

Расчет параметров гиперболического параболоида для линейчатой преформы X-фитинга

В.И. ХАЛИУЛИН,
д-р техн. наук
(КНИТУ-КАИ, Казань),

В.В. САВИЦКИЙ,
А.В. ЖУКОВ

(ИСС
им. акад. М.Ф. Решетнева,
Железногорск),

Р.Ш. ГИМАДИЕВ,
д-р техн. наук
(КГЭУ, Казань)
pla.kai@mail.ru

Рассматривается конструктивно-технологическое решение для фитингов из композитов, входящих в состав стержневых конструкций летательных аппаратов. Предполагается сопряжение пересекающихся стержневых элементов линейчатыми поверхностями в виде гиперболического параболоида. Разработана математическая модель поверхности фитингов, проведено численное моделирование фитинга с целью оптимизации его геометрии. Ввиду линейчатости поверхностей сопряжения прогнозируется эффективная реализация возможностей композита и, как следствие, высокая весовая эффективность конструкции.

Стержневые конструкции, летательные аппараты, композиты, X-фитинг, линейчатые преформы, гиперболический параболоид, математическое моделирование, численный эксперимент

В составе космических аппаратов достаточно часто применяются стержневые конструкции ферменного или рамного типа [1–8], основными элементами которых являются стержни трубчатого сечения и фитинги для соединения труб. Для достижения высокой весовой эффективности осуществляется переход от металла к композитам. К конструкциям космического назначения предъявляются требования по прочности, жесткости и термостабильности. Удовлетворение данных требований осуществляется подбором компонентов и схемой укладки армирующих волокон, при этом выбор схемы армирования является основной задачей.

Для стержневых элементов выбор схемы армирования может быть реализован с высокой степенью точности с помощью уже существующих методик [9–11]. Существует также ряд надежных технологических схем изготовления стержней из композиционных материалов [12–14].

Проектирование оптимальной укладки волокна в фитингах более сложная задача. Фитинги, как правило, это деталь, образуемая пересечением двух или более трубчатых элементов (рис. 1).

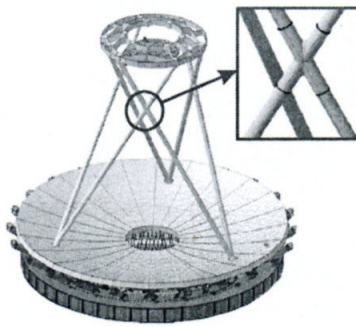


Рис. 1

Фитинги разнообразны по конструкции [15–21]. Существует несколько способов их изготовления из композиционных материалов, в том числе выкладкой [22–24], намоткой [25–27], плетением [28–33]. При использовании всех методов в зоне сопряжения трубчатых элементов образуется нерегулярная схема расположения волокон. Для проведения проектировочных и прочностных расчетов эта нерегулярность создает проблемы, так как определить физико-механические свойства материала весьма затруднительно. Известно также, что эффективность работы композита существенно зависит от совпадения направления действия сил с направлением укладки волокна. Если эти направления не совпадают, то резко падает несущая способность композитной конструкции. Наиболее удачным вариантом армирования можно считать случай, когда волокна в конструкции прямолинейные или их искривление незначительно.

Целью настоящей работы является поиск конструктивно-технологических решений фитинга, обеспечивающих максимальную весовую эффективность за счет схем армирования. Исследуется возмож-

ность армирования с максимальным процентом прямолинейных волокон в зоне пересечения стержней. Для реализации данной идеи предполагается создать поверхности в зоне пересечения трубчатых стержней в виде гиперболического параболоида. Гиперболический параболоид является линейчатой поверхностью, т.е. позволяет создать конструкции с прямолинейным армированием (рис. 2) [34]. Предположительно это даст снижение массы фитинга за счет рационального включения в работу армирующей структуры.

