

УДК 629.783.02

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-377131201687188>

**А. С. Кулик**<sup>1</sup>, *інженер-конструктор*,  
**М. Г. Добрушина**<sup>2</sup>, *начальник групи*, **В. В. Кавун**<sup>3</sup>, *начальник сектора*,  
**С. И. Москалев**<sup>4</sup>, *заместитель Главного конструктора-начальник КБ*,  
**А. Ф. Санин**<sup>5</sup>, *заведующий кафедрой технологии производства*,  
**А. П. Щудро**<sup>6</sup> *начальник расчетно-конструкторской группы научно-технического отдела*

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЗМЕРОСТАБИЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**En**

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 by Yuzhnoye SDO engineers because of the need for predicting physical-mechanical characteristics of composite structure. This work is very important 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 engineering procedure is application of analytical method of designing dimensionally stable structure. Presented analytical design method allows to approximately calculate the required physical-mechanical characteristics of the structure in the design phase. Such procedure allows to optimize the physical-mechanical properties of composite structure and shows the ways to reduce weight and overall dimensions of the structure.

**Ua**

Дана стаття присвячена проектуванню розміростабільних оболонкових конструкцій із композиційних матеріалів. В оптичних приладах такі конструкції використовують в ролі силових елементів, до яких монтується дзеркала.

Щоб максимально наближено розрахувати фізико-механічні характеристики конструкції вже на проектному етапі, інженерами ДП «КБ «Південне» була розроблена методика проектування розміростабільних оболонкових конструкцій із композиційних матеріалів. Особливість цієї методики полягає у використанні аналітичного метода. Дана робота є важливою, 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-

<sup>1</sup> Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля»

<sup>2</sup> Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля»

<sup>3</sup> Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля»

<sup>4</sup> Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля»

<sup>5</sup> Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

<sup>6</sup> Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля»

механічні характеристики конструкції і показує шляхи зниження її маси і габаритних розмірів.

### **Вступление**

С развитием ракетно-космической техники значительно ужесточаются и технические требования, предъявляемые к конструкциям. Все чаще появляется необходимость использования полимерных композиционных материалов (ПКМ), без которых создание размеростабильных конструкций, соответствующих современному уровню развития ракетно-космической техники, практически невозможно. Но вместе с тем появляется и ряд трудностей, связанных с особенностями физико-механических свойств ПКМ, а именно из-за их ярко выраженной анизотропии [1].

### **Постановка задачи**

Особое место среди размеростабильных конструкций из композиционных материалов занимают оболочечные конструкции. Они широко применяются, например, в оптических приборах, где необходимо длительное время выдерживать микронные точности между оптическими элементами [2]. Для возможности уже на проектном этапе обеспечивать требуемые параметры и характеристики конструкций в ГП «КБ «Южное» была разработана методика проектирования размеростабильных оболочечных конструкций из композиционных материалов. Наличие такой методики позволяет на проектном этапе рассчитать и выбрать необходимые параметры конструкции, 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.

### **Методы и способы исследований**

Особенностью проведенной работы является использование аналитического метода, на основе которого разработана методика проектирования. Данная методика состоит из следующих этапов:

#### *Формирование исходных данных*

На данном этапе формируются исходные данные для проектирования. Сюда относятся:

- 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.

#### *Выбор материала*

В конструкциях космического назначения, где очень важно обеспечение минимальной массы, все более широко используются углепластики, поскольку они обладают очень высокими жесткостными и прочностными свойствами и низкой удельной массой [1]. Этот материал вдвойне подходит для космических размеростабильных конструкций, поскольку отличается еще и малым коэффициентом температурного расширения (КТР). Наиболее целесообразно использовать в таких конструкциях высококомодульные 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.

#### *Расчет температурной деформации оболочечной конструкции*

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

- $l_y$  – суммарная длина утолщений;
- $l_y = l_{y1} + l_{y2}$ ;
- $l_\delta$  – суммарная длина диафрагм по полкам, приклеиваемым к обечайке;
- $l_m$  – длина частей самой обечайки тубуса без частей над диафрагмами.
- $l = l_y + l_\delta + l_m$  – 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. В нашем примере использовались полученные расчетным путем графики, изображенные на рис. 2.

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]:

