

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ СЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ АВИА- И РАКЕТОСТРОЕНИЯ

Идея использования сетчатой структуры в конструкции самолетов возникла еще во времена Второй мировой войны. В США Джорджем Йетсом в 1941 году был сконструирован двухместный деревянный аэроплан «The Pihweve СТ-6» с применением геодезической структуры в конструкции крыльев, фюзеляжа и элементов управления [1]. Конструкция фюзеляжа английского бомбардировщика «Wellington» состояла из системы спиральных алюминиевых ребер, обтянутых полотняной обшивкой [2]. Тогда же была доказана эффективность и экономическая целесообразность использования сетчатых конструкций в авиации. Использование композиционных материалов в геодезических сетчатых структурах дало возможность проектировать легкие и прочные авиационные изделия.

На рис. 1 изображена типичная сетчатая структура отсека. Сетчатые (анизогридные) конструкции, имеют форму цилиндрической или конической оболочек, пологих оболочек двойной кривизны или плоских элементов, состоящих из системы однонаправленных ребер, изготовленных методом непрерывной намотки. Ребра обеспечивают одновременно как мембранную, так и изгибную жесткость конструкции и изготавливаются из однонаправленного углепластика, обладающего высокой удельной жесткостью и прочностью.



Рисунок 1 – Типовая сетчатая конструкция, состоящая из спиральных и кольцевых ребер

Метод автоматической непрерывной намотки позволяет получать интегральные композитные конструкции относительно низкой стоимости. Такая сетчатая конструкция является интегральной: соединение ребер между собой, а также с другими элементами конструкции реализуется в процессе полимеризации связующего композитного материала и не требует дополнительных элементов. В получаемых конструкциях, например для высокомодульных углепластиков, модуль упругости ребер составляет 185 ГПа, что практически соответствует модулю стали при плотности, в 5,2 раза меньшей. Обшивка в таких конструкциях используется только для восприятия аэродинамических нагрузок и может быть изготовлена намоткой или выкладкой.

Основными преимуществами сетчатой конструкции при реализации в авиационной технике являются интегральность, малая масса по сравнению с аналогичными металлическими и высокая надежность. Повреждения обшивки не вызывают повреждения основных несущих элементов – ребер. Конструкция допускает локальное повреждение ребер без заметного снижения несущей способности.

Из совокупности вышеизложенных факторов можно сделать вывод, что внедрение сетчатых конструкций в авиастроительную отрасль дает положительные результаты в области решения таких задач, как снижение массы конструкции самолета, увеличение ресурса и себестоимости, ремонтпригодности в не подготовленных для обслуживания условиях.

Реализация анизотридной концепции является перспективным направлением развития конструктивно-технологических процессов в авиационной технике, однако ввиду относительной новизны проблема проектирования сетчатых оболочек из композиционных материалов изучена недостаточно.

Данная статья является обзором разработок и исследований композитных анизотридных структур.

Одним из первых проблемой сетчатых конструкций в авиации начал заниматься В.В. Васильев. Им были выведены особенности описания и расчета сетчатых конструкций [3]. На рис. 2 показано семейство ребер с геометрическими параметрами δ_j , a_j и φ_j . Общий метод, основанный на смешанном вариационном принципе, позволяет найти необходимые нормальные и касательные напряжения через минимизацию функции потенциальной энергии деформации в ребрах. Также определены упругие постоянные сетчатой структуры и коэффициенты матрицы жесткости. Приведены результаты зависимости относительного критического усилия от угла φ и от геометрических параметров панели.