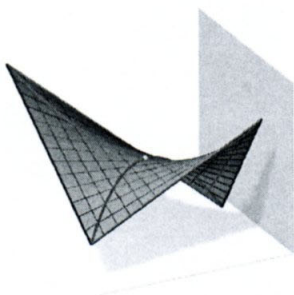


Рис. 2

Для реализации идеи армирования по поверхности гиперболического параболоида (далее – «гипар») необходимо разработать схемы армирования седловидной поверхности на базе линейчатых поверхностей типа гипар, изучить влияние формы радиуса скругления в X-фитинге на его весовое совершенство, разработать математическую модель сопряжения седловидной поверхности с трубчатыми элементами, разработать компьютерную модель фитинга с поверхностями типа гипар, исследовать влияние параметров гипара на плавность сопряжения с трубчатыми элементами, выбрать оптимальные параметры гипара с точки зрения удовлетворения требований минимальной массы и плавности сопряжения, разработать технологию изготовления X-фитинга.

Влияние радиусов сопряжения X-фитингов на несущую способность

Рассмотрим серию из десяти фитингов с различными радиусами сопряжения *в диапазоне 3...38 мм* (рис. 3).

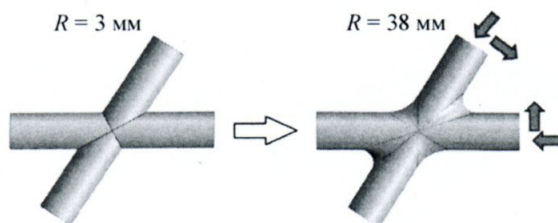


Рис. 3

С одной стороны концы стержней заделаны, с другой нагружены единичными усилиями (см. рис. 3). Материал изотропный.

Эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ в зоне сопряжения стержней рассчитывались методом конечного элемента. Анализ показал, что масса фитингов в принятом диапазоне изменения радиусов сопряжения существенно не меняется. Отклонение находится в пределах 1,5 %.

Зависимость эквивалентных напряжений от радиуса показана на рис. 4.

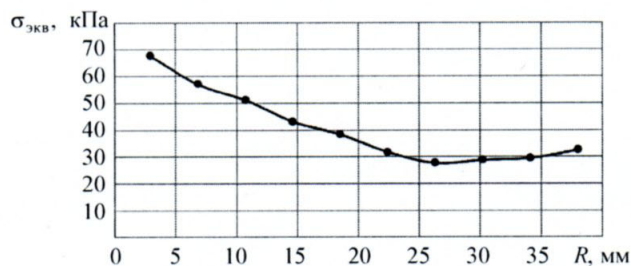


Рис. 4

Как видим (см. рис. 4), с увеличением радиуса напряжения существенно снижаются, но до определенного значения, после которого снова начинают расти. Эту зависимость можно рассматривать также и для оценки удельной прочности, поскольку масса фитингов меняется незначительно.

Такой расчет может быть принят для определения геометрии седловидной поверхности гипара в первом приближении.

Математическая модель X-фитинга

Уравнения для построения X-фитинга

Геометрическая модель X-фитинга образована двумя цилиндрами 1, 2 (рис. 5), сопряженными между собой гипарами 3, 4 и 5, 6.

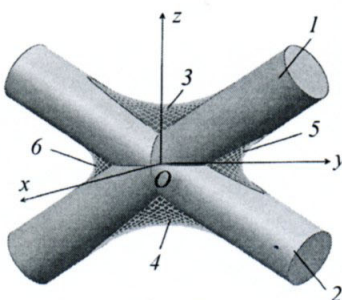


Рис. 5

Параметры цилиндров идентичны. В целом конструкция имеет три плоскости зеркальной симметрии. Начало координат $Oxyz$ лежит в точке пересечения цилиндров. Угол между осью Oz и осями цилиндров равен $\pm\alpha$. Уравнения цилиндров можно записать следующим образом:

$$x^2 + (-y \cos \alpha + z \sin \alpha)^2 = r^2; \quad (1)$$

$$x^2 + (y \cos \alpha + z \sin \alpha)^2 = r^2, \quad (2)$$

где $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$; r – радиус цилиндра, $r > 0$; x, y, z – координатные прямые; α – угол между осью цилиндра и координатной осью Oz .

Далее следует реализовать посадку на образовавшуюся крестовину гипаров.

