

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.05.044>

УДК 629.12

В. Н. Маслей, А. С. Кулик

Государственное предприятие

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

МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Описываются три метода проектирования изделий из полимерных композиционных материалов, применяемых при разработке размеростабильных конструкций космического назначения. Аналитический метод проектирования используется без применения специализированного программного обеспечения и позволяет на проектном этапе спрогнозировать прочностные и жесткостные характеристики конструкции. Метод расчета интегральных характеристик материала построен на базе программы ANSYS и позволяет вычислять приведенные характеристики конструкции. Физико-механические характеристики, рассчитанные с помощью этого метода, далее служат исходными данными для прочностных расчетов конструкций. Третий метод основан на использовании современного программного обеспечения, например модуля программы ANSYS Composite PrepPost. Он позволяет проектировать изделия из слоистых композиционных материалов, задавая схему армирования и тут же включать ее в прочностной расчет. Данный программный модуль позволяет также рассчитывать приведенные физико-механические характеристики материала и моделировать весь процесс создания конструкции.

Ключевые слова: метод ANSYS, полимерные композиционные материалы, программа Composite PrepPost, космическая индустрия.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием ракетно-космической техники значительно ужесточаются технические требования, предъявляемые к конструкциям космических аппаратов. Все чаще появляется необходимость использования полимерных композиционных материалов (ПКМ), без которых создание размеростабильных конструкций с минимальной массой, 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

Процесс проектирования изделий из композиционных материалов отличается от проектирования изделий из традиционных для ракетно-космической техники материалов. Необходимо учитывать больше параметров, чтобы максимально эффективно использовать материал в конкретном случае. Есть множество подходов к проектированию изделий из композиционных материалов, каждый из которых применяется исходя из заданных условий, сроков выполнения проекта и т. д.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

В работе рассматриваются три основных метода проектирования изделий из композиционных материалов: аналитический, метод расчета ин-

© В. Н. МАСЛЕЙ, А. С. КУЛИК, 2017

тегральных характеристик [2] и метод, использующий специализированное программное обеспечение для расчета изделий из композиционных материалов.

1. *Аналитический метод* не требует применения специального программного обеспечения. Одним из примеров использования аналитического метода является проектирование терморазмеростабильной оболочечной конструкции, изготовленной из углепластика (рис. 1). Для расчета температурной деформации оболочечная конструкция, согласно ее геометрии, разбивается на части.

Для каждой части выбирается схема армирования по известным физико-механическим свойствам, в частности по коэффициенту температурного расширения (КТР), нормальному и сдвиговому модулям упругости и т. п.

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

$$\alpha_{\text{ты}} = \alpha_{\text{т}} + (\alpha_{\text{у}} - \alpha_{\text{т}}) \frac{E_{\text{у}} \delta_{\text{у}}}{E_{\text{т}} \delta_{\text{т}} + E_{\text{у}} \delta_{\text{у}}},$$

где $E_{\text{у}}$, $E_{\text{т}}$ — модули продольной упругости утолщений и обечайки, $\delta_{\text{у}}$, $\delta_{\text{т}}$ — их толщины соответственно, $\alpha_{\text{у}}$, $\alpha_{\text{т}}$ — их коэффициенты температурного расширения соответственно.

Коэффициент температурного расширения участков с диафрагмами определяется аналогично (по правилу смесей):

$$\alpha_{\text{ид}} = \alpha_{\text{т}} + (\alpha_{\text{д}} - \alpha_{\text{т}}) \frac{E_{\text{д}} \delta_{\text{д}}}{E_{\text{т}} \delta_{\text{т}} + E_{\text{д}} \delta_{\text{д}}},$$

где $E_{\text{д}}$, $E_{\text{т}}$ — модули продольной упругости диафрагм и обечайки, $\delta_{\text{д}}$, $\delta_{\text{т}}$ — их толщины соответственно, $\alpha_{\text{д}}$, $\alpha_{\text{т}}$ — их коэффициенты температурного расширения соответственно.

В конструкции, рассмотренной здесь, схема армирования утолщений такая же, как и схема армирования обечайки для предотвращения местного коробления. Это упрощает расчет, поскольку



Рис. 1. Несущая конструкция прибора полезной нагрузки космического аппарата

ку оболочка с утолщением рассчитывается как оболочка увеличенной толщины.