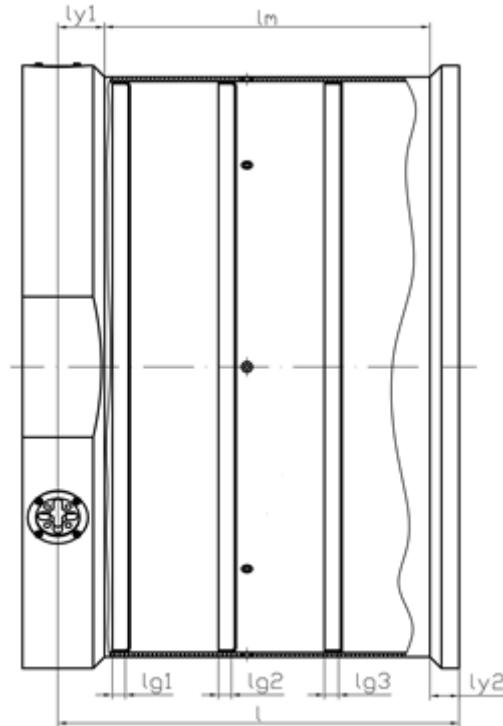


Рис. 1. Участки тубуса

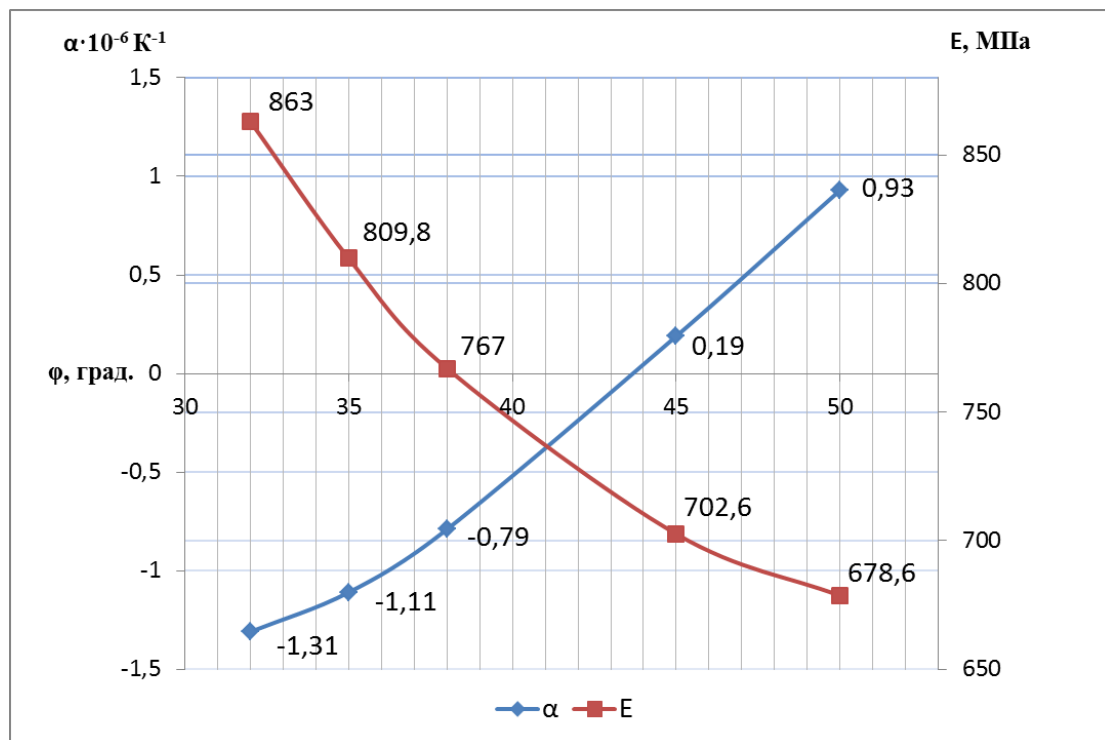


Рис. 2. Коэффициент температурного расширения и модуль упругости обечайки вдоль образующей в зависимости от угла  $\varphi$  для обобщенной схемы армирования [3/7 под  $0^\circ/\text{ост. } \pm\varphi$ ] углепластика ЛУП-0,1+ЭДТ-69У

$$\alpha_{my} = \alpha_m + (\alpha_y - \alpha_m) \frac{E_y \delta_y}{E_m \delta_m + E_y \delta_y},$$

где  $E_y, E_m$  – модули продольной упругости утолщений и обечайки тубуса;  
 $\delta_y, \delta_m$  – их толщины соответственно;

$\alpha_y, \alpha_m$  – их коэффициенты температурного расширения соответственно.

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

$$\alpha_{m\delta} = \alpha_m + (\alpha_\delta - \alpha_m) \frac{E_\delta \delta_\delta}{E_m \delta_m + E_\delta \delta_\delta},$$

где  $E_\delta, E_m$  – модули продольной упругости диафрагм и обечайки тубуса,  
 $\delta_\delta, \delta_m$  – их толщины соответственно;

$\alpha_\delta, \alpha_m$  – их коэффициенты температурного расширения соответственно.

В нашем примере 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:

$$\Delta l = \sum l_i \alpha_i \Delta t,$$

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.

#### *Проверка на прочность*

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

– проверка на устойчивость для цилиндрических конструкций:

$$- T_{кр} = 2\pi k E \delta^2,$$

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

$k$  – коэффициент, учитывающий характер закрепления конструкции;

$E$  – модуль упругости материала;  $\delta$  – толщина стенки оболочки;

– проверка прочности конструкции при сдвиговых напряжениях:

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

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

$R$  – радиус оболочечной конструкции;

$\delta$  – толщина стенки оболочки;  $E$  – модуль упругости материала.

### **Выводы**

Разработанная методика проектирования размеростабильных оболочечных конструкций из композиционных материалов позволяет на проектном этапе спрогнозировать и оценить температурные деформации конструкции. Эффективность данной методики была подтверждена испытаниями на терморазмеростабильность как на трубчатых образцах, так и на реальной конструкции из углепластика.

### **Список использованной литературы**

1. Джур О. Є. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці / Є. О. Джур, Л. Д. Кучма, Т. А. Манько, В. Г. Сітало, Ф. П. Санін, А. Ф. Санін. – К. : Вища освіта, 2003. – 399 с.
2. Кулик А. С. Создание размеростабильной композитной конструкции тубуса оптического прибора / А. С. Кулик, В. В. Кавун, С. И. Москалев, А. Ф. Санин, А. П. Щудро. // Сборник тезисов 15 Украинской конференции по космическим исследованиям. – Одесса. 2016. – С. 108.
3. Карпинос Д. М. Композиционные материалы. Справочник / Д. М. Карпинос – Киев: Наукова думка, 1985. – 588 с.