции с сотовым наполнителем находят применение в качестве силовых элементов панельных платформ, оболочечных отсеков, профилированных агрегатов космических аппаратов и т. п. [1, 2]. Их основные достоинства, - высокая прочность и жесткость при относительно небольшой массе.

При разработке композитных конструкций панельных платформ для сканера космического аппарата (СКА) [3, 4] одной из важнейших задач является обеспечение их прочности [5-7]. Варианты компоновки и типового исполнения пластин панели из слоистых лент композиционного материала [3, 4] и ячеек сотового наполнителя из алюминиевых сплавов в случае вибрационных и термических нагружений, импульсных и акустических воздействий влияют на показатели прочности на каждом этапе жизненного цикла изделий данного типа. Это предопределяет необходимость оценки несущей способности композитных панельных платформ СКА, в том числе и для условий гармонических и случайных вибраций при выведении на орбиту [8-11].

Типовая платформа СКА, состоит из сотованели с закладными трехмерными элементами крепежа и выступающими кронштейнами. На сотованели размещаются навесные элементы технологического оборудования (сканер, оптические приборы, магнитометр) (рис.1а). Сотованель представляет собой трехслойную составную конструкцию, состоящей из двух

композитных пластин с закладными деталями (трубы, кронштейны, фитинги и втулки), сотового заполнителя, расположенного между ними, окантовочных углепластиковых труб и соединительных деталей. Панель крепится к адаптеру с помощью трех опор.

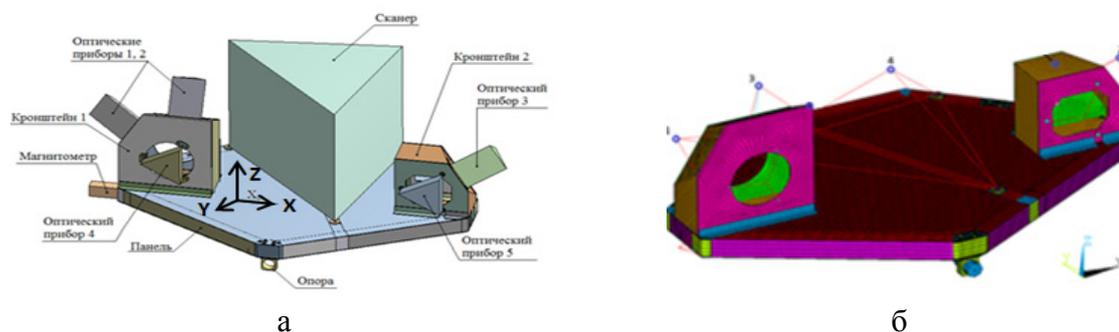


Рис.1. Имитационная (а) и дискретная (б) модели панели СКА с технологическим оборудованием. Центры масс оптических приборов обозначены маркерами 1,2,3,4 (б)

Для изготовления конструкционного материала пластин используется углепластиковая лента с известными трансверсально-изотропными механическими характеристиками (табл.1). Технология изготовления углепластиковой ленты отработана для изделий космического назначения [3, 4]. Из лент препрега поочередно выкладываются слои пакетов конструкционного материала с заданной схемой армирования до набора требуемой технологической толщины пластин с учетом припуска на ее механическую обработку.

Композитные пластины панели жестко соединены клеем с сотовым заполнителем 5056-6-23 из алюминиевой фольги (модуль Юнга - 69ГПа, коэффициент Пуассона - 0,36, удельная плотность - 2700кг/м³) [2, 10]. Ядро ячейки составляет 6 мм, толщина стенки - 0.023 мм, для контактирующих граней - 0.046 мм. Для сплава ВТ-6 конструкционных элементов (фитинги, втулки) сотопанели принят модуль упругости - 115 ГПа, коэффициент Пуассона - 0,37, удельная плотность - 4450кг/м³ [10].

Таблица 1.

Механические характеристики композиционного материала, углепластиковой ленты на основе угольных волокон марки ТС 36S-12К и эпоксидного связующего марки ЭДТ-10 ОСТ 92-0957 [4]

$E_x, ГПа$	$E_y, ГПа$	$E_z, ГПа$	$G_{xy}, ГПа$	$G_{yz}, ГПа$	$G_{zx}, ГПа$	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{zx}	$\rho, кг / м^3$
150,0	8,1	8,1	15,9	0,7	15,9	0,25	0,22	0,25	1500

Основным требованием к условиям механического деформирования конструктивных элементов панельной платформы СКА и приборов специального назначения при гармонических и случайных вибрациях на этапе вывода на орбиту, обусловленных работой двигателей и технических систем ракеты-носителя является обеспечение работы материалов в области упругих деформаций [4, 10].

