

Савиных А.А.

студент

6 курс, факультет «Ракетно-космической техники»

Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова

Россия, г. Санкт-Петербург

Кутилин А.А.

студент

6 курс, факультет «Ракетно-космической техники»

Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова

Россия, г. Санкт-Петербург

Двойникова Е.В.

студент

6 курс, факультет «Ракетно-космической техники»

Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова

Россия, г. Санкт-Петербург

Астахов А.М.

студент

6 курс, факультет «Ракетно-космической техники»

Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова

Россия, г. Санкт-Петербург

Чернов К.М.

студент

6 курс, факультет «Ракетно-космической техники»

Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова
Россия, г. Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ И МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ОБЛИВКИ СЕТЧАТОЙ ОБОЛОЧЕЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ ИЗ КМ НА ЕЕ НАПРЯЖЕННОМ ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

Аннотация: В статье рассматривается исследование влияния толщины и модуля упругости обливки сетчатой оболочечной конструкции из композиционных материалов на ее напряженном деформированном состоянии. Целью работы является определение характеристик сетчатых композитов и оценка их вклада при напряженном деформированном состоянии. В процессе работы создана аналитическая методика для определения объемного содержания волокна зон переплетения сетчатой конструкции и проведен структурный анализ композита. В результате были определены конструктивные параметры сетчатой конструкции с плетеной системой армирования и осуществлена верификация результатов аналитической методики.

Ключевые слова: *сетчатые конструкции, композит, волокно, ровинг, модуль упругости, толщина, напряженно-деформированное состояние.*

Annotation: *The article examines the effect of thickness and elastic modulus of the coating of a mesh shell structure made of composite materials on its stress-strain state. The aim of the work is to determine the characteristics of mesh composites and assess their contribution to the stress-strain state. In the course of the work, an analytical technique was created to determine the volumetric fiber content of the mesh structure weave zones and a structural analysis of the composite was carried out. As a result, the design parameters of the mesh structure with a woven reinforcement system were determined and the results of the analytical technique were verified.*

Keywords: *mesh structures, composite, fiber, roving, modulus of elasticity, thickness, stress-strain state.*

Введение

Сетчатые оболочки из композиционных материалов (КМ) представляют собой конструкцию, в основном, из перекрещивающихся однонаправленных нитей, связанных полимером. Армирующие волокна обеспечивают одновременно мембранную и изгибную жесткость оболочки, а также, обладают высокой жесткостью и прочностью [3].

Применяются тонкостенные сетчатые конструкции из КМ, кроме всего прочего, в космической промышленности, в частности, в качестве несущей силовой конструкции, которая принимает на себя основные механические нагрузки [6].

Однако, не смотря на высокие показатели эффективности сетчатых оболочек при теоретических расчетах, на практике критическая нагрузка конструкции значительно ниже. Виной тому отклонения готового изделия от идеальной геометрии и структуры расчетной модели: недостаток или излишки связующего в некоторых местах, неравномерность толщины нити укладываемого волокна, неравномерность натяжения волокна на форму.

Далее приводится моделирование элементарной ячейки сетчатого композита, затем отдельных ровингов для определения объемного содержания волокна и механических характеристик зон переплетения.

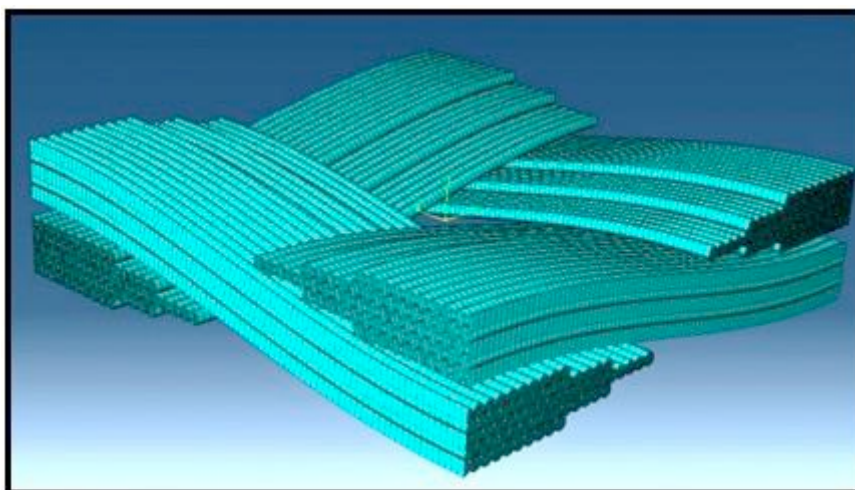
Аналитическое мезо- и микромеханическое моделирование

Конструктивно-силовая схема сетчатой конструкции позволяет максимально реализовать преимущества современных КМ при минимизации

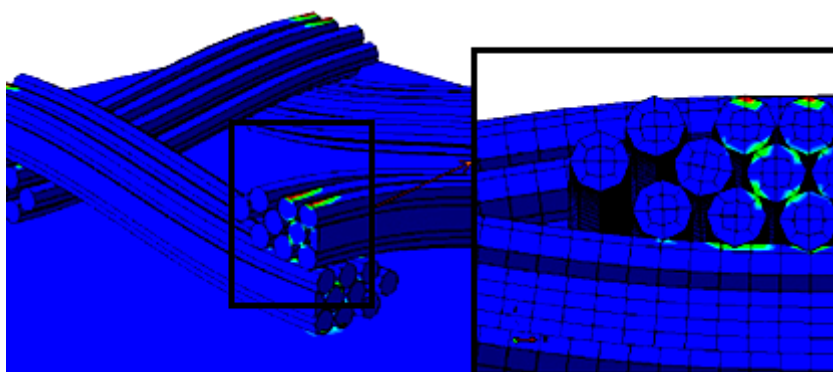
их основных недостатков, что обеспечивает высокую весовую эффективность этих конструкций по сравнению с традиционными аналогами.