Гипар, в свою очередь, представляет собой поверхность второго порядка, которая в декартовой системе описывается каноническим уравнением

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 2z, \quad (3)$$

где a, b – положительные числа; x, y, z – переменные координаты.

Основным свойством гипара является то, что он образуется семейством прямых линий (см. рис. 2).

Опишем местоположение поверхностей типа гипар в координатных осях. Следует отметить, что гипары 3 и 4, а также 5 и 6 расположены симметрично относительно плоскостей Oxz , Oyz и Oxy , Oyz .

На рис. 6, а показано, что сечения гипара координатными плоскостями Oxz и Oyz являются парабололами, а сечение плоскостью xOz – гиперболами. В свою очередь, поверхность гипара получается перемещением «нижней» параболы так, что ее вершина скользит по верхней параболе (рис. 6, б).

Преобразуем каноническое уравнение в более удобный вид:

$$-Ax^2 + By^2 = z - c(d), \quad (4)$$

где $c(d)$ – величины, определяющие координату вершины парабол на оси Oz (Oy), выбираются из условия лучшей посадки седловидной поверхности на цилиндры (рис. 7).

В данном случае в сечении плоскостью Oyz (где $x = 0$; $A, B, c > 0$) ветви параболы направлены вверх, а в сечении Oxz (где $y = 0$; $A, B, c > 0$) ветви параболы направлены вниз (рис. 5, гипар 3). То же самое происходит в плоскостях Oyz , где $x = 0$; $A, B, d > 0$, и Oxy , где $z = 0$; $A, B, d > 0$ (рис. 7, а, гипар 5).

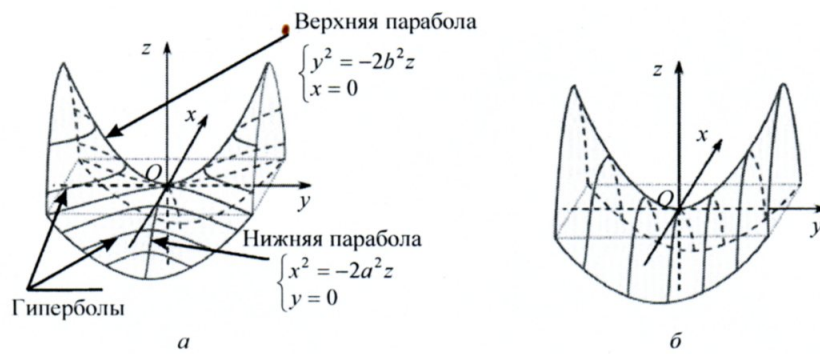


Рис. 6

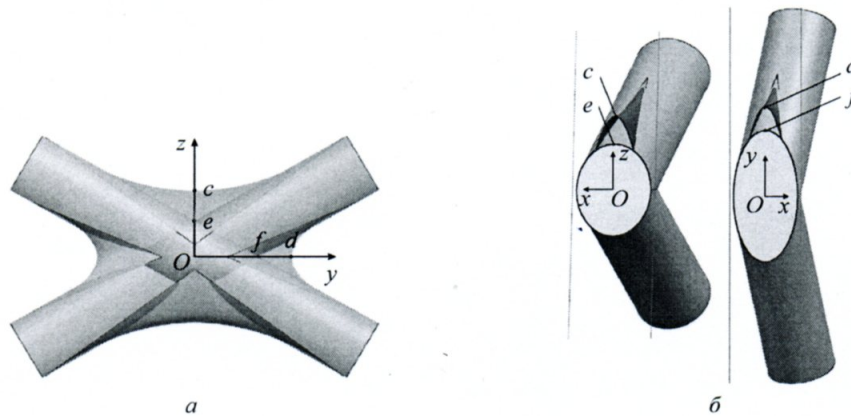


Рис. 7

Главным ограничением при построении седловидных поверхностей является условие пересечения или касание парабол с эллипсами, которые образуются в месте пересечения цилиндров плоскостями Oxz или Oxy (рис. 7, б).

Здесь $c(d)$ – вершина параболы; $e(f)$ – точка пересечения двух цилиндров с осью Oz (Oy). Найдем коэффициенты A и B , рассматривая данные сечения.

