

УДК 629.12

В. Н. МАСЛЕЙ, А. С. КУЛИК

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Украина

АНАЛИЗ ТЕРМОРАЗМЕРОСТАБИЛЬНОЙ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИБОРА ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Данная статья посвящена анализу терморазмеростабильных оболочечных конструкций из композиционных материалов. В оптических приборах такие конструкции используются в роли несущих силовых элементов, к которым крепятся зеркала. Работа является актуальной, так как композиционные материалы обладают ярко выраженной анизотропией физико-механических характеристик и требуют новых подходов к проектированию размеростабильных конструкций. Для максимально приближенного расчета физико-механических характеристик конструкции была разработана методика проектирования терморазмеростабильных оболочечных конструкций из композиционных материалов. Особенно данной методики является использование аналитического метода. Применение данной методики также позволяет оптимизировать физико-механические характеристики конструкции и показывает пути снижения ее массы и габаритных размеров.

Ключевые слова: терморазмеростабильность, схема армирования, оболочечные конструкции, композиционные материалы.

Введение

Создание размеростабильных композитных конструкций космического назначения является одной из приоритетных задач для предприятий ракетно-космической отрасли, так как конструкции такого типа позволяют обеспечить выполнение высоких требований, предъявляемых в части жесткости и прочности при минимально возможной массе [1].

Несущая силовая конструкция оптического прибора полезной нагрузки космического аппарата выполнена в виде цилиндрической оболочки с утолщениями на торцах. Основная задача несущей конструкции – сохранять размерную стабильность на протяжении всего периода функционирования космического аппарата для сохранения заданного положения оптических зеркал и, следовательно, обеспечения качественной работы оптико-электронной аппаратуры [2].

Постановка задачи

Для того чтобы расчет на жесткость и прочность на конструкторском этапе сводился только к незначительной корректировке характеристик, оптимизируя при этом физико-механические характеристики всего изделия в целом [3], используется аналитический метод, который позволяет уже на проектном этапе обеспечивать требуемые парамет-

ры и характеристики оболочечных конструкций.

Исходными данными для проектирования оболочечной конструкции являются:

- конфигурация и геометрические размеры оболочки;
- масса и положение центров масс элементов, крепящихся к оболочке;
- расположение элементов, к которым предъявлены требования по размеростабильности;
- значение допустимой деформации;
- значение рабочего диапазона температур, для которого должно выполняться требование по размеростабильности;
- направление и значение действующих перегрузок [3].

Решение задачи

Оболочечные конструкции занимают особое место среди размеростабильных конструкций из композиционных материалов [3]. Опыт создания конструкций данного класса показывает, что в наибольшей степени удовлетворение всем эксплуатационным требованиям к ним реализуется применением полимерных композиционных материалов (ПКМ), среди которых их наибольшая форморазмеростабильность обеспечивается углепластиковыми. Этот материал всё чаще используется в космических размеростабильных конструкциях, поскольку отличается еще и малым коэффициентом температурно-

го расширения (КТР). Наиболее целесообразно использовать в таких конструкциях высокомодульные углепластики, поскольку КТР у них ниже и их применение позволяет добиться меньших КТР в разных направлениях. Если требуется малый КТР только в одном направлении конструкции, то его можно обеспечить (вплоть до отрицательных значений) и при применении высокопрочных углепластиков, но тогда КТР в других направлениях будет значительно больше.

Для расчета температурной деформации оболочечная конструкция разбивается на части. Если рассмотреть этот этап на примере тубуса оптического прибора [2], то это обечайка, утолщения на торцах и диафрагмы (согласно рисунку 1).

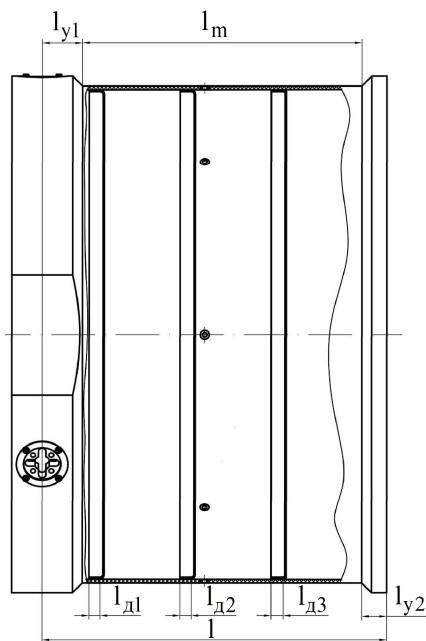


Рис. 1. Участки тубуса: l_{y1} , l_{y2} – длина утолщений; l_{d1} , l_{d2} , l_{d3} – длина диафрагм по полкам, приклеиваемым к обечайке; l_m – длина частей самой обечайки тубуса без частей над диафрагмами; l – рабочая длина тубуса, берется от плоскости крепления вторичного зеркала до втулок для пальцев крепления главного зеркала

Для каждой части выбирается схема армирования по известным физико-механическим свойствам, в частности по КТР, нормальному и сдвиговому модулю упругости и т.п., в зависимости от схем армирования.