В этом разделе будет разрабатываться аналитическая модель, которая будет использоваться для анализа структурного поведения сетчатой оболочечной конструкции из композиционных материалов на микроуровне, чтобы оценить его механические свойства. Моделирование будет применяться на двух уровнях масштабирования (мезо- и микро-), чтобы связать механические свойства КМ с отдельными фазами (рисунок 1).

Первый уровень относится к ровингам, которые рассматриваются в качестве однонаправленных армированных волокном композитных материалов. На этом уровне определяются их механические свойства. Второй уровень относится к элементарной плетеной ячейке и позволяет определить механические характеристики КМ.



а



б

Рисунок 1. Уровни масштабирования: а – мезо-; б – микроуровень

Изогнутость ровингов является основной причиной уменьшения механических характеристик плетеного композита, в особенности, по сравнению с однонаправленным материалом [3].

Для разработки аналитической модели в первую очередь требуется описать поперечное сечение ровингов. Форма поперечного сечения ровингов зависит от объемного содержания волокна. Для рассматриваемого случая ровинги имеют одинаковые механические свойства и геометрические параметры.

Далее приводится моделирование элементарной ячейки сетчатого композита (рисунок 2), затем отдельных ровингов для определения объемного содержания волокна и механических характеристик зон переплетения.

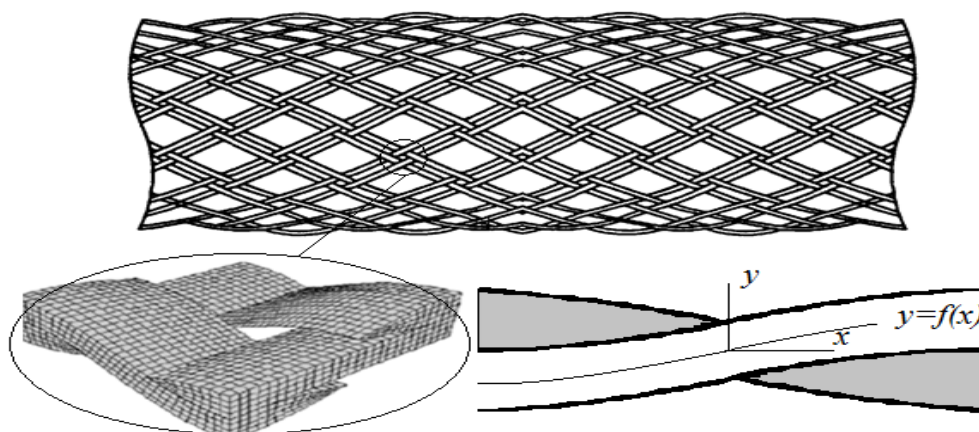


Рисунок 2. Элементарная ячейка преформы

Изогнутость ровинга моделируется синусоидальной функцией, используемой для построения полной геометрической модели ровингов.

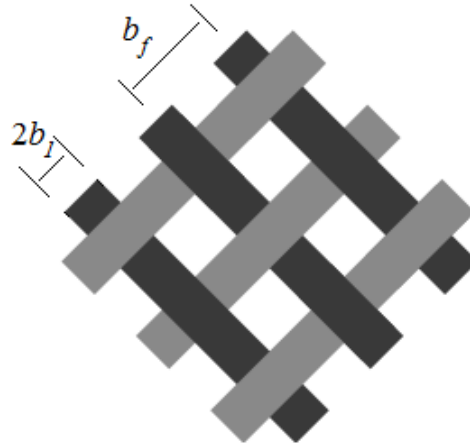
Осевая линия ровинга плетеной преформы описывается следующим образом:

$$y(x) = A \sin(Bx),$$

где A и B – константы, которые определяются введением соответствующих граничных условий и можно рассчитать путем наложения граничных условий следующим образом:

$$y(x) = a_1 \sin\left(\frac{\pi}{b_f} x\right) \quad (1)$$

где b_f – расстояние между центрами ровингов, a_1 – малая полуось поперечного сечения ровинга. Геометрические параметры ровинга могут быть легко идентифицированы на рисунке 3.



**Рисунок 3. Мезоструктура зон переплетения сетчатой конструкции:
размеры элементарной ячейки**

Объемное содержание волокна в КМ является соотношением объема армирующего материала в элементарной ячейке к ее общему объему. Значение объемного содержания волокна можно определить при помощи уравнения:

$$v_f = \frac{4b_1}{\pi b_f} \sqrt{a_1^2 + \varphi^2} \xi\left(\frac{\pi}{b_f} \mid \frac{1}{1 + \left(\frac{\varphi}{a_1}\right)^2}\right) v_f \quad (2)$$

где $\varphi = \frac{b_f}{\pi \cos \alpha}$; ξ - эллиптический интеграл второго рода; b_1 - большая полуось поперечного сечения ровинга; α - угол армирования; v_f - объемное содержание волокна в ровинге.

С помощью уравнения (2) можно определить наибольшее возможное содержание волокна в монослое. При больших значениях давления можно допустить, что все волокна в ровинге могут расположиться по треугольнику (рисунок 4а). В этом случае, только 9,31% ровинга состоит из пустот [7]. Тогда

с учетом мезоструктуры максимальное объемное содержание волокна в монослое будет равно:

$$v_f = \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \right) \quad (3)$$

Таким образом, возможно определить предельное объемное содержание волокна, то есть теоретически достичь объемного содержания волокна в зоне переплетения больше, чем 57,73%, затруднительно [7].