Положение точек e и f как пересечение двух цилиндров по осям Oz и Oy определяется уравнениями

$$e = \frac{r}{\sin \alpha}; \quad f = \frac{r}{\cos \alpha}. \quad (5)$$

Далее осуществляется построение парабол, образующих гипары.

Рассмотрим уравнения гипаров с параметром c , лежащим на оси координат Oz и принимающим как положительные, так и отрицательные значения.

Преобразованием канонического уравнения получаем следующие записи, соответствующие гипарам 3 и 4:

$$-\frac{c \sin \alpha + \sqrt{c^2 \sin^2 \alpha - r^2}}{2r^2 \sin \alpha} x^2 + \frac{\cos^2 \alpha}{4 \sin \alpha (c \sin \alpha - r)} y^2 = k(z - c), \quad (6)$$

где $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$, $c > 0$, $r > 0$, $k = 1$, $k = -1$ для гипаров 3 и 4.

Аналогично для гипаров 5 и 6, где рассматривается уравнение с параметром d :

$$-\frac{d \cos \alpha + \sqrt{d^2 \cos^2 \alpha - r^2}}{2r^2 \cos \alpha} x^2 + \frac{\sin^2 \alpha}{4 \cos \alpha (d \cos \alpha - r)} z^2 = k(y - d), \quad (7)$$

где $k = 1$ и $k = -1$ для гипаров 5 и 6.

Определение точек касания параболы и цилиндров

Найдя уравнения гипара, можно определить координаты точек M, M', N, N' (рис. 8) касания параболы и цилиндра на плоскости Oyz , решая следующую систему уравнений:

- для гипара 3:

$$\begin{cases} y_{\text{кас}} = \pm \frac{\text{ctg}\alpha}{2B}; \\ z_{\text{кас}} = \frac{\text{ctg}^2\alpha}{2B} + \frac{r}{\sin\alpha}; \end{cases} \quad (8)$$

- для гипара 5:

$$\begin{cases} y_{\text{кас}} = \pm \frac{\text{tg}\alpha}{2B}; \\ z_{\text{кас}} = \frac{\text{tg}^2\alpha}{2B} + \frac{r}{\cos\alpha}. \end{cases} \quad (9)$$

Из уравнений (6) и (7) получим $y = Bz^2 + c(d)$:

- для гипара 3:

$$B = \frac{\cos^2\alpha}{4\sin\alpha(c\sin\alpha - r)};$$

- для гипара 5:

$$\left(B = \frac{\sin^2\alpha}{4\cos\alpha(d\cos\alpha - r)} \right).$$

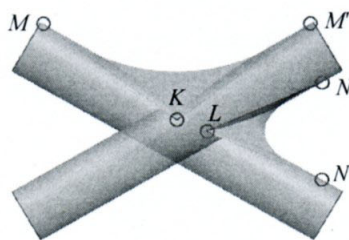


Рис. 8

Далее находим координаты точек касания K, K', L, L' параболы и эллипсов цилиндров на плоскостях Oxz и Oxy , решая следующие уравнения:

- для гипара 3:

$$y = -Ax^2 + c, \quad x_{1,2} = \pm \frac{\sqrt{4r^2 A^2 \sin^2\alpha - 1}}{2A\sin\alpha}, \quad (10)$$

где $A = \frac{c\sin\alpha + \sqrt{c^2\sin^2\alpha - r^2}}{2r^2\sin\alpha};$

- для гипара 5:

$$y = -Ax^2 + d, \quad x_{1,2} = \pm \frac{\sqrt{4r^2 A^2 \cos^2\alpha - 1}}{2A\cos\alpha}, \quad (11)$$

где $A = \frac{d\cos\alpha + \sqrt{d^2\cos^2\alpha - r^2}}{2r^2\cos\alpha}.$

Выбор параметров гипара для сопряжения с цилиндрами

Рассмотрим алгоритмы построения вариантов гипара, сопрягающегося с цилиндрами. Для исследования характера сопряжения воспользуемся численным экспериментом, построив 3D-модели X-фитинга с помощью программного обеспечения Siemens NX.