Суммарная температурная деформация углепластиковой части конструкции 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 не удовлетворяет предъявленным требованиям, то расчет повторяется с изменением входных параметров до получения приемлемых результатов.

Расчет конструкции на прочность проводится для двух случаев нагружения на устойчивость и на сдвиг:

- критическая сила потери устойчивости при сжатии цилиндрической оболочки равна

$$T_{\text{кр}} = 2\pi k E \delta^2,$$

где k — коэффициент, учитывающий характер закрепления конструкции, E — модуль упругости материала, δ — толщина стенки оболочки;

- критическая сила потери устойчивости при сдвиге цилиндрической оболочки равна

$$Q_{\text{кр}} = \pi R \delta E \sqrt{0.58 \frac{R}{l} \left(\frac{\delta}{R} \right)^{5/2}},$$

где R — радиус оболочечной конструкции.

Аналитический метод расчета сверхлегких панелей солнечных батарей детально рассмотрен в работе [4], а для расчета конструкций, изготовленных из композиционных материалов, был проверен испытаниями как на образцах, так и на реальных конструкциях [5].

2. *Второй метод* — метод расчета интегральных характеристик полимерных композиционных материалов, позволяет рассчитать приведенные физико-механические характеристики с даль-

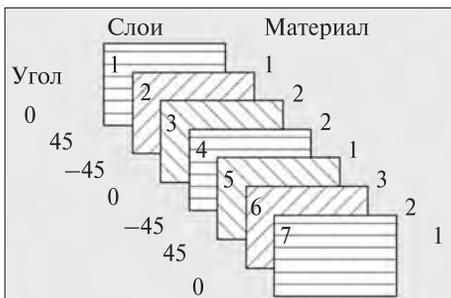


Рис. 2. Пример схемы расположения слоев в углепластике [2]

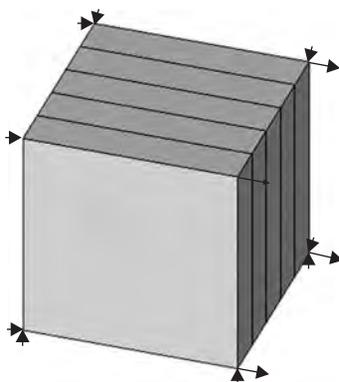


Рис. 3. Схема нагружения элемента [2]

нейшим включением полученных результатов расчет прочности.

Для расчета механических и физических характеристик многослойных (рис. 2) углепластиковых деталей можно использовать специально созданную программу [2]. Эта программа вычисляет характеристики углепластика с учетом схемы армирования и характеристик монослоя материала.

Интегральные характеристики рассчитываются с применением программного комплекса ANSYS на основе многослойного конечного элемента SOLID185 в форме куба с соответствующими направлениями слоев и процентным отношением слоев различной ориентации [2]. Вычисляются следующие интегральные ортотропные характеристики многослойного композиционного материала:

- модули продольной упругости,
- модули сдвига,
- коэффициенты Пуассона,
- коэффициенты температурного расширения.

При расчете модулей упругости и коэффициентов Пуассона элемент растягивается поочередно в трех взаимно перпендикулярных направлениях.



Рис. 4. Свойства материалов для использования (ANSYS Composite PrepPost User's Guide)

Схема нагружения элемента в одном из направлений приведена на рис. 3.

Приведенный модуль упругости рассчитывается по формуле

$$E = \frac{P \cdot L}{\Delta L \cdot F},$$

где P — приложенная нагрузка, L — длина элемента, ΔL — удлинение элемента, F — площадь поперечного сечения элемента, перпендикулярного к направлению приложенной нагрузки.

Приведенный коэффициент Пуассона рассчитывается по формуле

$$\mu = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1},$$

где ε — относительная поперечная деформация элемента в соответствующем направлении, ε_1 — относительная деформация элемента в направлении приложенной нагрузки.

Для расчета модулей сдвига элемент растягивается поочередно в трех диагональных направлениях.