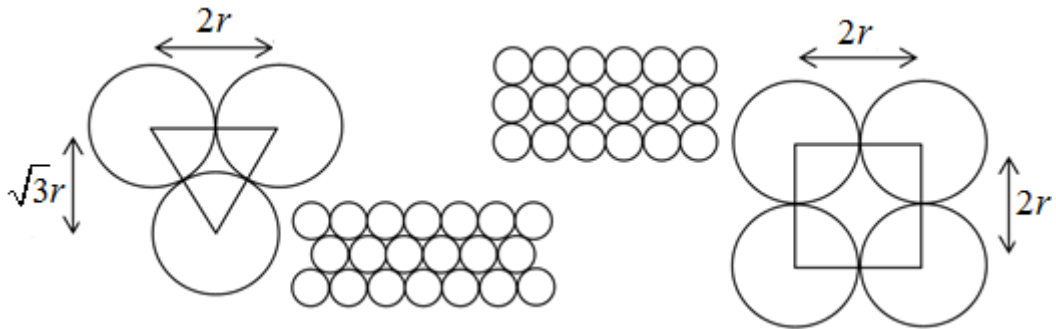


Рисунок 4. Размещение единичных волокон: а – по «треугольнику»; б – по «квадрату»

Моделирование микроструктуры строится на следующих допущениях:

1. Поперечное сечение волокон является круглым;
2. Размещение единичных волокон не всегда может располагаться по треугольнику или квадрату.

Далее определяются размеры идеализированной модели волокна, состоящей из одного плетеного волокна и связующего вокруг него.

Далее определяется объемное содержание волокна в ровинге, которое является соотношением объема волокон в ровинге к общему объему. Используя известные характеристики ровинга, K – количество волокон в ровинге, объемное содержание можно рассчитать следующим образом [8]:

$$v_f = K \frac{\pi^2}{8} \frac{r_f}{a_1 b_1} \quad (5)$$

где r_f - радиус волокна.

Для определения расстояния между волокнами в идеализированной модели, нужно определить объемное содержание волокна в ровинге геометрическим путем:

$$v_f = \frac{\frac{\pi}{2}r_f^2}{\frac{\sqrt{3}}{4}d^2} = 3,628\left(\frac{r_f}{d}\right)^2 \quad (6)$$

где d – расстояние между центрами волокон.

При помощи уравнений (5) и (6) определяется расстояние между центрами волокон в идеализированной модели ровинга:

$$d = 1,7148 \sqrt{\frac{a_1 b_1}{K}} \quad (7)$$

Затем с помощью уравнения (6) определяется расстояние между центрами волокон. После определения размеров идеализированной модели волокна определяется модуль упругости однонаправленного КМ с использованием смесевой модели, а затем модуль упругости плетеного КМ.

Далее в качестве примера будем использовать углеволокно T700S и связующее T-26 с механическими характеристиками, представленными в таблице 1 [1].

Таблица 1.

Свойства углеволокна T700S и связующего T-26

Параметры	Волокно T700S	Связующее T-26
Модуль Юнга, ГПа	230	3,1
Плотность, кг/м ³	1800	1170

После определения модуля упругости однонаправленного КМ, определяется модуль упругости плетеного ровинга. На рисунке 5 показана идеализированная модель волокна, состоящая из одного изогнутого волокна и связующего вокруг него.

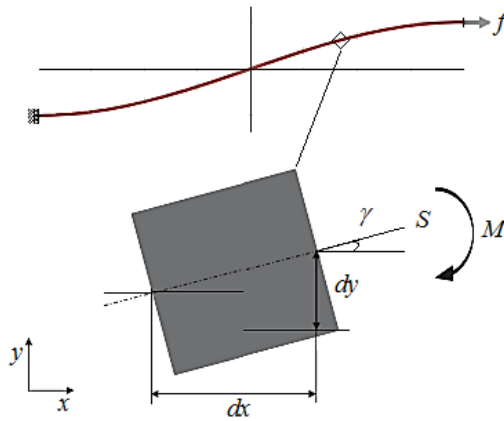


Рисунок 5. Идеализированная модель волокна

Если допустить, что идеализированная модель волокна является консольной балкой, то используем метод энергии для определения перемещения следующим образом:

$$X_1 = \int_0^l \frac{M}{EI} \frac{\partial M}{\partial f} dx \quad (8)$$

где I – момент инерции сечения консольной балки; E – модуль упругости; f – сила, действующая на консольной балке; M – изгибающий момент (рисунок 5).

Перемещения вдоль оси x и y определяются следующим образом:

$$\delta_x = \int_{-\frac{b_f}{2}}^{\frac{b_f}{2}} \frac{M}{EI} \frac{\partial M}{\partial f} \sin(\gamma) dx; \quad \delta_y = \int_{-\frac{b_f}{2}}^{\frac{b_f}{2}} \frac{M}{EI} \frac{\partial M}{\partial f} \cos(\gamma) dx \quad (9)$$

где $M = f(a_1 - y)$; $y = a_1 \sin(\frac{\pi}{b_f} x)$; $I = 0,06a_t^4$; a_t – размер шестиугольника.

Перемещение под воздействием осевой силы выразится как:

$$\Delta_x = \int_{-\frac{b_f}{2}}^{\frac{b_f}{2}} \frac{f \cos(\gamma)}{AE} \cos(\gamma) dx; \quad \Delta_y = \int_{-\frac{b_f}{2}}^{\frac{b_f}{2}} \frac{f \cos(\gamma)}{AE} \sin(\gamma) dx; \quad (10)$$

Модуль упругости модели волокна определится следующим образом:

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} = \frac{\frac{f}{A}}{\frac{(\Delta_x + \delta_x)}{l}}$$

$$E_x = \frac{fl}{A \int_{-\frac{b_f}{2}}^{\frac{b_f}{2}} \left(\frac{M \partial M}{EI \partial f} \sin(\gamma) + \frac{f \cos(\gamma)}{AE} \cos(\gamma) \right) dx} \quad (11)$$

Таким образом, разработана аналитическая методика определения модуля упругости КМ, позволяющая определить упругие характеристики зон переплетений сетчатой конструкции.

Далее приводится аналитическая методика для определения модуля упругости элементарной ячейки сетчатой конструкции (рисунок 6).

