

УДК 004.94 : 629.78

Цыбенко А.С., д.т.н. проф.; Рассамакін Б.М., к.т.н.; Рыбалка А.А.
КПІ ім. Ігоря Сикорського, г. Київ, Україна

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ НАНОСПУТНИКА POLYITAN-2 ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ПЕРЕГРУЗКАХ НА ЭТАПЕ ВЫВЕДЕНИЯ

Tsybenko A., Rassamakin B., Rybalka A.
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE NANOSATELLITE POLYITAN-2 UNDER QUASI-STATIC OVERLOAD ON THE STAGE OF ASCENT

Выполнен прочностной анализ наноспутника POLYITAN-2 при квазистатических перегрузках на этапе выведения. Разработана эффективная твердотельная и соответствующая ей конечно-элементная модель наноспутника. С использованием программного комплекса Ansys проведено расчетное исследование напряженно-деформированного состояния наноспутника. Определены коэффициенты запаса прочности, найдены максимальные относительные перемещения конструктивных элементов. Проведен анализ критериев прочности для оценки прочности элементов конструкции наноспутника, выполненных из композиционных материалов. Установлено, что для рассматриваемого варианта исполнения POLYITAN-2 условия прочности и жесткости выполняются.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, наноспутник, прочность, жесткость, коэффициенты запаса прочности, CubeSat.

Введение

Создание космических аппаратов (КА) – весьма длительный, наукоемкий и дорогостоящий процесс, включающий научно-исследовательский, опытно-конструкторский и производственный этапы, с обязательным их соответствием отраслевым стандартам [1,5,6]. В отличие от крупногабаритных КА, для наноспутников (НС) существуют ограничения по срокам проектирования, изготовления, бюджету и штату сотрудников. В этой связи, концепция применения стандартизированных платформ НС и метода сквозного проектирования [2], когда конструирование, расчеты и изготовление КА ведутся с использованием общей 3D модели в единой вычислительной среде, позволяют оперативно вносить изменения в конструкцию и, таким образом, в кратчайшие сроки осуществить разработку НС с необходимыми характеристиками.

Задача обеспечения прочности занимает одно из центральных мест в процессе создания НС. Она включает в себя анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) от максимальных квазистатических перегрузок, гармонических и случайных вибраций, импульсных и акустических нагрузок, а также температуры при транспортировке НС, его выведении и работе на орбите. Согласно [7], при анализе прочности НС от действия квазистатических перегрузок вводится коэффициент безопасности, учитывающий неточности теоретического и экспериментального определения, в том числе и динамический характер действующих нагрузок.

Как правило, НС является достаточно сложным техническим объектом, поэтому при его разработке используется итерационное уточнение принимаемых конструкторско-технологических решений. Вначале рассматривается упрощенная имитационная модель (ИМ) НС, на основе которой отрабатывается компоновка и осуществляется выбор конструкционных материалов элементов НС. Затем, по результатам прочностного и динамического анализа создается уточненная ИМ, более адекватно отражающая функциональные, инерционно-массовые и жесткостные характеристики НС.

Цель исследования – анализ НДС конструктивных элементов POLYITAN-2 на основе рациональной ИМ при квазистатических перегрузках, обусловленных выведением НС на околоземную орбиту.

Постановка задачи

При создании НС POLYITAN-2 негерметичной схемы руководствовались унифицированным форматом CubeSat 2U [8], определяющим концепцию облика НС, его массогабаритные характеристики, тип несущей конструкции и т.п.

Разработанная и являющаяся базовой для метода сквозного проектирования 3D модель НС POLYITAN-2 (рис.1), содержит несущий каркас в форме пространственной рамы (рис. 2а), на которой размещены: научный модуль (рис. 2б), обшивка (рис.2в), электронная платформа (ЭП) (рис.2г), модуль системы ориентации и

стабілізації (СОС) (рис. 2д), антенний блок. Модуль СОС состоит из массивного маховика с электроприводом, управляющей платы и двух кронштейнов, с помощью которых осуществляется крепление к несущему каркасу. ЭП включает пять электронных плат, три аккумуляторных батареи и четыре наборные стойки для сочленения и крепления к несущему каркасу. Габаритные размеры 3D модели POLYTAN-2 - 100×100×227 мм, расчетная масса НС - 1.8 кг.