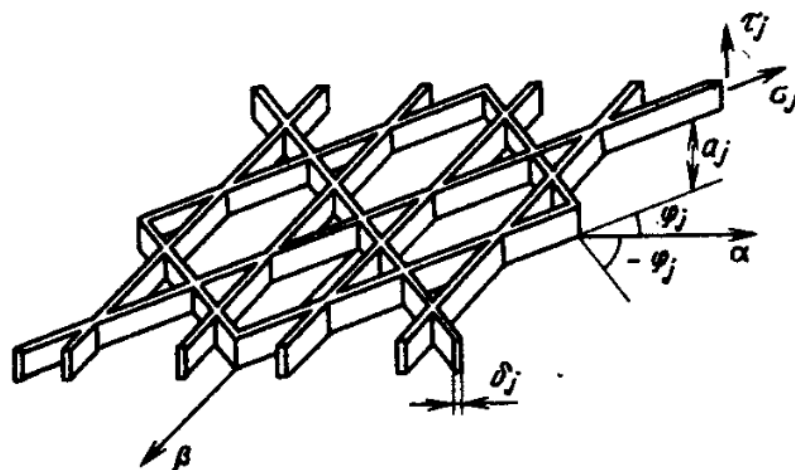


Рисунок 2 – Геометрические параметры системы ребер

В работах [4, 5] представлен обзор российского опыта разработки и приложения в космической технике анизотропных композитных сетчатых конструкций. Обсуждаются традиционные стрингерные, трехслойные и сетчатые технологические концепции: анализ, проектирование, изготовление сетчатых конструкций, их массовая и экономическая эффективность. В этих статьях сетчатая композитная оболочка описывается традиционной системой уравнений теории композитных оболочек, и их конструктивные особенности проявляются только в соотношениях упругости. В качестве целевой функции принимается масса оболочки, которая минимизируется по толщине оболочки, углу наклона спиральных ребер и относительной толщине спиральных и кольцевых ребер. В качестве форм исчерпания несущей способности рассмотрены разрушение спиральных ребер, общая потеря устойчивости, местная потеря устойчивости элементов спиральных ребер между узловыми точками.

Приведены конструктивно-технологические решения отсеков космических аппаратов сетчатого типа, соединений отсеков с аппаратом. В статьях [4, 5] представлены результаты расчетов сетчатых оболочек методом конечных элементов. Главным достоинством этих работ является то, что они обобщают имеющийся опыт в проектировании и изготовлении сетчатых композитных оболочек и анализируют сложное нагружение исследуемого объекта.

В статье [6] рассмотрены сетчатые цилиндрические оболочки, воспринимающие осевое сжатие. Ориентация волокон соответствует направлениям главных напряжений, вызванных действием внешних нагрузок. Анализируется оболочка, которая состоит из системы $\pm\phi$ однонаправленных композитных спиральных ребер и внешней однонаправленной композитной обшивки, армированной в кольцевом направлении. Целевой функцией является масса оболочки.

$$G = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot L \cdot \rho \cdot \left(2 \cdot H \cdot \frac{\delta}{a} + h_0 \right) \rightarrow \min,$$

где ρ – плотность материала; L , R – длина оболочки и ее радиус соответственно; H – высота ребер; h_0 – толщина обшивки; δ/a – отношение толщины ребра к расстоянию между ребрами.

На проектируемую оболочку накладываются четыре ограничения, связанные с прочностью ребер, прочностью обшивки, местной потерей устойчивости ребер и общей потерей устойчивости панели:

$$\bar{P}_\rho = 4 \cdot \pi \cdot R \cdot H \cdot \frac{\delta}{a} \cdot \bar{\sigma}_\rho \cdot \cos^2 \phi \geq P;$$

$$\bar{P}_0 = 4 \cdot \pi \cdot R \cdot h_0 \cdot \bar{\sigma}_1 \cdot \operatorname{ctg}^2 \phi \geq P;$$

$$\bar{P}_{кр}^M = \frac{\pi^3}{3} \cdot E \cdot H \cdot \left(\frac{\delta}{a} \right)^3 \cdot \sin^2 2\phi \cdot \cos^2 \phi \geq P;$$

$$\bar{P}_{кр}^0 = 4 \cdot \pi \cdot \cos^2 \phi \cdot \sqrt{\frac{1}{6} \cdot E \cdot E_1 \cdot \frac{\delta}{a} \cdot H^3 \cdot h_0} \geq P;$$

где \bar{P}_ρ – предельная осевая нагрузка, соответствующая разрешению ребер; \bar{P}_0 – предельная нагрузка, соответствующая разрушению обшивки; $\bar{P}_{кр}^M$ – критическая сила, соответствующая местной потере устойчивости; $\bar{P}_{кр}^0$ – критическая сила, соответствующая общей потере устойчивости; $\bar{\sigma}_\rho$ – прочность материала ребер на сжатие; h_0 – толщина обшивки; $\bar{\sigma}_1$ – прочность на растяжение однонаправленного слоя вдоль волокон; E – модуль упругости материала ребер; E_1 – модуль упругости материала обшивки.

В статье доказано, что для сетчатых оболочек, нагруженных сжимающим усилием вдоль оси оболочки, величина угла намотки ребер не зависит от нагрузки и свойств материала. При проектировании равнопрочной конструкции величина угла составила $\phi = 26,56^\circ$. Также показана разница между равнопрочной конструкцией и конструкцией минимальной массы.

В данном исследовании проведена оценка эффективности композитной сетчатой конструкции, нагруженной осевой сжимающей силой P . Результаты вычислений приведены на рис. 3, где в зависимости от интенсивности осевой нагрузки P массы сетчатой оболочки из КМ, подкрепленной металлической оболочкой и трехслойной металлической оболочки отнесены к массе оптимальной гладкой металлической оболочки \bar{G} .