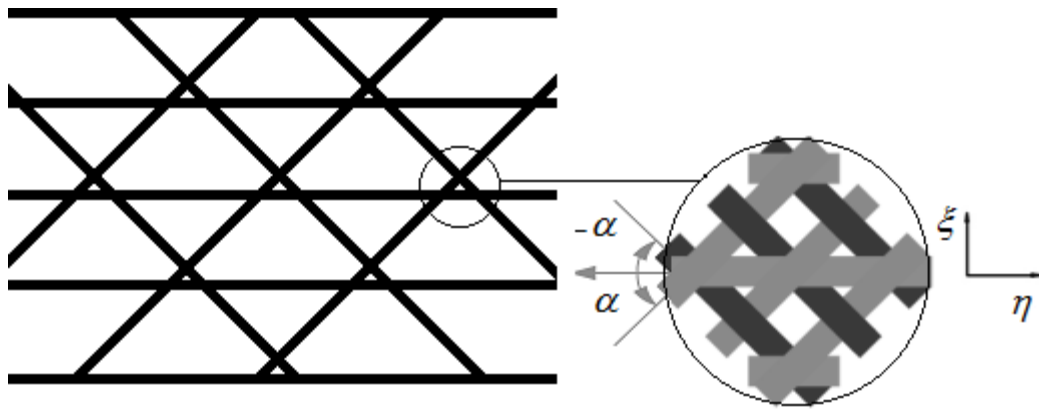


Рисунок 6. Фрагмент сетчатой конструкции с продольными ребрами

Для биаксиального плетения модули упругости по осям η и ξ выражают как:

$$\begin{aligned} E_\eta &= E_\eta^f \nu_f + (1 - \nu_f) E_m \\ E_\xi &= E_\xi^f \nu_f + (1 - \nu_f) E_m \end{aligned} \quad (12)$$

где E_η^f, E_ξ^f – модули упругости КМ по осям η и ξ , которые получаются указанным образом [7]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_\eta^f} &= \frac{\cos^4 \alpha}{E_1} + \frac{\sin^4 \alpha}{E_2} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{\nu_{12}}{E_1} \right) \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha \\ \frac{1}{E_\xi^f} &= \frac{\sin^4 \alpha}{E_1} + \frac{\cos^4 \alpha}{E_2} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{\nu_{12}}{E_1} \right) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \end{aligned} \quad (13)$$

где E_1, E_2 – модуль упругости плетеного КМ по осевому и перпендикулярному направлению ровинга; G_{12} – модуль сдвига; ν_{12} – коэффициент Пуассона.

Для триаксиального плетения модули упругости по осям η и ξ определяются следующим образом:

$$E_{\eta} = E_{\eta}^f \nu_f + (1 - \nu_f) E_m = E_{\eta 1}^f \nu_{f1} + E_{\eta 2}^f \nu_{f2} + E_{\eta 3}^f \nu_{f3} + (1 - \nu_f) E_m$$

$$E_{\xi} = E_{\xi}^f \nu_f + (1 - \nu_f) E_m = E_{\xi 1}^f \nu_{f1} + E_{\xi 2}^f \nu_{f2} + E_{\xi 3}^f \nu_{f3} + (1 - \nu_f) E_m \quad (14)$$

где $E_{\eta 1}^f, E_{\eta 3}^f$ и $E_{\xi 1}^f, E_{\xi 3}^f$ – модули упругости спиральных волокон по осям η и ξ ; $E_{\eta 2}^f, E_{\xi 2}^f$ – модули упругости продольных волокон по осям η и ξ ; ν_{f1}, ν_{f3} – объемное содержание спиральных волокон; ν_{f2} – объемное содержание продольных волокон.

Спиральные волокна располагаются под углом α , поэтому:

$$E_{\eta 1}^f = E_{\eta 3}^f = E_{\eta}^f; E_{\eta 2}^f = E_1 \quad (15)$$

Как показано в таблице 2 результаты аналитического расчета модуля упругости E_T показали высокую сходимость с результатами численных и экспериментальных исследований E_B , сделанных другими авторами [5, 8].

Таблица 2.

Сходимость численных и экспериментальных исследований характеристик

Волокно	Смола	α	$\nu_f, \%$	$E_B, \text{ГПа}$	$E_T, \text{ГПа}$	$E_{rr}, \%$
M46J	RTM-6	0-15	40	152,9	156,18	4,11
M46J	RTM-6	0-45	55	91,99	93,65	1,81

Таким образом, описана аналитическая модель на основе микромеханики для расчета упругих характеристик армированных волокном сетчатой конструкции. Используя эту модель для проведения микромеханического анализа однонаправленных и плетеных зон сетчатой

конструкции, возможно определить упругие характеристики плетеных КМ в зависимости от типа волокна, связующего и угла плетения.

Определение конструктивных параметров сетчатых конструкций

В данном разделе приводится методика для выбора конструктивных параметров сетчатой конструкции. Для описания весовых, геометрических и механических характеристик плетеных сетчатой конструкции вводятся группы уравнений:

- массы;
- геометрических параметров;
- упругих характеристик.

На рисунке 7 показаны геометрические параметры сетчатой конструкции.

Масса конструкции определяется следующим образом:

$$m_s = 2 \frac{L}{\cos \phi} t_r h_r \rho_m \frac{L}{a_r} \sin \phi + 2 \pi r L \rho_m \frac{t_a}{a_a} h_a = 2 \pi r L \rho_m \left(2 \frac{t_r h_r}{a_r} + \frac{t_a h_a}{a_a} \right) \quad (16)$$

где L, r – длина и радиус конструкции, соответственно; $t_{r(a)}, h_{r(a)}, a_{r(a)}$ – ширина, толщина и расстояние между спиральными и продольными ребрами, соответственно; ϕ – угол между спиральными и продольными ребрами.