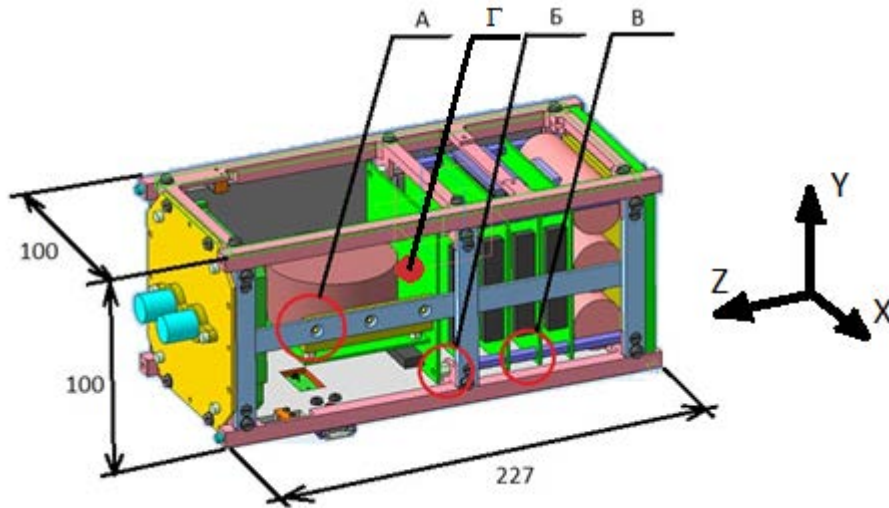


Рис. 1. Геометрическая модель НС POLYTAN-2 без боковых панелей (А – участок крепления кронштейна СОС к перемычкам несущего каркаса; Б – участок крепления ЭП к несущему каркасу; В – несущая стойка ЭП; Г – плата управления СОС)

Материал несущего каркаса и элементов крепления модуля СОС - алюминиевый сплав Д16, антенного модуля и элементов ЭП - алюминиевый сплав АМг6, наборных стоек ЭП - латунь Л63, электронных плат - стеклотекстолит КАСТ-В.