Зададим конкретные размеры конструкции X-фитинга. Примем радиусы цилиндров равными $r = 50$ мм. Угол между координатной осью Oz и осью цилиндра $\alpha = 60^\circ$. Тогда уравнения цилиндров запишутся:

$$x^2 + \left(-\frac{k}{2}y + \frac{\sqrt{3}}{2}z\right)^2 = 50^2,$$

где $k = -1$ для цилиндра 1, $k = 1$ для цилиндра 2.

На практике существует два варианта построения гипаров, сопрягающихся с цилиндрами: вариант 1, когда направляющая парабола является касательной к двум образующим цилиндров, лежащих в сечении Oyz , при этом образующая парабола пересекает цилиндры; вариант 2, когда образующая парабола является касательной к цилиндрам в плоскости Oxz , при этом направляющая парабола, лежащая в плоскости Oxz , пересекает цилиндры.

Формулы для гипаров по вариантам 1 и 2 принимают следующий вид:

- для гипара 3:

$$-\frac{c\frac{\sqrt{3}}{2} + \sqrt{c^2\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 - 50^2}}{m50^2\frac{\sqrt{3}}{2}}x^2 + \frac{\left(\frac{1}{2}\right)^2}{n\frac{\sqrt{3}}{2}\left(c\frac{\sqrt{3}}{2} - 50\right)}y^2 = z - c; \quad (12)$$

- для гипара 5:

$$-\frac{d\frac{1}{2} + \sqrt{d^2\left(\frac{1}{2}\right)^2 - 50^2}}{t50^2\frac{1}{2}}x^2 + \frac{\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2}{l\frac{1}{2}\left(d\frac{1}{2} - 50\right)}z^2 = y - d, \quad (13)$$

где для варианта 1: $m = 1, n = 4, t = 1, l = 5$; для варианта 2: $m = 2, n = 6, t = 2,5, l = 6$.

Задаваясь параметрами c и d , с помощью формул (12) и (13) можно построить различные варианты гипаров для сопряжения цилиндров.

Исследование зон сопряжения гипара с цилиндрами

Ключевым моментом при выборе параметров гипара является обеспечение как можно более плавного его сопряжения с поверхностями цилиндров. Варьируемые параметры – выбор одного из двух вариантов касания направляющей или образующей парабол и глубина «посадки» гипаров, определяемая значениями c и d .

«Седла» гипара, устанавливаемые в зоны с большим и малым углом сопряжения цилиндров, ограничены прямыми линиями (см. рис. 2, 5), т.е. проекция гипара на плоскость представляет собой ромб. При посадке «седла» граничные линии врезаются в тело цилиндров. Величину врезания обозначим δ . Очевидно, наиболее рациональный вариант гипара будет характеризоваться минимальными значениями δ .

Для проведения численного эксперимента построим двенадцать примеров X-фитингов, имеющих одинаковые цилиндры. Шесть примеров соответствуют варианту 1, при котором направляющая парабола касается продольных образующих цилиндров. Еще шесть примеров соответствуют варианту 2, характеризующемуся касанием образующей параболы цилиндров в плоскости Oxz . В вариантах 1 и 2 построено по три X-фитинга с разными параметрами c и d . При этом параметр c принимает значения 85, 98, 110, а параметр d – значения 120, 135, 150.

Далее линия направляющей параболы между точкой касания к цилиндру и плоскостью симметрии Oxz делится на семь равных отрезков. Через начало каждого отрезка проводят плоскость, перпендикулярную оси цилиндра 2. В каждом из восьми сечений определяется глубина врезания «седла» в цилиндр.

Рассмотрим один пример, соответствующий варианту 2, т.е. когда гипар касается эллипса, образуемого цилиндрами в сечении Oxz , а направляющая врезается в точке G_1 в цилиндр и выходит из его тела в точке G_2 (рис. 9).