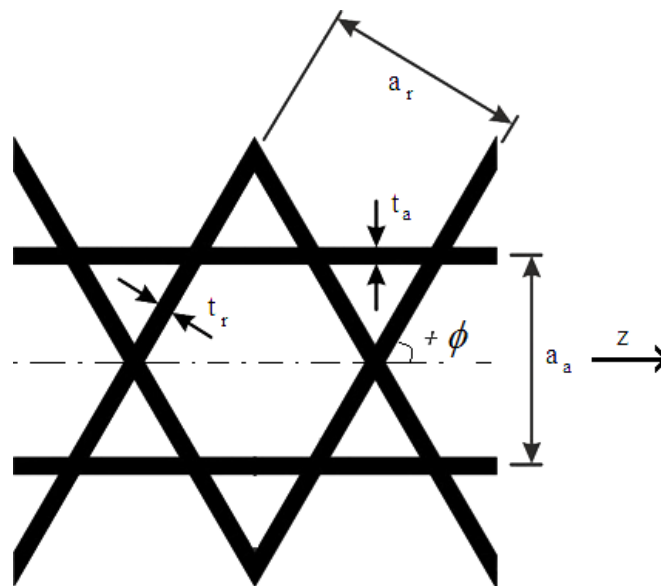


Рисунок 7. Геометрические параметры сетчатой конструкции

Уравнение массы конструкции является целевой функцией, то есть задачей является минимизирование массы конструкции с учетом геометрических и механических характеристик.

На рисунке 8а показана структура с зонами пересечений двойного и тройного наложения ровингов при триаксиальном плетении, на рисунке 8б – структура с зонами пересечений биаксиального плетения. Разница в том, что в структуре с зонами тройного наложения ровингов толщина зон пересечений в три раза больше зон однонаправленного материала, что ведет к большому изгибу ровингов. Эта особенность переплетенной структуры уменьшает механические характеристики композита, поэтому при проектировании это нужно учесть.

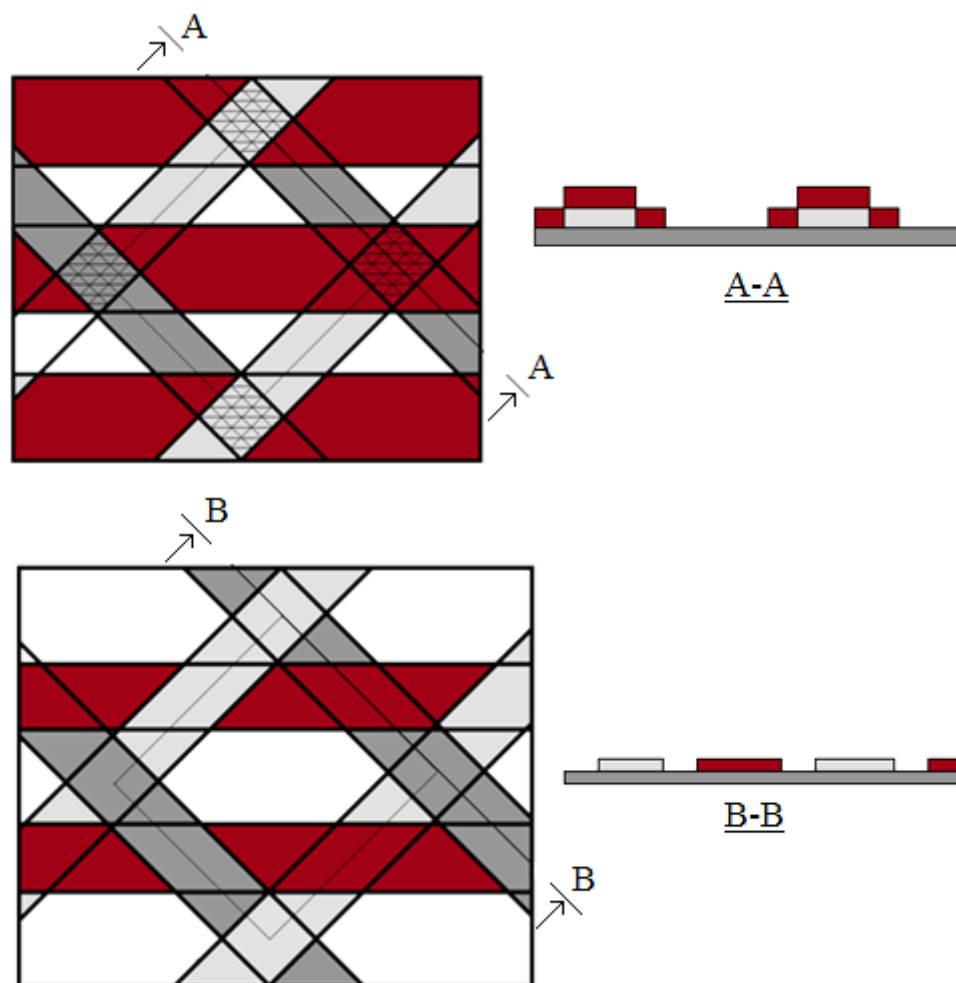


Рисунок 8. Схема зон переплетений сетчатой конструкции: а – зоны тройного наложения; б – зоны двойного наложения

Для определения геометрических параметров сетчатой конструкции без зон пересечений тройного наложения ровингов необходимо установить следующее неравенство:

$$\frac{1}{2} \frac{a_r}{\cos \phi} \geq \left(t_a + \frac{t_r}{\cos \phi} \right) \quad (17)$$

При коэффициент покрытия получается следующим образом:

$$k = 1 - \left(1 - \frac{t_r}{a_r} \right)^2 + \left(\frac{t_a}{a_r} \right)^2 \frac{2 \sin 2\phi}{\tan \phi} \quad (18)$$

Он является минимальным коэффициентом покрытия сетчатой конструкции без зон триаксиального плетения. Коэффициент покрытия – соотношение площади поверхности проекции ровингов на оправке к площади ее поверхности. Для сетчатых конструкций установлено следующее неравенство:

$$0 < k < 1$$

Таким образом, конструкция с коэффициентом покрытия меньше единицы является сетчатой конструкцией.