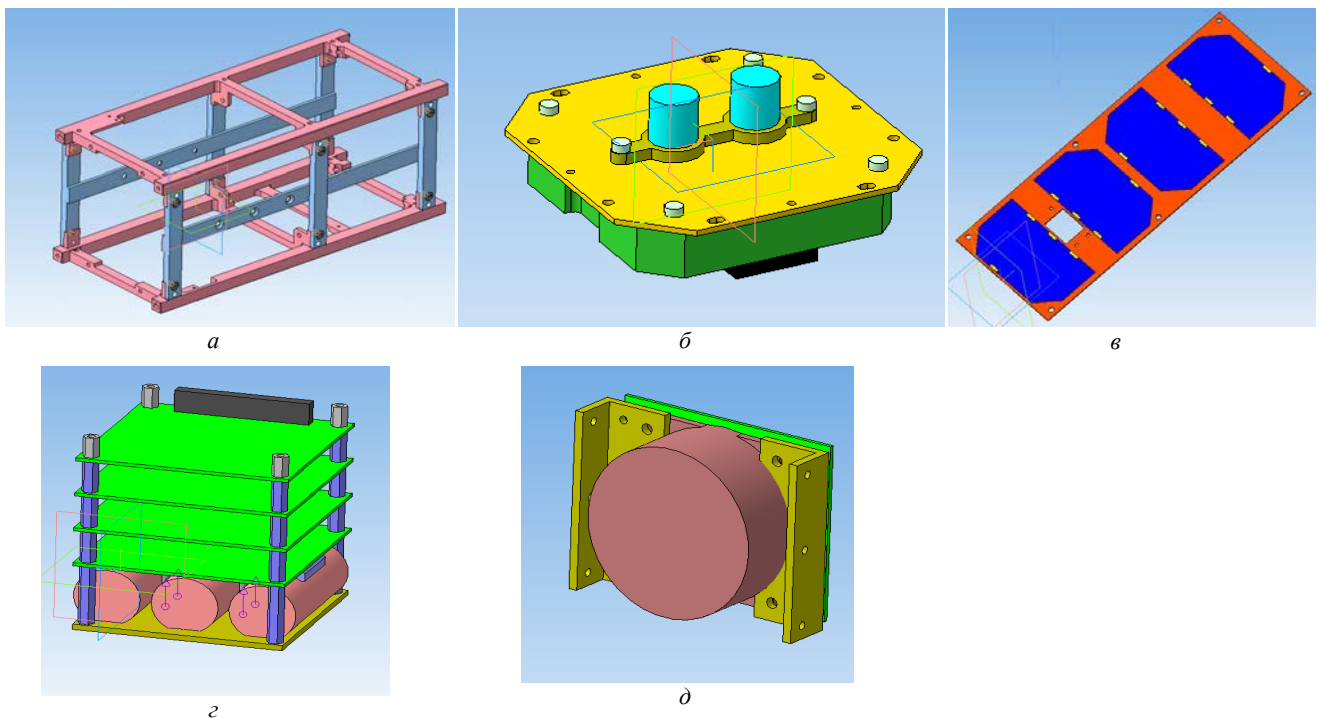


Рис. 2. Основные конструктивные элементы НС POLYTAN-2: а – несущий каркас; б – научный модуль; в – элемент обшивки; г – электронная платформа; д – модуль СОС

Некоторые физико-механические характеристики используемых материалов приведены в табл.1 и табл.2, где: E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала; σ_e – предел прочности; σ_p^e – предел прочности при растяжении; $\sigma_{сж}^e$ – предел прочности при сжатии.

Таблица 1

Физико-механические свойства изотропных конструктивных материалов

| Материал | E , МПа | ν | ρ , кг/м ³ | σ_e , МПа |
|----------|-----------|-------|----------------------------|------------------|
| АМг6 | 71000 | 0.3 | 2640 | 305 |
| Д16 | 72000 | 0.3 | 2770 | 450 |
| Л63 | 116000 | 0.35 | 8440 | 290 |

Таблица 2

Физико-механические свойства анизотропных конструктивных материалов

| Материал | E , МПа | ν | ρ , кг/м ³ | σ_p^e , МПа | $\sigma_{сж}^e$, МПа |
|----------|-----------|-------|----------------------------|--------------------|-----------------------|
| КАСТ-В | 21000 | 0.11 | 1800 | 85 | 130 |

Размещение НС в системе выведения учитывали в ИМ посредством кинематических ограничений, – полагали нулевыми перемещения ($u_x = u_y = u_z = 0$) опорных поверхностей несущего каркаса (рис.3), за исключением продольных ($u_z \neq 0$) для боковых ребер.

Согласно [8], прочность и жесткость НС на этапе выведения должна обеспечиваться при воздействии на него квазистатических перегрузок в направлении трех взаимно перпендикулярных продольной Z и поперечных осей X , Y (рис.3). В соответствии с [4], расчетную величину нагрузки определяли умножением действующего ускорения $a_x = a_y = a_z = 13.0g$ на коэффициент безопасности f . Для рекомендованного $f = 1.25$ [7] величины расчетных ускорений равны $a_x^p = a_y^p = a_z^p = 16.3g$. Следует отметить, что при прочностном анализе электронных плат ЭП, также учитывали коэффициент перегрузки $k = 1.25$ [7].