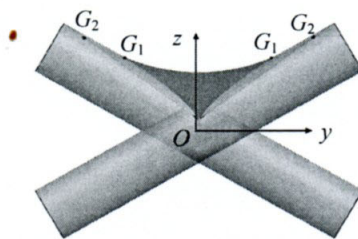


Рис. 9

Параметр «седла» $c = 75$, $d = 135$. Рис. 10 иллюстрирует процедуру моделирования пересечения гипаров 3 и 6 с цилиндрами. Показаны только два из восьми сечений – сечение 1 (рис. 10, а) и сечение 3 (рис. 10, б). Проводя аналогичную процедуру для всех вариантов посадки «седла», можно определить максимальное врезание при каждом из двух параметров c и d .

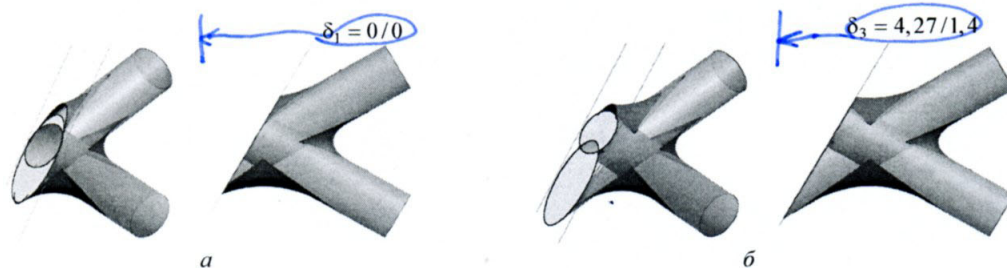


Рис. 10

На графиках (рис. 11) кривыми I и II показаны зависимости максимального врезания гипара 3 от величины посадки седла c для вариантов 1 и 2. То же самое показано для врезания гипара 5 в зависимости от параметра d (кривая III для варианта 1 и кривая IV для варианта 2).

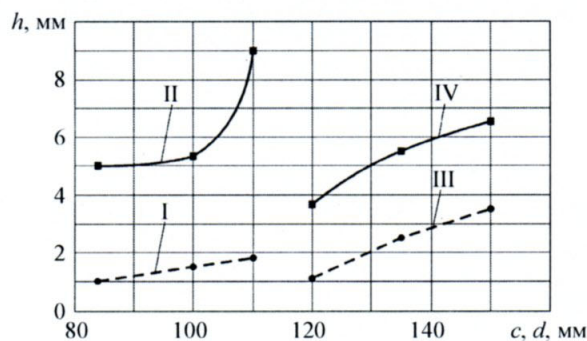


Рис. 11

Как видим (см. рис. 11), максимальная глубина врезания гипаров увеличивается с увеличением параметров c и d . При варианте 1 (пунктирная линия) эта глубина значительно меньше, чем при варианте 2 (сплошная линия).

Выбор рационального варианта седловидной поверхности по условиям сопряжения

При проектировании X-фитинга из множества вариантов гипаров, очевидно, целесообразно использование тех, что обеспечивают лучшие механические характеристики и минимальное врезание их поверхности в цилиндрические элементы. При этих условиях будет обеспечен минимальный изгиб армирующего волокна при переходе с поверхности гипара на цилиндр.

На следующем этапе в местах сопряжения цилиндров строятся гипары (см. рис. 9). В любом случае будет наблюдаться картина врезания «седла» в цилиндры. Для предотвращения проникновения гипара в цилиндры и построения прямых линий, образующих линейчатую поверхность гипара, поверхности цилиндра пересекаются плоскостями, проходящими через крайние линии гипара (рис. 12, а).

На следующем шаге осуществляется построение прямых линий на гипаре. Для этого через точку касания гипара с цилиндром в месте их пересечения и точки касания параболы цилиндра проводятся

прямые линии. Эти прямые линии делятся на определенное количество отрезков и через точки проводятся прямые линии (рис. 12, б).

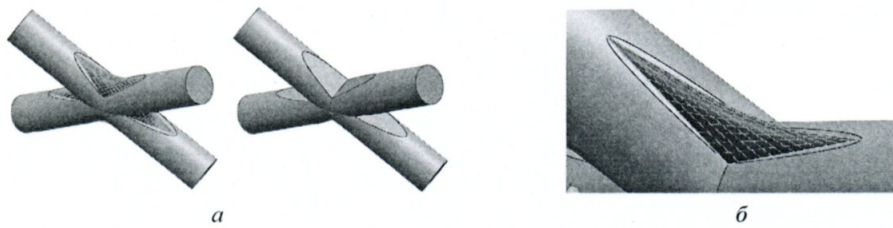


Рис. 12

Для обеспечения в местах стыков плавного перехода волокон можно провести различные варианты скругления.