Если допустить, что расстояние между ребрами в два раза больше, чем ширина ребер, то:

$$k = 1 - \left(1 - \frac{1}{2} \right)^2 = 0,75 \quad (19)$$

Если расстояние между ребрами в n_a раз больше, чем ширина ребер, то коэффициент покрытия определяется следующим образом:

$$k = 1 - \left(1 - \frac{1}{n_a} \right)^2 \quad (20)$$

Таким образом, с помощью коэффициента покрытия можно связать механические и технологические параметры для изготовления трубчатых конструкций со сплошной стенкой с характеристиками сетчатой конструкции. Другими словами, конструкции с определенной массой, но с разными

коэффициентами покрытия обладают разными механическими характеристиками, то есть с помощью этого коэффициента можно оптимизировать конструкцию с целью уменьшения массы или увеличения удельных механических характеристик.

Далее рассматривается методика определения конструктивных параметров образца сетчатой конструкции для проведения экспериментальных испытаний. В данной работе в качестве образца для испытаний исследуется композиционный трубчатый сетчатый элемент авиационно-космического назначения.

С помощью уравнения (3) определяется объемное содержание волокна в зонах пересечения. Из расчетов упругих характеристик сетчатой конструкции с помощью уравнения (14) с учетом технологических характеристик и требований к конструкции таких, как жесткость и ее размеры можно определить тип волокна и связующего, а также угол плетения. С помощью уравнений массы (16) и геометрии сетчатой конструкции (18) можно определить первоначальные конструктивные параметры толщину, ширину и расстояние между спиральными ребрами. Далее эти параметры используются в расчетах методом конечных элементов [8].

Для примера использования расчетной методики согласно требованиям по жесткости, предъявляемым к трубе длиной 520 мм с внутренним диаметром 83 мм и внешним диаметром 89 мм, при действии осевой нагрузки величиной 4 кН перемещение другого фланца сетчатой конструкции не должно превышать 2 мм [4].

Согласно уравнению (14) модуль упругости материала трубы по направлению вдоль ее оси должен быть не менее 1,2 ГПа. По критериям совокупности свойств, обеспечивающих жесткость и прочность, выбрано волокно T700S и связующее T-26; объемное содержание волокна в зоне пересечения принято 57%; угол между спиральными ребрами 45°. Согласно требованиям, масса образца сетчатой конструкции не должна превышать 115

г. С помощью уравнений (16) и (18) определяется ширина ребер 11 мм и расстояние между ребрами 65 мм [4].

Расчет напряженно-деформированного состояния сетчатых конструкций методом конечно-элементного анализа

С помощью определенных конструктивных данных и свойств выбранных материалов построится компьютерная модель для дальнейших расчетов методом конечных элементов [2].

С целью верификации проводится вычислительный анализ в программе ANSYS, где реализована возможность проведения анализа конструкций. Для вычислительного моделирования в программе ANSYS необходимо задать геометрию сетчатой конструкции, свойства волокна и связующего, граничные условия и нагрузку [5].

На рисунке 9 изображена геометрическая модель сетчатой конструкции. Конструктивно-силовая схема данной конструкции представляет собой спиральные ребра из однонаправленного углепластика. В дальнейшем геометрическая модель сетчатой конструкции будет использоваться для построения модели методом конечного элемента.

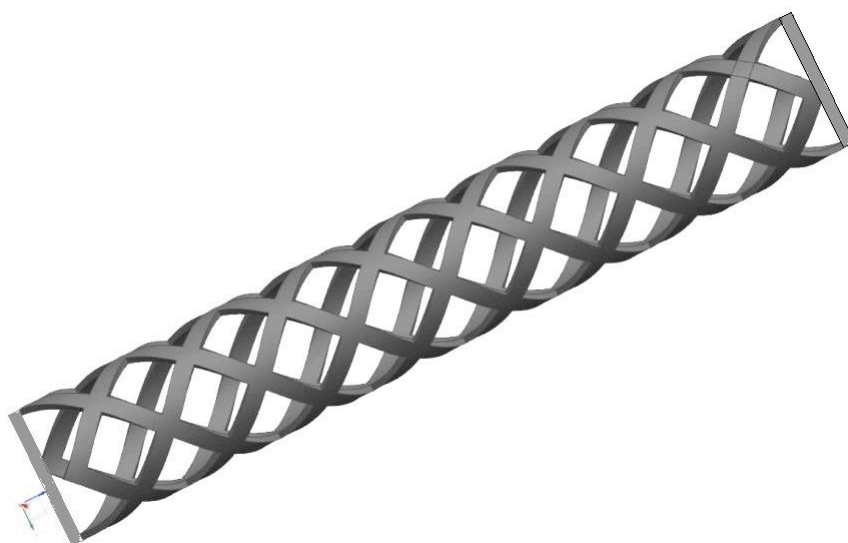


Рисунок 9. Модель сетчатой конструкции

Данная конструкция изготавливается из углепластика, свойства которого известны. На рисунке 10 приведена часть геометрической модели сетчатой конструкции, образованной из однонаправленных зон между узлами и зон переплетения в местах пересечений ребер.

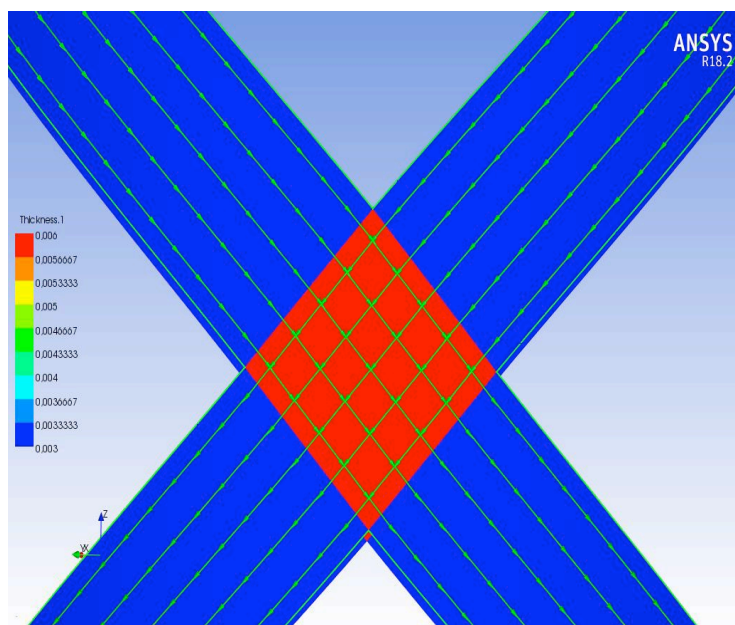


Рисунок 10. Модель фрагмента сетчатой конструкции

В качестве материала выступает углепластик с физико–механическими характеристиками, которые приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Физико–механические характеристики углепластика