Для каждой части конструкции определяется суммарный КТР углепластика. Для определения значения КТР, также как и для выбора схемы армирования, используются расчетные характеристики, которые могут быть уточнены в дальнейшем экспериментально. Суммарный КТР участка тубуса с утолщением определяется по правилу смесей [3]:

$$\alpha_{ty} = \alpha_t + (\alpha_y - \alpha_t) \frac{E_y \delta_y}{E_t \delta_t + E_y \delta_y}, \quad (1)$$

где E_y, E_t – модули продольной упругости утолщений и обечайки тубуса;

δ_y, δ_t – их толщины соответственно;

α_y, α_t – их коэффициенты температурного расширения соответственно.

КТР участков с диафрагмами определяется аналогично (по правилу смесей):

$$\alpha_{td} = \alpha_t + (\alpha_d - \alpha_t) \frac{E_d \delta_d}{E_t \delta_t + E_d \delta_d}, \quad (2)$$

где E_d, E_t – модули продольной упругости диафрагм и обечайки тубуса,

δ_d, δ_t – их толщины соответственно;

α_d, α_t – их коэффициенты температурного расширения соответственно.

В конструкции, рассмотренной в данной статье, схема армирования утолщений такая же, как и схема армирования обечайки для предотвращения местного коробления. Это упрощает расчет, поскольку оболочка с утолщением рассчитывается как оболочка увеличенной толщины.

Суммарная температурная деформация углепластиковой части тубуса вычисляется по формуле:

$$\Delta l = \sum l_i \alpha_i \Delta t, \quad (3)$$

где l_i – длины составляющих частей – утолщений, обечайки под диафрагмы, самой обечайки.

Если полученный результат получается неудовлетворительным, то расчет повторяется с изменением входных параметров до получения приемлемых результатов.

Расчет конструкции на прочность проводится на два случая нагружения – на устойчивость и на сдвиг:

– проверка на устойчивость для цилиндрических конструкций:

$$T_{кр} = 2\pi k E \delta^2, \quad (4)$$

где $T_{кр}$ – критическая сила потери устойчивости при сжатии цилиндрической оболочки;

k – коэффициент, учитывающий характер закрепления конструкции;

E – модуль упругости материала;

δ – толщина стенки оболочки;

– проверка прочности конструкции при сдвиговых напряжениях:

$$Q_{кр} = \pi R \delta E \sqrt{0,58 \frac{R}{l} \left(\frac{\delta}{R} \right)^{\frac{5}{2}}}, \quad (5)$$

где $Q_{кр}$ – критическая сила потери устойчивости при сдвиге цилиндрической оболочки;

R – радиус оболочечной конструкции;

δ – толщина стенки оболочки;

E – модуль упругости материала [3].

Подтверждение результатов

Спроектированная с использованием аналитического метода оболочечная конструкция прибора испытывалась на терморазмеростабильность.

Для этого в три втулки тубуса перпендикулярно его оси вместо штатных сферических опор крепления главного зеркала монтировались специальные опоры, имеющие плоские шлифованные горизонтальные законцовки (рисунок 2), служащие упором для измерителей часового типа.



Рис. 2. Опора (имитатор сферических опор крепления главного зеркала)

На внутренней и наружной поверхностях несущей конструкции прибора вдоль одной образующей были установлены 6 термодатчиков с соответствующими обозначениями (рисунок 3).

Далее конструкция помещалась в специальный термобокс, состоящий из внутренней и наружной обшивок, днища и верхней крышки, выполненных из экструдированного пенополистирола, толщиной 30 мм (рисунок 4).

Конструкция устанавливалась на стеклянные опоры через стальные шарики. Верхняя часть шариков упиралась в резьбовые отверстия на торце тубуса. На всей внутренней поверхности наружной обшивки термобокса и наружной поверхности внутренней обшивки крепились пленочные нагреватели. Для выравнивания температур по конструкции в крышку термобокса монтировались миниатюрные вентиляторы (6 шт).

Во внутреннее пространство термобокса на магнитных держателях устанавливались три массивные стальные стойки (рисунок 5). В этих стойках перпендикулярно их оси были просверлены отверстия, в которые устанавливались инварные цилиндрические держатели измерителей перемещений. В верхней и нижней части на поверхности одной из стоек закреплялись два термодатчика.