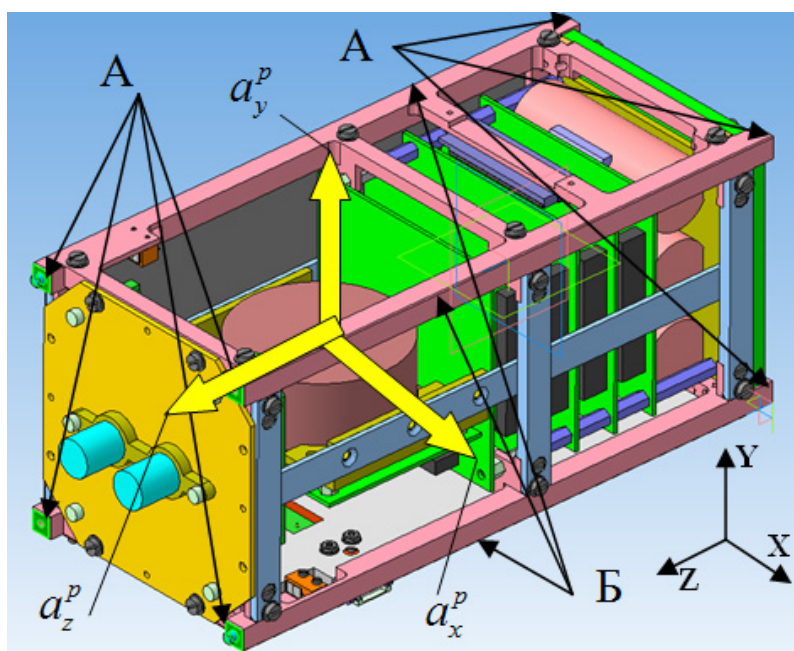


Рис. 3. Варианты нагружения POLYITAN-2 и опорные поверхности несущего каркаса: А – торцовые; Б– боковые

Имитационная модель НС POLYTAN-2

3D модель НС POLYTAN-2 (рис.1) содержит более 100-та конструктивных элементов, полный учет которых в конечно-элементном анализе приводит к неоправданному увеличению размерности задачи. В этой связи, расчетная 3D модель НС была рационализирована (рис.4в), - убраны из рассмотрения элементы, вкладом которых в обеспечение статической прочности и жесткости конструкции НС можно пренебречь: обшивка, элементы крепежа, датчики солнца, магнитометр и т.д. Следует отметить, что массы исключенных из рассмотрения обшивки, датчиков солнца и магнитометра учитывали при последующем динамическом анализе НС посредством равномерного “размазывания” по соответствующим поверхностям контакта с несущим каркасом. Распределенную массу крепежа добавили к плотности материала несущего каркаса.