E_x , ГПа	E_y , ГПа	σ_x^+ , ГПа	σ_x^- , ГПа	σ_y , ГПа	τ_{xy} , ГПа
138*	10,5	2,550	1,470	1,670	0,069

Примечание: * - приведено осредненное значение между продольным модулем на растяжение и сжатие.

На рисунке 11 показаны граничные условия, соответствующие испытанию образца на сжатие. Снизу образец лишен перемещений, сверху задается осевое перемещение вниз на 2 мм.

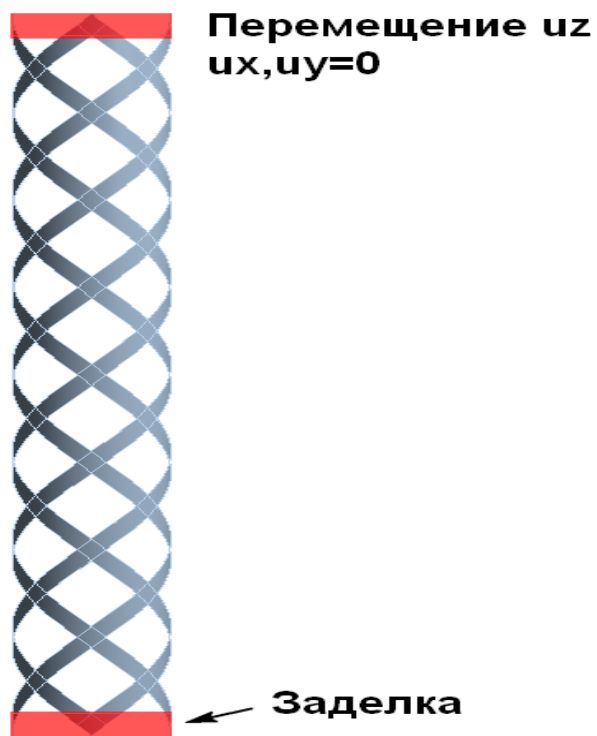


Рисунок 11. Граничные условия

На рисунке 12 показана деформация сетчатой конструкции по оси z и x , и на рисунке 12 – полные перемещения модели по оси z .

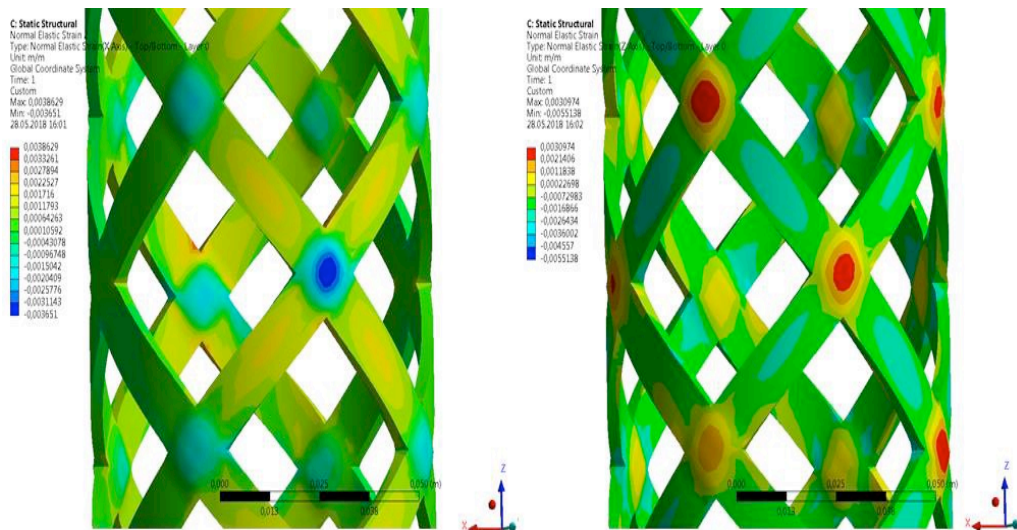


Рисунок 12. Деформация сетчатой конструкции по направлению: а – z ; б

– x

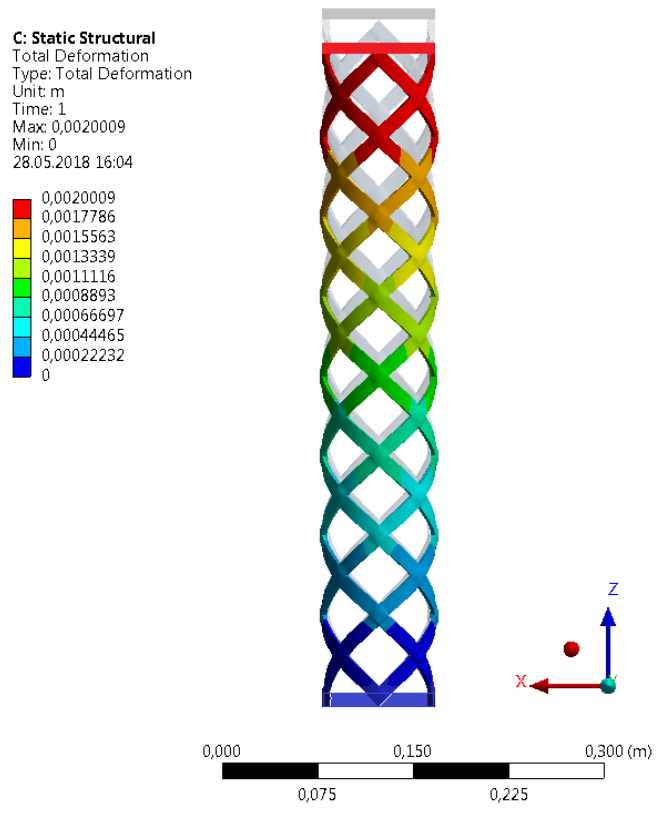


Рисунок 13. Полные перемещения модели сетчатой конструкции по оси x (масштаб визуализации 1:10)

На рисунке 14 показан запас прочности и предполагаемые места разрушения образца сетчатой конструкции.

