

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИЕ
КОМПОЗИТНЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ

А.В. Азаров, А.Ф. Разин

**Расчет и проектирование
сетчатых композитных
конструкций**

Учебное пособие

2-е издание



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана

2 0 2 6

УДК 629.7.023:678.027.94
ББК 34.42:30.36
А35

Издание доступно в электронном виде по адресу
<https://press.bmstu.ru/catalog/item/8669/>

Факультет «Специальное машиностроение»
Кафедра «Ракетно-космические композитные конструкции»

*Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия*

Рецензент
канд. техн. наук, доцент *А.А. Склезов*

Азаров, А. В.

А35

Расчет и проектирование сетчатых композитных конструкций : учебное пособие / А. В. Азаров, А. Ф. Разин. — 2-е изд. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2026. — 179, [1] с. : ил. — (Ракетно-космические композитные конструкции и технологии).

ISBN 978-5-7038-6819-5

Рассмотрены вопросы, связанные с расчетом и проектированием сетчатых композитных конструкций, применяемых в ракетно-космической технике в качестве отсеков ракет-носителей, адаптеров полезной нагрузки, корпусов космических аппаратов и элементов развертываемых космических антенн.

Для студентов магистратуры, обучающихся по специальностям «Ракетные комплексы и космонавтика» (24.04.01) и «Материаловедение и технологии материалов» (22.04.01) на факультете «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Пособие может быть полезно аспирантам, научным работникам и инженерам в области разработки и изготовления композитных конструкций.

УДК 629.7.023:678.027.94
ББК 34.42:30.36



Уважаемые читатели! Пожелания, предложения, а также сообщения о замеченных опечатках и неточностях Издательство просит направлять по электронной почте: press@bmstu.ru

ISBN 978-5-7038-6819-5

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

Предисловие

Учебное пособие посвящено вопросам расчета и проектирования сетчатых композитных конструкций применительно к объектам ракетно-космической техники и предназначено для студентов магистратуры, обучающихся по специальностям «Ракетные комплексы и космонавтика» (24.04.01) и «Материаловедение и технологии материалов» (22.04.01) на факультете «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. В учебных планах перечисленных направлений предусмотрено изучение дисциплин «Взаимосвязь конструкторских и технологических решений», «Работа конструкций в экстремальных условиях», «Композитные материалы для особых условий работы», в рамках которых рассматриваются сетчатые композитные конструкции. Пособие может быть также полезно аспирантам, научным работникам и инженерам в области разработки и изготовления композитных конструкций. Пособие основано на практическом опыте разработки и внедрения композитных сетчатых конструкций в ракетно-космическую технику.

Цель учебного пособия — подготовить будущего специалиста к решению научных и инженерно-технических задач в области создания изделий ракетной и аэрокосмической техники из композиционных материалов, что достигается формированием представлений об основных концепциях силовых композитных и сетчатых конструкций, о методах их расчета и проектирования.

Пособие состоит из восьми глав. В первой главе описаны основные конструктивно-технологические концепции и проанализированы особенности композитных конструкций, используемых в настоящее время: подкрепленной, трехслойной и сетчатой.

Вторая глава посвящена аналитическим расчетным моделям сетчатых структур, позволяющим определить эффективные механические характеристики сетчатой структуры и использовать для расчета классическую теорию оболочек. Здесь рассмотрены сетчатые структуры различной конфигурации, приведены соотношения, позволяющие определить критические напряжения в ребрах, теряющих устойчивость между точками их пересечения.

В третьей главе приведены уравнения теории сетчатых композитных оболочек — общей теории и ее упрощенных вариантов: классической, технической и безмоментной теорий, которые используются для решения линейных и нелинейных задач статики, задач устойчивости и динамики сетчатых оболочек.

Четвертая и пятая главы посвящены расчету и проектированию цилиндрических сетчатых оболочек, работающих при сжатии и изгибе. С помощью

метода минимизации коэффициентов безопасности рассмотрено решение задачи оптимизации структуры сетчатой цилиндрической оболочки.