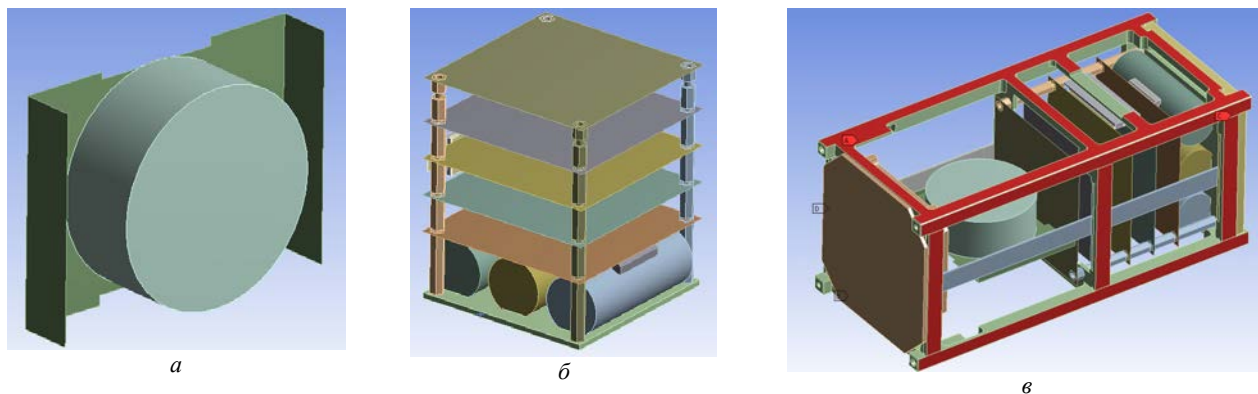


Рис. 4. Рациональные геометрические модели: системы ориентации – а; электронной платформы – б; НС POLYTAN-2 – в

На основе 3D имитации НС построили конечно-элементную модель (КЭМ) POLYTAN-2 в системе ANSYS [4]. При аппроксимации каркаса, научного модуля, наборных стоек ЭП, аккумуляторов и антенного модуля использовали 20-ти узловые гексагональные конечные элементы (КЭ) SOLID186. Для аппроксимации кронштейнов СОС и электронных плат ЭП применяли пластинчатые КЭ SHELL181 с 4-мя слоями по толщине. Сочленение пластинчатых и объемных КЭ осуществляли посредством безмассовых абсолютно жестких связей на основе двухузловых балочных элементов BEAM188. При сопряжении фрагментов дискретных моделей с различной плотностью разбиения однотипными КЭ использовали контактные элементы CONTA174. В результате получили рациональную КЭМ НС, состоящую из 326300 элементов с 1221504 узлами (рис.5).

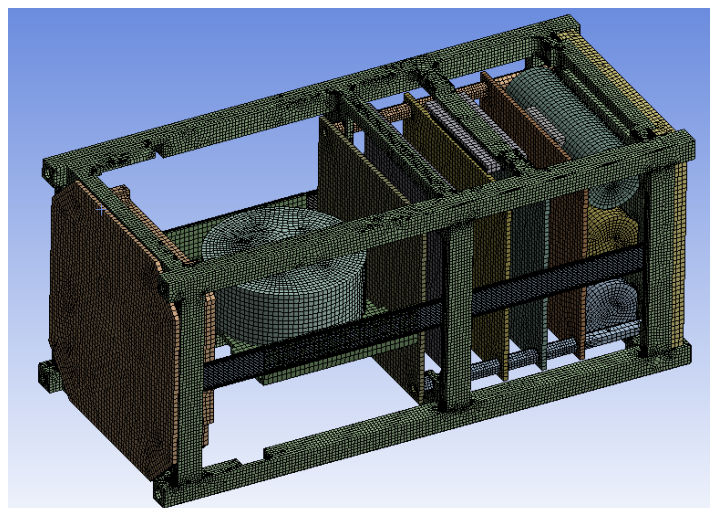


Рис. 5. Конечно-элементная модель НС POLYTAN-2

Прочностной анализ НС POLYTAN-2

При анализе прочности элементов НС, выполненных из изотропных сплавов Д16, АМг6 и Л63, использовали критерий Мизеса [3]. Для стеклотекстолитовых электронных плат провели сравнение результатов, полученных на основе критериев Мизеса, наибольших нормальных напряжений и Писаренко-Лебедева [3].

Соответствующие коэффициенты запаса прочности определяли как:

для металлических элементов

$$\eta = \frac{\sigma^e}{\sigma_y} ; \tag{1}$$

для стеклотекстолита

$$\eta = \min \left\{ \frac{\sigma_p^e}{k\sigma_y^+}, \frac{\sigma_{сж}^e}{k\sigma_y^-} \right\} \tag{2}$$

Стоит отметить, что для нечувствительного к знаку эквивалентных напряжений критерия Мизеса, в (2) использовали только предел прочности на растяжение σ_p^e , так как для стеклотекстолита $\sigma_p^e < \sigma_{сж}^e$ (табл.2). При применении критерия Писаренко-Лебедева необходимо учитывать знак эквивалентных напряжений.