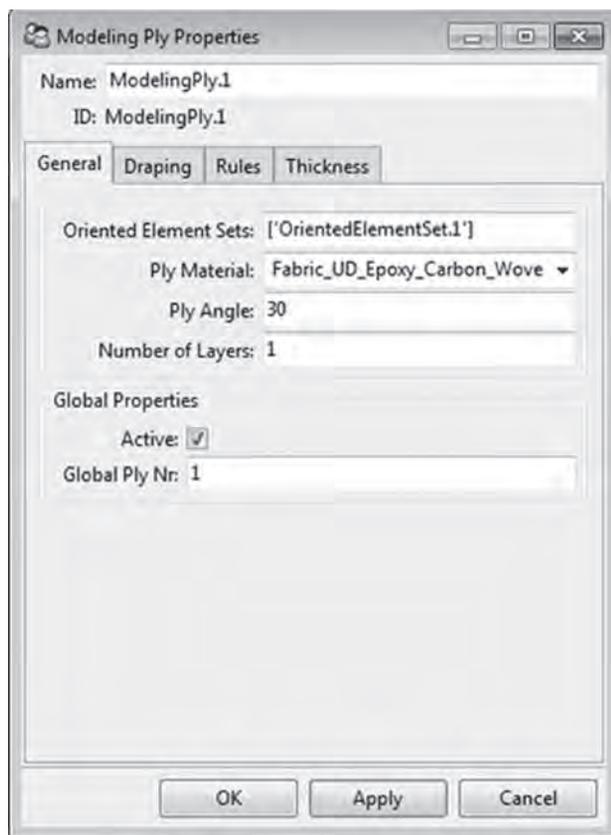


Рис. 5. Моделирование слоя композиционного материала под углом ориентации 30° в модуле Composite PrepPost

Приведенный модуль сдвига рассчитывается по формуле

$$G = \frac{P \cdot (1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3)}{\sqrt{2} a^2 (\varepsilon_2 + \varepsilon_3)},$$

где ε_2 — относительная деформация элемента вдоль диагонали растяжения, ε_3 — относительная деформация элемента вдоль диагонали сжатия, a — сторона элемента.

Для расчета коэффициента температурного линейного расширения элемент подвергается действию на него некоторой температуры t .

Приведенный коэффициент температурного линейного расширения рассчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{L - L_0}{L_0 t},$$

где L — длина элемента после нагрева, L_0 — начальная длина элемента [2].

3. Третий метод основан на использовании программного модуля ANSYS Composite PrepPost. Он

позволяет проводить прочностной расчет многослойных деталей, создавая их максимально приближенно к реальному композиционному материалу. Данный модуль учитывает слоистость материала и его поведение при нагружении, что позволяет не только рассчитать приведенные характеристики материала, а и спрогнозировать расслоение, коробление и напряжения в пределах каждого слоя.

Для прочностных расчетов композиционных материалов с использованием данного модуля необходимо ввести дополнительные, по сравнению с модулем ANSYS Workbench, параметры материала, показанные на рис. 4.

Геометрия изделия задается с помощью поверхности, на которую укладываются слои согласно заданной схеме армирования. Необходимо только задать для каждого слоя материал, толщину и угол ориентации (рис. 5). Таким образом, выкладкой слоев формируются пакеты и набирается толщина детали.

ВЫВОДЫ

Рассмотренные в данной статье методы проектирования изделий из композиционных материалов являются актуальными и применяются в нашей практике в настоящее время. Каждый метод обладает конкретными особенностями и подходит для использования при различных стадиях проектирования.

Для проектных расчетов целесообразно использовать аналитический метод, который позволяет на этом этапе рассчитать прочность конструкции. Метод расчета интегральных характеристик применяется для уточненных прочностных расчетов как с использованием аналитического метода, так и для расчетов с помощью специального программного обеспечения. Метод проектирования конструкций с использованием программного пакета ANSYS Composite PrepPost представляет собой сложный программный комплекс, позволяющий моделировать изделие из композиционного материала с учетом особенностей его поведения при нагружении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джур О. С., Кучма Л. Д., Манько Т. А. та ін. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці. — Київ: Вища освіта, 2003. — 399 с.