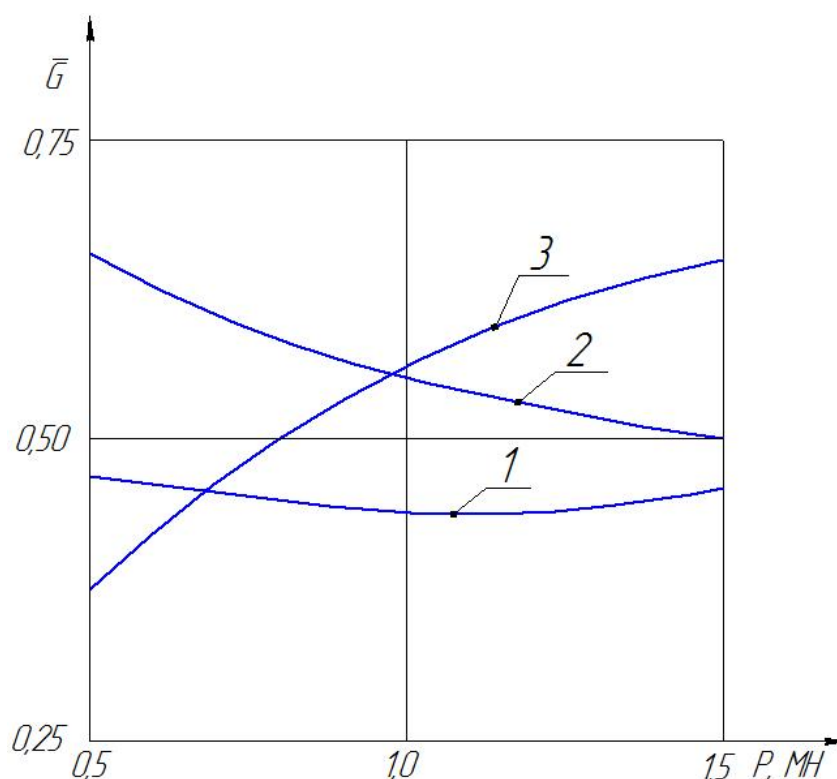


Рисунок 3 – Зависимость массы оболочки от величины осевой силы (1 – сетчатая композитная; 2 – подкрепленная металлическая; 3 – трехслойная металлическая оболочки)

Рассматриваемые исследования проводились с оболочками, нагруженными одноосным сжатием, поэтому для решения задачи о сложном нагружении предложенный авторами алгоритм проектирования нуждается в доработке.

Представление сетчатой структуры в виде дискретной системы соединенных между собой стержней, изображенная на рис. 4, исследовано в работе [7]. Эта система будет находиться под действием растяжения, сжатия, кручения и изгибающих сил. Для получения основных формул, описывающих поведение системы, предложено использование вариационного метода.

Для регулярной системы ребер можно пренебречь кривизной и кручением ребер и привести вычисления к решению системы линейных алгебраических уравнений, подобных уравнениям метода сил. Для цилиндрической оболочки, которая состоит из ребер, расположенных под углом $\pm\varphi$, получены решения для определения сил и моментов в ребрах.