В результате расчетного исследования НДС установили наиболее нагруженные конструктивные элементы PolyItan-2. Наибольшие эквивалентные напряжения $\sigma_y^{max} = 175.86$ МПа при a_x^p имеют место в перемычке несущего каркаса (материал - Д16) в точках крепления кронштейна СОС (рис.6). В свою очередь, в наборной стойке ЭП (материал - Л63) напряжения $\sigma_y^{max} = 11.92$ МПа реализуются при a_x^p в окрестности контакта с центральной платой (рис.2г). В держателе аккумулятора (материал - АМг6) напряжения $\sigma_y^{max} = 3.67$ МПа при a_y^p возникают в точках примыкания к аккумулятору. Коэффициенты запаса прочности для вышеуказанных элементов при рассматриваемых вариантах нагружения НС (a_x^p, a_y^p, a_z^p) приведены в табл.3.

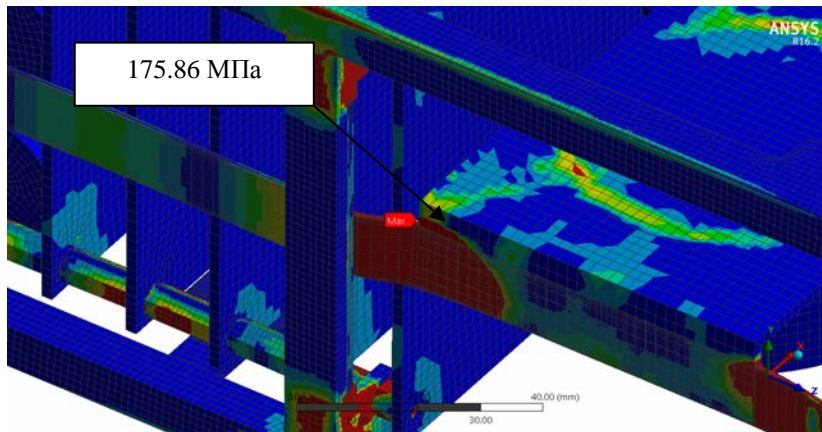


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений в перемычке несущего каркаса на участке крепления кронштейна СОС для варианта нагружения a_x^p

Таблица 3

Величины σ_y^{max} и η_{min} для наиболее нагруженных элементов НС

| Элемент конструкции | a_x^p | | a_y^p | | a_z^p | |
|----------------------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| | σ_y^{max} , МПа | η_{min} | σ_y^{max} , МПа | η_{min} | σ_y^{max} , МПа | η_{min} |
| Перемычка несущего каркаса | 175.86 | 2.56 | 34.46 | 13.06 | 8.83 | 50.96 |
| Держатель аккумуляторов | 9.67 | 31.54 | 9.60 | 31.77 | 19.47 | 15.67 |
| Наборная стойка ЭП | 11.68 | 24.83 | 11.92 | 24.33 | 2.93 | 98.98 |

Величины максимальных эквивалентных напряжений в платах ЭП приведены в табл.4. Сравнительный анализ показал, что наибольшие значения эквивалентных напряжений дает критерий наибольших нормальных напряжений. Установили, что наиболее опасным вариантом нагружения является перегрузка в направлении продольной оси Z, при этом максимальные напряжения $\sigma_y^{max} = 2.34$ МПа возникают в зоне контакта платы с наборной стойкой ЭП.