Таким образом, предложена схема армирования фитинга, позволяющая прогнозировать его высокую весовую эффективность. В основе лежит сопряжение пересекающихся стержневых элементов линейчатыми поверхностями типа гипар.

Внедрение такой конструкции предполагает в перспективе создание методики прочностного расчета фитинга с зонами сопряжения типа гипар и технологической схемы изготовления его преформы. Концепция применения линейчатых поверхностей типа гипар может быть распространена и на другие элементы летательных аппаратов, например зализы в месте стыковки агрегатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации в рамках выполнения проекта с уникальным идентификатором RFMEFI57717X0262.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолаев В.И. и др. Спутниковая платформа «Экспресс-1000». СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2015. 67 с.
2. Гвамичава А.С., Кошелев В.А. Строительство в космосе. М.: Знание, 1984. 64 с.
3. Сетчатые оболочки – конструкции XXI века [Электронный ресурс]. URL: <https://territoryengineering.ru/bez-rubriki/setchatye-obolochki-konstruktsii-xxi-veka> (дата обращения: 16.04.2019).
4. Михайлов В.В., Сергеев М.С. Пространственные стержневые конструкции покрытий (структуры). Владимир: Изд-во ВлГУ, 2011. 56 с.
5. Конструкция каркасов солнечных батарей и способ изготовления каркаса: пат. 2352024 Рос. Федерация, № 2007111602/28; заявл. 29.03.2007; опубл. 10.04.2009, Бюл. № 10.
6. Зимин В.Н., Смердов А.А. Проектирование композитных соединительных узлов в задачах оптимизации многосекционных композитных космических ферменных конструкций // Вестник СибГАУ. 2017. № 1. С. 123–131.
7. MacNeal P.D., Jewett K.A. Design and Fabrication of a Large Primary Reflector Structure for Space Laser Power Beaming // Proc. of OE/LASE, June 1994, Los Angeles, U.S. Vol. 2121. P. 91.
8. Plathner D. A 12 m Telescope for the MMA-LSA Project [Electronical Resource]. URL: <https://library.nrao.edu/public/memos/alma/main/memo259.pdf> (дата обращения: 16.04.2019).
9. Дудченко А.А. и др. Расчет, проектирование и технология изготовления термостабильного композитного стержня // Конструкции из композиционных материалов. 2016. № 1 (141). С. 3–11.
10. Самитур С.А., Халиулин В.И., Батраков В.В. Методика расчета параметров процесса подготовки преформы радиальным плетением // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 3. С. 89–95.
11. Гайнутдинов В.Г., Абдуллин И.Н., Мусави-Сафави С.М. О расчете проектных значений плотности рациональной трехслойной конструкции со стержневым наполнителем // Изв. вузов. Авиационная техника. 2016. № 1. С. 59–63.
12. Савицкий В.В. и др. Разработка стержневого наполнителя для трехслойной панели космического аппарата // Научное издание. 2017. № 12. С. 59–65.
13. Халиулин В.И., Беззаметнова Д.М., Гайфуллин Б.Р. Разработка технологии изготовления стержневых наполнителей сэндвич-панелей из композитов с применением метода направленной укладки волокна и трансферного формования // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2015. № 6. С. 31–36.
14. Халиулин В.И., Хилов П.А., Торонцова Д.М. О перспективах применения TFP-технологии при производстве авиационных композитных // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 4. С. 127–132.
15. Узловое соединение стержней коробчатого сечения пространственной конструкции: пат. 2623507 Рос. Федерация, № 2016103248; заявл. 01.02.2016; опубл. 27.06.2017, Бюл. № 18.
16. Разработка конструкции и технологии изготовления узлов сочленения трубчатых элементов из полимерных композиционных материалов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sktb-plastik.ru/176> (дата обращения: 13.05.2019).