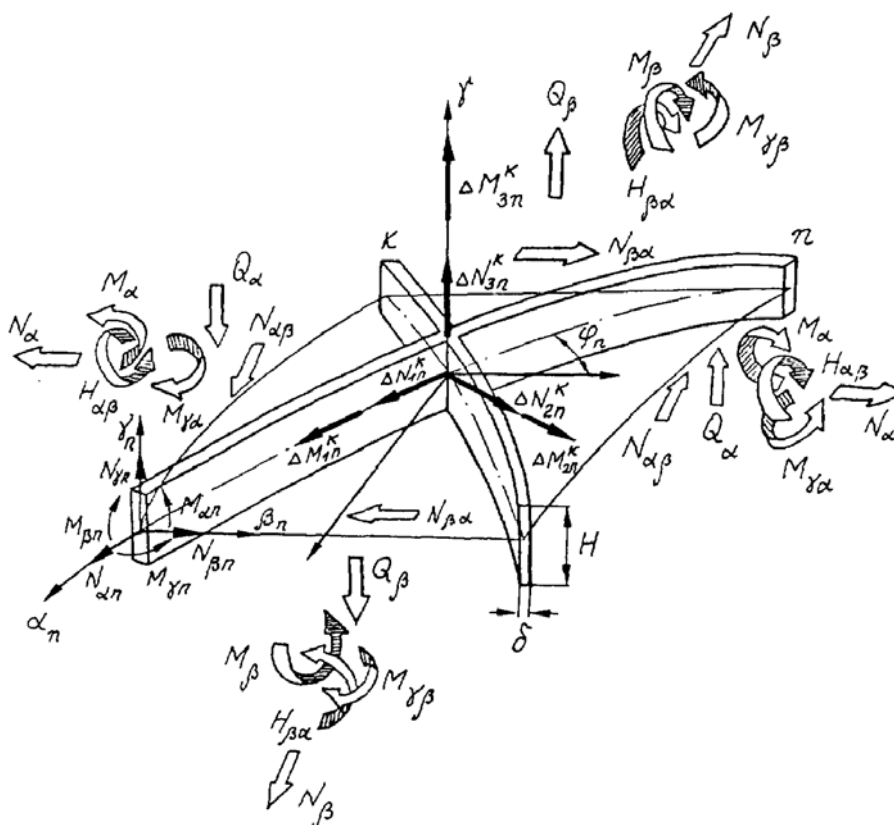


Рисунок 4 – Силы и моменты, действующие на ребра

В работе [8] анализируется микросетчатая структура из композиционного материала, получаемая методом намотки, для тонкостенных конструкций, нагруженных сжимающими усилиями. Основной акцент в данной статье делается на то, что традиционная сетчатая оболочка из композитов обладает высокой степенью весового совершенства. Между узлами пересечения ребер объемное содержание волокон не превышает 40 %, что приводит к снижению прочности и жесткости ребер по сравнению с соответствующими характеристиками однонаправленных композитов с объемным содержанием волокон 65 %. Ребра микросетчатой структуры состоят из тонких однонаправленных лент, которые соединяются между собой только в узлах пересечения лент.

В работе [8] рассмотрены цилиндрические оболочки, воспринимающие сжимающую осевую силу.

Целевой функцией является масса оболочки, минимизация которой показала, что оптимальной является ориентация спиральных ребер под углом $\varphi = 26,565^\circ$. Авторы утверждают, что оболочка с микросетчатой структурой на 28 % легче традиционной конструкции.

Ввиду исследования только одноосного сжатия нельзя утверждать без дополнительного анализа, что микросетчатая структура воспринимает сложное нагружение аналогично одноосному сжатию.

Проанализировав основополагающие работы и статьи, посвященные исследованию сетчатых конструкций, можно смело утверждать, что сетчатая структура является оптимальной, исходя из требований мини-

мальной массы конструкции при определенных нагрузках. Использование различных методов позволяет определить оптимальный угол наклона спиральных ребер, взаимное расположение ребер, оценить силы и моменты, действующие на элементы конструкции, определить критические напряжения и усилия.

Вместе с тем в литературе отсутствует общая методология определения комплекса оптимальных параметров конструкции, включая обшивку, прочность соединения обшивки и ребер и др.

Список использованных источников

1. Powell, K. Geodetic aircraft structure [Текст] / K. Powell // Sport Aviation. – 1961. – № 8. – P. 17–24.
2. Mackay, R. Wellington in Action. Texas [Текст] / R. Mackay // Squadron/Signal Publication. – Carrollton, 1986. – № 76. – 50 p.
3. Васильев, В. В. Механика конструкций из композиционных материалов [Текст] / В. В. Васильев. – М. : Машиностроение, 1988. – 272 с.
4. Васильев, В. В. Анизогридные композитные сетчатые конструкции – разработка и приложение в космической технике [Текст] / В. В. Васильев, В. А. Барынин, А. Ф. Разин и др. // Композиты и наноструктуры. – 2009. – № 3. – С. 38–50.
5. Vasiliev, V. V. Anisogrid composite lattice structures – Development and aerospace applications [Текст] / V. V. Vasiliev, V. A. Barynin, A. F. Razin // Composite Structures. – 2012. – Vol. 94, Is. 3. – P. 1117–1127.
6. Васильев, В. В. Проектирование сетчатых композитных цилиндрических оболочек, сжатых в осевом направлении [Текст] / В. В. Васильев, В. А. Бунаков // Конструкции из композиционных материалов. – 2000. – № 2. – С. 68–76.
7. Bunakov, V. A. Design of Axially Compressed Composite Cylindrical Shells with Lattice Stiffeners [Текст] / V. A. Bunakov // Optimal Structural Design / V. V. Vasiliev, Z. Gurdal, eds. – USA : Technomic Publishing Co, 1999. – P. 207–246.
8. Васильев, В. В. Композитные конструкции с микросетчатой структурой [Текст] / В. В. Васильев, В. А. Никитюк, И. В. Козлова // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2004. – Т. 10, № 1. – С. 70–79.

Поступила в редакцию 10.02.2014.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Я.С. Карпов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.