С целью определения динамической нагруженности панельной платформы СКА разработана методика и проведены поэтапные численные расчеты амплитудно-частотных характеристик и напряженно-деформированного состояния их конструктивных элементов.

Для разработанной имитационной модели сотопанели СКА (пластины, трубы, кронштейны, фитинги и втулки, сотовый заполнитель) выбор способа ее геометрической идеализации предопределен полнотой числовых данных для ее конструкции и навесных элементов технологического оборудования (оптические приборы, сканер, магнитометр), исходных данных по видам нагружения, типам кинематических и жесткостных связей сопряженных тел, структуре армирования пластин из семи слоев углепластиковой ленты

композиционного материала, геометрии построения ячеек алюминиевых сот 5056-6-23, формы соединителей и втулок из сплава ВТ-6, физико-механических и прочностных свойств указанных материалов.

Для конструкции композитной панельной платформы СКА с технологическим оборудованием (рис. 1а) построена в системе инженерного анализа ANSYS APDL [12] конечно-элементная модель (рис.1б), состоящая из стержневых (BEAM188), многослойных пластинчатых (SHELL181), объемных (SOLSH190) КЭ. Контактные КЭ TARGE170 и CONTA173 использовали для сопряжения степеней свободы объемных и пластинчатых КЭ дискретных тел различной пространственной конфигурации (фитингов, втулок, пластин) путем создания контактных пар «узел – поверхность». Навесные элементы технологического оборудования СКА, аппроксимировали сосредоточенными массами, используя КЭ MASS21. Жесткими связями MPC184 соединяли массовые эквиваленты: - оптических приборов и магнитометра с кронштейнами; - сканера с композитной пластиной (рис. 1). Количество узлов сетки - 167328, количество элементов – 214212. Расчетная масса имитационной модели панельной платформы СКА с навесным оборудованием составляла 154.6 кг.

Режимы синусоидальной вибрации панельной платформы СКА определяли по данным расчёта нагрузок ГКБ «Южное» для динамических процессов деформирования твердых тел с преобразованием результатов к эквивалентным параметрам для продольных и поперечных амплитуд и интервала частот [5-100] Гц возбуждения до соответствующих гармоник [9]. Параметры случайных вибраций в интервале [20-2000] Гц частот возбуждения конструкции СКА при полете в составе ракеты-носителя представлены ГКБ «Южное» дискретными значениями спектральной плотности мощности для трех взаимноортогональных направлений, которые являлись статистическим представлением истории нагружения. Нагружение панели СКА для рассмотренных спектров вибрационного возбуждения задавали в трех опорах ее крепления панели (рис. 1а) к адаптеру.

Уравнения динамического равновесия вибронгруженной панельной платформы СКА представили в полудискретной форме МКЭ [11, 12]:

$$\begin{bmatrix} [M_{xx}] & [M_{xy}] \\ [M_{yx}] & [M_{yy}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}(t) \\ \ddot{Y}(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{xx}] & [C_{xy}] \\ [C_{yx}] & [C_{yy}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}(t) \\ \dot{Y}(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{xx}] & [K_{xy}] \\ [K_{yx}] & [K_{yy}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X(t) \\ Y(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

где t - время; $\{X(t)\}, \{\dot{X}(t)\}, \{\ddot{X}(t)\}$ - векторы амплитуд перемещений, скоростей и ускорений в незакрепленных узлах дискретной модели панели; $\{Y(t)\}, \{\dot{Y}(t)\}, \{\ddot{Y}(t)\}$ - векторы амплитуд перемещений, скоростей и ускорений опорных узлов панели с кинематическим возбуждением по соответствующим степеням свободы; $[M], [C], [K]$ - матрицы соответственно масс, демпфирования и жесткости, представленные в блочном виде для векторов узловых неизвестных.

Для вычисления АЧХ и НДС панельной платформы СКА при гармонических и случайных вибрациях осуществляли численные решения системы уравнений (1) в математических постановках задач модального, гармонического и спектрального анализа [6, 12].

На первом этапе решения для интервала частот **5 Гц - 150 Гц** определены в ANSYS APDL [12] динамические характеристики композитной сотопанели СКА с навесным технологическим оборудованием. Установлено, что в частотный диапазон вынужденных гармонических вибраций (**5 Гц - 100 Гц**) попадают три первые собственные частоты **56,7 Гц, 68,6 Гц, 88,3 Гц**. Основные формы колебаний вызваны инерционной реакцией на композитную плиту массивных кронштейнов и размещенных на их сторонах оптических приборов.