Таблиця 4

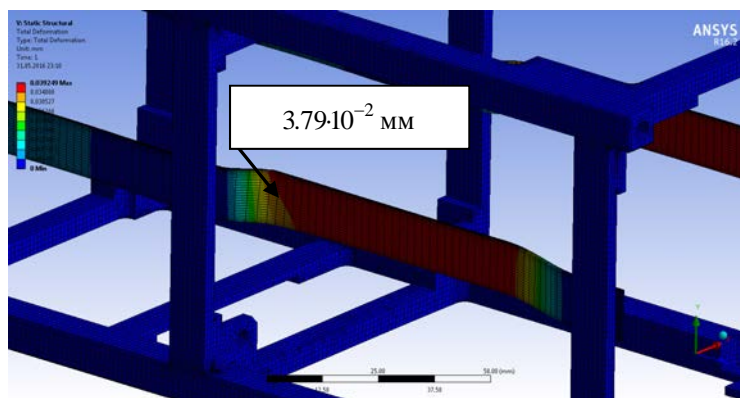
Величини σ_3^{\max} и η_{\min} в платах ЭП для различных критериев прочности

| Критерии | a_x^p | | a_y^p | | a_z^p | |
|----------------------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| | σ_3^{\max} , МПа | η_{\min} | σ_3^{\max} , МПа | η_{\min} | σ_3^{\max} , МПа | η_{\min} |
| Мизеса | 0.75 | 94.44 | 0.92 | 77.00 | 2.1 | 33.73 |
| Наибольших нормальных напряжений | 0.85 | 83.33 | 0.78 | 90.81 | 2.34 | 30.27 |
| Писаренко-Лебедева | 0.65 | 109.00 | 0.53 | 122.13 | 1.48 | 47.86 |

Как видно из табл.3 и табл.4, наиболее нагруженным элементом НС является перемычка несущего каркаса (рис.6) с минимальным коэффициентом запаса прочности $\eta_{\min} = 2.56$.

Проведенный анализ показал, что прочность ($\eta \geq 1$) рассматриваемого варианта конструкции POLYITAN-2 при квазистатических перегрузках на этапе выведения обеспечивается.

На основе жесткостного анализа установлено, что максимальная величина относительных перемещений имеет место для точек маховика модуля СОС ($\Delta^{\max} = 3.92 \cdot 10^{-2}$ мм при a_x^p), при этом маховик вместе с кронштейнами смещается как твердое тело ввиду относительно малой жесткости перемычек несущего каркаса в поперечном направлении. Наибольшие перемещения $\Delta = 3.79 \cdot 10^{-2}$ мм при a_x^p точек перемычек несущего каркаса (рис.7) соответствуют зоне σ_3^{\max} (рис.6). Для электронных плат наибольшие перемещения $\Delta^{\max} = 1.34 \cdot 10^{-2}$ мм при a_z^p имеют место в центре нижней платы (рис.2г). Максимальные перемещения для наборной стойки $\Delta^{\max} = 6.22 \cdot 10^{-3}$ мм при a_y^p реализуются в точках контакта с центральной платой (рис.2г). Наибольшие перемещения в держателе аккумулятора $\Delta^{\max} = 6.00 \cdot 10^{-4}$ мм при a_z^p имеют место в точках контура у торцов среднего аккумулятора (рис.2г). Данные расчетов максимальных перемещений в указанных конструктивных элементах приведены в табл.5.

Рис. 7. Поле перемещений в перемычке несущего каркаса для варианта нагружения a_x^p

Таблиця 5

Величины максимальных перемещений в элементах НС для рассматриваемых вариантов нагружения

| Элемент конструкции | a_x^p | a_y^p | a_z^p |
|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Δ^{\max} , мм | Δ^{\max} , мм | Δ^{\max} , мм |
| Маховик | $3.92 \cdot 10^{-2}$ | $5.24 \cdot 10^{-3}$ | $1.46 \cdot 10^{-3}$ |
| Держатель аккумуляторов | $1.53 \cdot 10^{-4}$ | $1.74 \cdot 10^{-4}$ | $6.00 \cdot 10^{-4}$ |
| Наборная стойка ЭП | $6.18 \cdot 10^{-3}$ | $6.22 \cdot 10^{-3}$ | $3.80 \cdot 10^{-4}$ |
| Плата ЭП | $6.17 \cdot 10^{-3}$ | $6.21 \cdot 10^{-3}$ | $1.34 \cdot 10^{-2}$ |

Согласно [4], допускаемая величина перемещений точек элементов НС $[\Delta] = 0.1$ мм. Из табл.5 видно, что необходимая жесткость рассматриваемой конструкции PolyItan-2 обеспечивается $\left(\Delta^{\max} \leq [\Delta]\right)$.