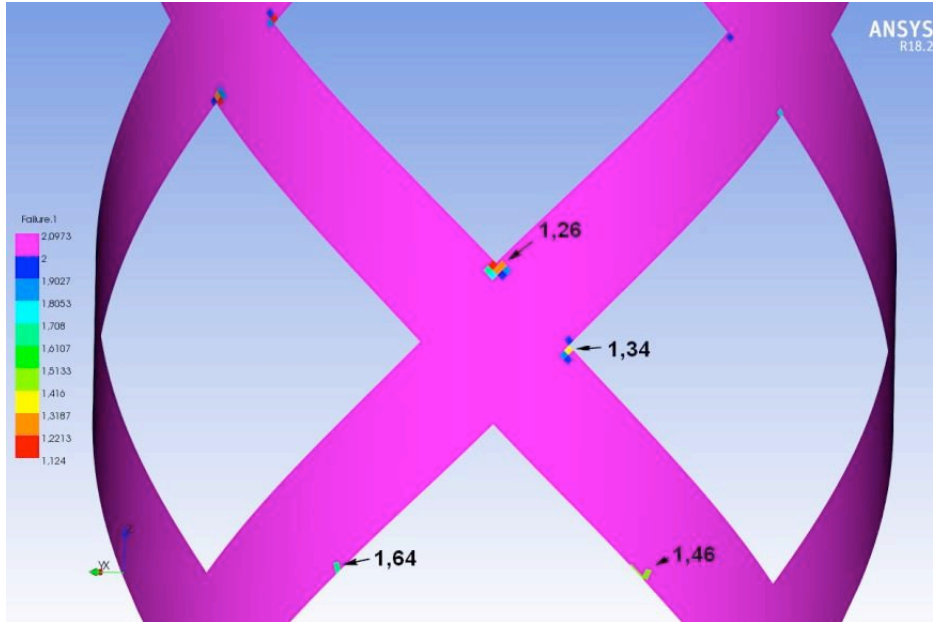


Рисунок 14. Запас прочности

Результаты аналитического расчета модуля упругости E_T показали сходимость с результатами численных исследований E_B , сделанных с использованием метода конечных элементов: E_B , ГПа - 1,338; E_T , ГПа - 1,2; $E_{гг}$, - 11,5% [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана аналитическая методика для определения объемного содержания волокна зон переплетения сетчатой конструкции с плетеной армирующей структурой. Методика позволяет определить максимальное значение объемного содержания волокна в зонах переплетения.

Был проведен структурный анализ композита на микроуровне. Методика предназначена для проведения микромеханического анализа однонаправленных и переплетенных зон сетчатой конструкции. Методика позволяет выбрать тип волокна, связующее и объемное содержание волокна для предварительного проектирования сетчатой конструкции.

Были определены конструктивные параметры сетчатой конструкции с плетеной системой армирования. Методика предполагает использование рассчитанных механических характеристик однонаправленных зон и зон пересечений как исходных параметров для дальнейших расчетов методом конечных элементов.

Осуществлен расчет напряженно деформированного состояния сетчатой конструкции методом конечно-элементного анализа, позволяющий с помощью ПО ANSYS определить механические характеристики сетчатой конструкции для верификации результатов аналитической методики.

Использованные источники:

1. Справочник по композиционным материалам: Под ред. Дж. Любина; Пер. с англ. А.Б. Геллера; Под ред. Б.Э. Геллера. - М.: Машиностроение, 1988. - 448 с;

2. Азаров, А.В. Континуальные и дискретные модели сетчатых композитных цилиндрических оболочек / А.В. Азаров // Механика конструкций из композиционных материалов. – 2012. – Т. 18. – №1. – С. 121–130.

3. Алексеев С.А. Основы общей теории мягких оболочек // Расчет пространственных конструкций. М.: Стройиздат, 1967. Вып. 11. С. 31–52.

4. Бунаков, В.А. Оптимальное проектирование сетчатых композитных цилиндрических оболочек / В.А. Бунаков // Механика конструкций из композиционных материалов. Сборник научных статей. Вып. 1. М.: Машиностроение. – 1992. – С. 101–105.

5. Бурнышева Т.В., Штейнбрехер О.А., Ульянов А.Д. Особенности задания граничных условий при моделировании сетчатых анизотридных конструкций // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2018. Т. 11, № 1. С. 137–144.

6. Лысенко Е.А. Экспериментальная отработка статической прочности конструкции космического аппарата: учеб. пособие / Е.А. Лысенко, К.Е. Лысенко; СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. 112 с.

7. Самипур, С.А. Влияние схемы армирования на объемное содержание волокна в процессе изготовления преформ методом радиального плетения/ С.А. Самипур // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации России сборник трудов Всероссийской научно–технической конференции, посвященной 50–летию Иркутского филиала МГТУ ГА. – 2017. – С. 186–189.

8. Самипур, С.А. Данилов Я.С. Разработка и верификация аналитической методики определения жесткостных параметров плетеных

трубчатых элементов/ С.А. Самипур, Я.С. Данилов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2016. – № 4. – С. 20–24.