На основе модального анализа панели СКА с использованием метода главных координат проведено вычисление АЧХ в частотном диапазоне **5Гц - 100Гц** для принятого 5% рассеяния энергии. Расчетным путем определены зависимости амплитуд компонент векторов перемещений, ускорений и коэффициентов динамичности от частоты гармонических

вibrаций с последующей визуализацией в виде графиков для точек, отмеченных контрольными маркерами в имитационной модели.

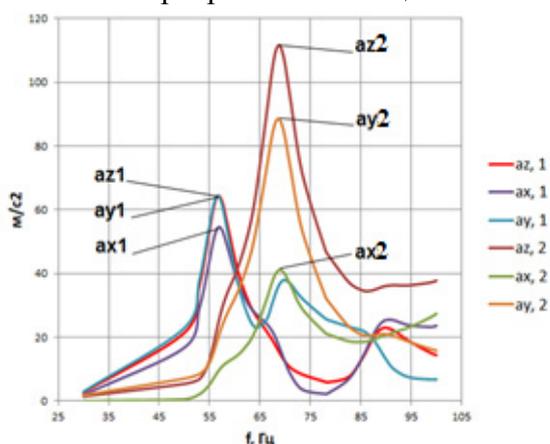


Рис. 2. Амплитуды продольных (az) и поперечных (ax, ay) ускорений с указанием их экстремальных величин для оптических приборов, расположенных на двух кронштейнах (рис.1б) панели при гармонических вибрациях

Для резонансных частот гармонических вибраций панели СКА определены поля амплитуд эквивалентных напряжений по Мизесу, максимальные значения которых не превышают 87,7 МПа в отверстиях углепластиковых пластин и 95,5 МПа в фитингах и втулках на частоте 68,4 Гц.

Для моделирования случайных вибраций использован метод спектральной плотности мощности. Результаты численных экспериментов в ANSYS APDL для данного типа нагружения модели панельной платформы СКА представлены среднеквадратичными значениями (СКЗ) уровня 3σ для перемещений и эквивалентных напряжений Мизеса ее

конструктивных элементов. Установлено, что максимумы СКЗ напряжений 236,1 МПа наблюдаются в кронштейнах из сплава ВТ-6 в области опор навесных элементов. СКЗ напряжений в сотовом заполнителе характеризуется максимумами до 102,3 МПа. В области отверстий для закладных деталей СКЗ напряжений в углепластиковых пластинах имеют выраженные локальные максимумы в области отверстий, которые не превышают 201,6 МПа.

Список литературы

1. Панин В.Ф. Конструкции с сотовым заполнителем / В.Ф. Панин. – М.: Машиностроение, 1982. – 152 с.
2. Иванов А.А. Новое поколение сотовых заполнителей для авиационно-космической техники / А.А. Иванов, С.М. Кашин, В.И. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 436 с.
3. Дегтярев А.В. Применение композиционных материалов при создании перспективных образцов ракетной техники / А.В. Дегтярев, В.А. Коваленко, А.В. Потапов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 2(89). – с. 34 – 38
4. Маслей В.Н. Определение динамических характеристик многослойных углепластиковых пластин конструкции сканера высокого разрешения / В.Н. Маслей, Н.Г. Кришук // Mechanics and Advanced Technologies, 2017, №80, - с. 45-51
5. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В двух частях. Новосибирск: Наука. 2005. Часть 1: Критерии прочности и ресурса – 494 с. Часть 2: Обоснование ресурса и безопасности – 610 с.
6. “ECSS-E-ST-32-10C. Space engineering Structural factors of safety for spaceflight hardware” (2009), available at : http://everyspec.com/ESA/ECSS-E-ST-32-10C_REV-1_47761/.
7. “GOST R 56514-2015. Normy prochnosti avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov” (2015), available at : http://allgosts.ru/49/140/gost_r_56514-2015.pdf
8. “ECSS-E-HB-32-26A. Space engineering Spacecraft mechanical loads analysis handbook” (2013), available at : http://www.vibrationdata.com/tutorials2/ECSS-E-HB-32-26A_19February2013.pdf
9. “ECSS-E-ST-10-03C. Space engineering Testing” (2012), available at : <http://everyspec.com/ESA/download.php?spec=ECSS-E-10-02C.047796.pdf>
10. Троценко В.Т. Прочность материалов и конструкций / В.Т. Троценко, Р.И. Курият, А.А. Лебедев и др. // Киев: Академперіодика, 2005, - 1086 с.
11. Bathe K.J. Numerical methods in finite element analysis / K.J. Bathe, E.L. Wilson // Prentice Hall. – 1976
12. “ANSYS Structural Analysis Guide ANSYS Release 12.1.” (2009) available at : www.ansys.com/