17. Carbon Fiber 0.5" Pultruded Tube Molded Connectors [Electronical Resource]. URL: <https://dragonplate.com/Carbon-Fiber-05-Pultruded-Tube-Molded-Connectors> (дата обращения: 13.05.2019).
18. Carbon Fiber Joint – 5 Way Pass through – Fits 2.00" OD Tubes [Electronical Resource]. URL: <https://www.rockwestcomposites.com/connector-accessories/cfj-5way-200> (дата обращения: 13.05.2019).
19. Yang X. et al. Fiber-Reinforced Polymer Composite Members with Adhesive Bonded Sleeve Joints for Space Frame Structures // Journal of Materials in Civil Engineering [Electronical Resource]. 2017. Vol. 29. Iss. 2. URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001737> (дата обращения: 20.05.2019).
20. 3D Printing Nodes: «Space-Frame» [Электронный ресурс]. URL: <https://studiofathom.com/blog/space-frame-table-utilizes-3d-printed-nodes-for-complex-design> (дата обращения: 13.05.2019).
21. Ферменные конструкции из композиционных материалов [Электронный ресурс]. URL: <http://1000innovations.blogspot.com/2018/09/composite-truss-structures.html> (дата обращения: 13.05.2019).
22. Способ изготовления фитинга из слоистого композиционного материала: пат. 2629487 Рос. Федерация, №2015155511; заявл. 23.12.2015; опубл. 29.08.2017, Бюл. № 25.
23. Власов А.Ю., Сержантова М.В., Андреева Я.А. Инновационные технологии создания изделий из композиционных материалов на базе ресурсного центра «Космические аппараты и системы» СибГАУ // Исследования наукограда. 2016. № 1-2 (16). С. 8–12.
24. Fiberglass Tubing Supply [Electronical Resource]. URL: <https://www.fiberglasstubingsupply.com/services/flame-retardant-tubes> (дата обращения: 14.05.2019).
25. Малков И.В. Научные основы технологии формообразования намоткой углепластиковых элементов ферменных конструкций космических аппаратов: Автореф. ... дис. канд. техн. наук. Луганск, 2001. 36 с.
26. Добродушина М.Г. и др. Обзор термостабильных конструкций космических аппаратов // Космическая техника. Ракетное вооружение. 2015. № 2 (109). С. 38–42.
27. Multiple Filament Winder. Proposal Based on Our Unique CFRP Molding Technology [Electronical Resource]. URL: <https://www.muratec.net/at/filamentwinder.html> (дата обращения: 14.05.2019).
28. Uozumi T., Kito A. Carbon Fibre-Reinforced Plastic Truss Structures for Satellite Using Braiding / Resin Transfer Moulding Process // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2007. Vol. 221. P. 93–101.
29. Uozumi T., Kito A., Yamamoto T. CFRP Using Braided Preforms / RTM Process for Aircraft Application // Advanced Composite Materials. 2005. Vol. 14. Iss. 4. P. 365–383.
30. Uozumi T., Hirukawa M. Braiding Technologies for Commercial Applications // Proc. of the 6th International SAMPE Symposium & Exhibition, Oct. 26–29, 1999, Tokyo, Japan. P. 497–500.
31. Kobayashi H. et al. Fabrication and Mechanical Properties of Braided Composite Truss Joint // Proc. of the 37 International SAMPE Symposium and Exhibition, March 9–12, 1992, Anaheim, U.S. P. 1089–1103.
32. Uozumi T. Recent Development of Muratec Braider // Proc. of 4th International Symposium of TEXCOMP, Oct. 12–14, 1998, Kyoto, Japan. P. 9–10.
33. Azumi Y. et al. Design Method for Beam Members with Braided Composites // Proc. of 4th International Symposium of TEXCOMP, Oct. 12–14, 1998, Kyoto, Japan. P. 24–27.
34. Атанасян Л.С., Базылев В.Т. Геометрия: в 2-х ч. М.: Просвещение, 1986. Ч. 1. С. 120–142.

Поступила в редакцию 28.05.19

После доработки 4.06.19

Принята к публикации 4.06.19