2. Кореннов Ю. А., Шовкопляс Ю. А., Шудро А. П. Расчет интегральных характеристик многослойных композиционных // Сб. тез. 16 Укр. конф. по космич. ис-след. — Одесса, 2016. — С. 109.
3. Кулик А. С., Добрушина М. Г., Кавун В. В. и др. Проектирование размеростабильных оболочечных конструкций из композиционных материалов // Мех. гироскопических систем. — 2016. — № 31. — С. 115—120.
4. Шудро А. П., Добрушина М. Г., Кулик А. С. Сверхлегкие панели солнечных батарей // Космич. техн. Ракет. вооруж. — 2015. — Вып. 2(109). — С. 46—55.
5. Kulyk A., Masley V., Moskalov S., et al. Development of dimensionally stable structure of drawtube of optical device made of composite material // 67-th International Astronautical Congress 2016 — Guadalajara, Mexico — IAC-16.C2.2.2

Стаття надійшла до редакції 01.11.17

REFERENCES

1. Dzjur O. E., Kuchma L. D., Man'ko T. A. et al. Polimerni kompozicijni materiali v raketno-kosmichnij tehnici, 399 s. (Vishha osvita, Kii, 2003).
2. Korennov Ju. A., Shovkopljias Ju. A., Shhudro A. P. Raschet integral'nyh harakteristik mnogoslojnyh kompozicionnyh. Sb. tez. 16 Ukr. konf. po kosmich. issled., Odessa, S. 109 (2016).
3. Kulik A. S., Dobrushina M. G., Kavun V. V. i dr. Proektirovanie razmerostabil'nyh obolochecnyh konstrukcij iz kompozicionnyh materialov. Meh. giroskopicheskikh sistem, N 31, 115—120 (2016).
4. Shhudro A. P., Dobrushina M. G., Kulik A. S. Sverhlegkie paneli solnechnykh batarej. Kosmich. tehn. Raket. vooruzh., Вып. 2 (109), 46—55 (2015).
5. Kulyk A., Masley V., Moskalov S., et al. Development of dimensionally stable structure of drawtube of optical device made of composite material. 67-th International Astronautical Congress 2016 — Guadalajara, Mexico — IAC-16.C2.2.2

Received 01.11.17

В. Н. Маслей, А. С. Кулик

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпро, Україна

МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ ВИРОБІВ З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Аналізуються методи проектування виробів з полімерних композиційних матеріалів, які використовуються при розробці розміростабільних конструкцій космічного

призначення. Аналітичний метод проектування без використання спеціалізованого програмного забезпечення дозволяє на проектному етапі спрогнозувати характеристики міцності конструкції. Метод розрахунку інтегральних характеристик матеріалу, побудований на базі програми ANSYS, дозволяє розраховувати приведені характеристики матеріалу. Фізико-механічні характеристики, розраховані за допомогою цього методу, слугують вихідними даними як для розрахунку міцності конструкції за допомогою аналітичного методу, так і за допомогою програмного забезпечення. Використання сучасного програмного забезпечення, наприклад модуля програми ANSYS Composite PrepPost, дозволяє проектувати вироби із багат шарових композиційних матеріалів, включаючи схему армування зразу в розрахунок міцності. Цей програмний модуль дозволяє також розраховувати приведені фізико-механічні характеристики матеріалу і моделювати процес створення конструкції в цілому.

Ключові слова: метод ANSYS, полімерні композиційні матеріали, програма Composite PrepPost, космічна індустрія.

V. N. Masley, A. S. Kulyk

Yangel Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine

METHODS OF MANUFACTURING THE PRODUCTS FROM COMPOSITE MATERIALS

We review methods of manufacturing the products from composite materials, which are using for making the dimensionally stable structures for space industry. Namely, we focus our analysis on the three main methods. The first of them, the analytical design method, allows approximate calculating the required physical-mechanical characteristics of products at the design stage without application of a special software. The second method, we consider, gives integral material's characteristics. The third method is based on the ANSYS software and allows calculating the composite material's characteristics depending on the composite material layup schedule. Physics-mechanical parameters that are determined by means of this method may be used as the initial data for a structure analysis with the use of both the analytical design method and the special software, for example, Composite PrepPost. It is an ANSYS module and allows us to manufacture products made of composite materials while modelling a design process as a whole.

Keywords: ANSYS method, composite materials, Composite PrepPost software, space industry.