Выводы

1. Для разработанной конструкции НС PolyItan-2 построена рациональная комбинированная КЭМ, содержащая объемные, оболочечные, балочные и контактные КЭ.
2. Расчетным путем определено НДС в конструктивных элементах PolyItan-2 от действия квазистатических перегрузок, отвечающих этапу выведения. Найдены величины максимальных эквивалентных напряжений, перемещений, а также минимальные коэффициенты запаса прочности.
3. Установлено, что в соответствии с предъявляемыми требованиями рассматриваемая конструкция PolyItan-2 является рациональной с точки зрения прочности и жесткости.
4. Показано, что наиболее эффективным для анализа статической прочности стеклотекстолитовых плат ЭП является критерий наибольших нормальных напряжений, дающий большие значения эквивалентных напряжений $SUP \sigma_y = 2.34$ МПа и, соответственно, меньший коэффициент запаса прочности $INF \eta = 30.27$ в опасных точках.

Abstract. Completed strength analysis of nano-satellite POLYITAN-2 for the quasi-static overload on the stage of ascent. An efficient solid-state and the corresponding finite element model of nano-satellite. Using numerical modeling of stress-strain state of nano-satellite held software package Ansys. The analysis of the criteria for assessing the strength of the structural elements of strength nano-satellite, made of composite materials.. Determined safety factors, found the maximum displacement of structural elements. It was found that, for this embodiment POLYITAN-2 terms of strength and stiffness are performed.

Keywords: stress-strain state, finite element method, nano-satellite, durability, safety factors, CubeSat.

Анотація. Виконано аналіз міцності наносупутника POLYITAN-2 при квазистатических перевантаженнях на етапі виведення. Розроблено ефективну твердотільну і відповідну їй скінченно-елементну модель наносупутника. З використанням програмного комплексу Ansys проведено розрахункове дослідження напружено-деформованого стану наносупутника. Проведено аналіз критеріїв міцності для оцінки міцності елементів конструкції наносупутника, виконаних з композиційних матеріалів. Визначено коефіцієнти запасу міцності, знайдені максимальні відносні переміщення конструктивних елементів. Встановлено, що для аналізованого варіанту конструкції POLYITAN-2 умови міцності і жорсткості виконуються.

Ключові слова: напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, наносупутник, міцність, коефіцієнти запасу міцності, CubeSat.

References

1. "GOST R 56514-2015. Normy prochnosti avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov" (2015), available at : http://allgosts.ru/49/140/gost_r_56514-2015.pdf.
2. Kaverin, V. and Pugach, I. (2009), "Primenenie sovremennykh metodov pri proektirovanii i otrabotke prochnosti malogo kosmicheskogo apparata", *Voprosy elektromekhaniki*, no 109, pp. 21-26.
3. Pisarenko, G., Yakovlev, A. and Matveev, V. (1988), "*Spravochnik po soprotivleniyu materialov*", Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
4. "ANSYS Structural Analysis Guide ANSYS Release 12.1." (2009) available at : www.ansys.com/
5. "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.
6. "ECSS-E-ST-10-03C. Space engineering Testing" (2012), available at : <http://everyspec.com/ESA/download.php?spec=ECSS-E-10-02C.047796.pdf>.
7. "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/.
8. "QB50 System Requirements and Recommendations" (2015), available at : <https://www.qb50.eu/index.php/tech-docs>.

Подана до редакції 06.06.2016