Рис. 3. Расположение температурных датчиков на внутренней поверхности несущей конструкции прибора

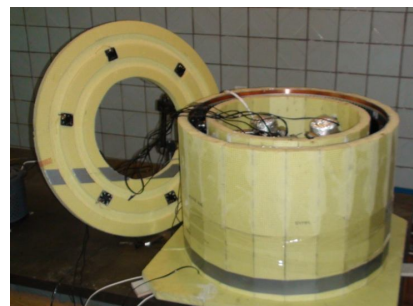


Рис. 4. Несущая конструкция прибора в термобоксе



Рис. 5. Стойки для крепления измерителей перемещений

Испытания проводились следующим образом:

- подготовленная к испытаниям конструкция помещалась в термобокс;
- устанавливались в рабочее положение измерители перемещений;
- производилась фиксация начальных показаний всех термодатчиков и измерителей;

—включался нагреватель, расположенный на наружной обшивке и производился медленный нагрев конструкции до температуры $+10^{\circ}\text{C}$ относительно исходной температуры в помещении;

—в процессе нагрева для обеспечения более равномерного распределения температуры по конструкции тубуса в ручном режиме кратковременно включался нагреватель, установленный на внутренней обшивке термобокса;

—в течение всего времени нагрева (~ 30 минут) работали вентиляторы, установленные на крышке термобокса;

—после достижения требуемой температуры и максимально возможного выравнивания ее значения на внутренней и наружной поверхностях конструкции фиксировались значения температур и линейных перемещений;

—далее, в течение 15 минут удерживали достигнутую температуру и производили очередные замеры.

При обработке полученных экспериментальных данных производилось усреднение распределения температур по конструкции тубуса и оснастке. Также учитывали величины перемещений, обусловленных удлинениями стоек, измерителей и стеклянных опор. При этом принималось, что значения коэффициентов линейного температурного расширения стекла К8 составляет $8,3 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$, а нержавеющей стали, соответственно, $13 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$.

По результатам данных испытаний среднее значение взаимного смещения объектов контроля при увеличении температуры тубуса на 10°C составило $0,75 \pm 0,54 \text{ мкм}$, а расчетное значение составило $0,56 \text{ мкм}$ [6].

Заключение

Проведен анализ терморазмеростабильной несущей конструкции прибора полезной нагрузки космического аппарата дистанционного зондирования Земли. Предложенный в данной статье метод аналитического расчета размеростабильных оболочечных конструкций из композиционных материалов позволяет на проектном этапе спрогнозировать и оценить температурные деформации конструкции. Возможность применения данного метода была подтверждена испытаниями на терморазмеростабильность как на трубчатых образцах, так и на реальной конструкции из углепластика.

Литература

1. Обеспечение терморазмеростабильности конструкций из композиционных материалов с ис-

пользованием лазерно-оптических устройств [Текст] / В. В. Кавун, А. Т. Кудреватых, А. С. Кулик, С. И. Москалев, Ю. В. Сохач, А. П. Щудро // Космические технологии: настоящее и будущее : тез. докл. VI Международной конференции. — Днепр, 2017. — С. 75.

2. Development of dimensionally stable structure of drawtube of optical device made of composite material [Text] / A. Kulyk, V. Masley, S. Moskalov, V. Kavun, A. Sanin, A. Schudro // 67-th International Astronautical Congress 2016 - Guadalajara, Mexico – IAC-16.C2.2.2

3. Проектирование размеростабильных оболочечных конструкций из композиционных материалов [Текст] / А. С. Кулик, М. Г. Добрушина, В. В. Кавун и др. // Механика гироскопических систем. — 2016. — №31. — С. 115–120.

4. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці [Текст] / Є. О. Джур, Л. Д. Кучма, Т. А. Манько, В. Г. Сітало, Ф. П. Санін, А. Ф. Санін. — К. : Вища освіта, 2003. — 399 с.

5. Карпинос, Д. М. Композиционные материалы. Справочник [Текст] / Д. М. Карпинос. — К. : Наукова думка, 1985. — 588 с.

6. Создание размеростабильной композитной конструкции тубуса оптического прибора [Текст] / А. С. Кулик, В. В. Кавун, С. И. Москалев, А. Ф. Санин, А. П. Щудро // Тез. докл. 16 Украинской конференции по космическим исследованиям. — Одесса, 2016. — С. 108.

References

1. Kavun, V. V., Kudrevatykh, A. T., Kulyk, A. S., Moskalov, S. Y., Sokhach, Yu. V., Shchudro, A. P. Providing of thermo-dimension stability of constructions from composite materials using laser-optical devices. *Kosmycheskye tekhnolohyy: nasytoyashchee y budushchee: tez. dokl. VI Mezhdunarodnoy konfe-rentsyy* [Space technology: the present and the future: theses of lectures 6th International conference]. Dnepr, 2017, p.75.

2. Kulyk, A., Masley, V., Moskalov, S., Kavun, V., Sanin, A., Schudro, A. Development of dimensionally stable structure of drawtube of optical device made of composite material. *67-th International Astronautical Congress*. Guadalajara, Mexico, 2016, IAC-16.C2.2.2.

3. Kulyk, A. S., Dobrushyna, M. H., Kavun, V. V. Designing of dimensionally stable shell structures from composite materials. *Mekhanika hyroskopycheskykh system* [Mechanics of gyroscopic systems], 2016, no. 31, pp. 115–120.

4. Dzhur, Ye. O., Kuchma, L. D., Man'ko, T. A., Sitalo, V. H., Sanin, F. P., Sanin, A. F. *Polimerni kompozytsiyni materialy v raketno-kosmichniy tekhnitsi* [Polymer composite materials in rocket and space technology]. Kyiv, Vyshcha osvita Publ., 2003. 399 p.

5. Karpynos, D. M. *Kompozitsionnye materialy. Spravochnik* [Composite materials. Directory]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1985. 588 p.

6. Kulyk, A. S., Kavun, V. V., Moskalev, S. Y., Sanyn, A. F., Shchudro, A. P. Creation of a dimensionally stable composite construction of the tube of an optical device. *Tez. dokl. 16 Ukraynskoj konfer-*

entsyy po kosmycheskym yssledovanyyam [Theses of lectures 16th Ukrainian conference on space researches]. Odessa, 2016, p. 108.

Поступила в редакцию 12.08.2017, рассмотрена на редколлегии 14.09.2017

АНАЛІЗ ТЕРМОРОЗМІРОСТАБІЛЬНОЇ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПРИЛАДУ КОРИСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ КОСМІЧНОГО АПАРАТА

В. Н. Маслей, А. С. Кулик

Дана стаття присвячена аналізу розміростабільних оболонкових конструкцій з композиційних матеріалів. В оптичних приладах такі конструкції використовують в ролі силових елементів, до яких монтуються дзеркала.

Щоб максимально наближено розрахувати фізико-механічні характеристики конструкції, було розроблено методику проектування розміростабільних оболонкових конструкцій з композиційних матеріалів. Особливість цієї методики полягає у використанні аналітичного метода. Дана робота є актуальною, адже композиційні матеріали мають яскраво виражену анізотропію фізико-механічних характеристик і потребують нових підходів до проектування розміростабільних конструкцій.

Використання даної методики також дозволяє оптимізувати фізико-механічні характеристики конструкції і показує шляхи зниження її маси і габаритних розмірів.

Ключові слова: розміростабільність, оболонкові конструкції, композиційні матеріали.

ANALYSIS OF THERMALLY DIMENSIONALLY STABLE STRUCTURE OF DRAWTUBE OF SATELLITE PAYLOAD DEVICE

V. Masley, A. Kulyk

The basic provisions of the engineering procedure for development of shell cylindrical structures made of composite materials are presented in this paper. Development of shell cylindrical structures made of composite materials occupies a prominent place in development of structures made of composite materials. Such structures are commonly used as bearing members of optical-electronic equipment and must ensure a high quality of its operation.

This procedure was developed for physical-mechanical characteristics prediction of composite structures. This work is topical because composite material has well-marked anisotropy of its characteristics and procedure of development of structure made of traditional metal materials cannot be used in this situation.

The main feature of this work is application of analytical method of designing dimensionally stable structure. This method is the basis for the design engineering procedure for shell cylindrical structures made of composite materials. Applicability of the procedure was confirmed by structural analyses of the structure with the use of finite element method and dimension-stability tests of cylindrical test samples (with different layup schedules). Dimension-stability test of the developed drawtube structure was performed. Main operations of dimension-stability test of the structure are presented in the paper too.

Such procedure allows optimizing of physical-mechanical properties of composite structures and shows the ways to reduce weight and overall dimensions of the structure.

Key phases of the procedure are listed in this paper. Presented formulae allow to calculate approximately a cylindrical structure thermal strain and check structure strength. The developed procedure may be helpful during development of similar shell cylindrical structures made of composite materials.

Keywords: dimensionally stable structure, shell cylindrical structures, composite materials.

Маслей Владимир Никитович – Главный конструктор-начальник проектно-конструкторского бюро космических аппаратов, систем и комплексов, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» имени М. К. Янгеля», Днепр, Украина.

Кулик Антонина Сергеевна – инженер-конструктор отдела проектно-конструкторского бюро космических аппаратов, систем и комплексов, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» имени М. К. Янгеля», Днепр, Украина, e-mail: tonia.kulik@gmail.com.

Maslyey Volodymyr – Chief Designer-Head of Spacecraft Design Office, Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine.

Kulyk Antonina – design engineer of Spacecraft Design Office, Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine, e-mail: tonia.kulik@gmail.com.