Шестая и седьмая главы посвящены коническим сетчатым оболочкам. В них рассмотрены расчет и проектирование оболочек минимальной массы с ограничениями по прочности, устойчивости и жесткости.

Восьмая глава посвящена вопросам проектирования тонкостенных сетчатых композитных стержней, используемых в качестве элементов космических антенн и ферменных платформ.

Основные обозначения и индексы

Обозначения

A	—	коэффициент жесткости
a	—	расстояние между ребрами структуры
B	—	мембранная жесткость; осевая жесткость
C	—	константы, коэффициенты сдвиговой жесткости
c	—	косинус угла наклона ребер к образующей оболочки
E	—	модуль упругости
e	—	деформации; расстояние от внутренней поверхности оболочки до базовой поверхности
G	—	модуль сдвига
D	—	изгибная жесткость; диаметр
H	—	крутящий момент
h	—	толщина стенки оболочки; толщина сетчатой структуры
k	—	коэффициент устойчивости в формуле Эйлера
l	—	длина
M	—	изгибающий момент; масса конструкции
m	—	изгибающий момент в ребре; относительная масса конструкции
N	—	сила или усилие
n_r	—	запас прочности по разрушению ребер
n_m	—	запас по местной устойчивости
n_0	—	запас по общей осесимметричной устойчивости
n_ϕ	—	количество спиральных ребер, проходящих через сечение оболочки
P	—	осевая сила
P_e	—	эквивалентная осевая сила
Q	—	перерезывающая сила или усилие
S	—	сдвиговая жесткость
s	—	синус угла наклона ребер к образующей оболочки
r_1	—	радиус большего основания конической оболочки
r_2	—	радиус меньшего основания конической оболочки
R	—	радиус
T	—	кинетическая энергия
u, v, w	—	перемещения
U	—	осевое перемещение сечения оболочки; потенциальная энергия
V	—	поперечное перемещение сечения оболочки
W	—	прогиб оси оболочки
x, y, z	—	координаты
α	—	осевая координата
β	—	поперечная координата или угловая координата

γ	—	деформация сдвига, угол при вершине конической оболочки
δ	—	ширина ребра
$\bar{\delta}$	—	отношение ширины ребра к расстоянию между ребрами
ε	—	линейная деформация
φ	—	угол наклона ребер к образующей оболочки
ν	—	коэффициент Пуассона; частота колебаний
θ	—	угол поворота сечения
Θ	—	угол поворота сечения оболочки
ρ	—	плотность; параметры, зависящие от радиуса для конической оболочки
σ	—	нормальные напряжения
τ	—	касательные (сдвиговые) напряжения
ω	—	круговая частота колебания; углы поворота нормали

Индексы

0	—	продольное ребро
90	—	кольцевое ребро
c^*	—	критическая сила, усилие или напряжение
r	—	ребро
φ	—	спиральное ребро

Введение

Композитные материалы, состоящие из углеродных или органических волокон и полимерной матрицы, обладают высокой удельной (по отношению к плотности) прочностью и жесткостью, что в сочетании с использованием автоматизированных технологических процессов программированной намотки и выкладки позволяет получать конструкции, обладающие высокой степенью весового совершенства и экономической эффективности.

Традиционно замена металлических сплавов на композитные материалы позволяет снизить массу конструкции на 15–20 %. В отдельных случаях сочетание высоких механических характеристик композитных материалов, соответствующих конструктивных концепций и технологических методов, позволяющих эффективно реализовывать эти характеристики, приводит к качественному улучшению технических характеристик конструкции. Концепции такого рода реализуются в сетчатых оболочках, состоящих из системы однонаправленных ребер, которые изготавливают из композитного материала методом автоматизированной непрерывной намотки. Они предназначены для восприятия сжимающих и изгибающих нагрузок высокой интенсивности. Разработанные в конце 1970-х годов в Центральном НИИ специального машиностроения (ЦНИИСМ) и находящиеся в серийном производстве сетчатые композитные конструкции удачно сочетают преимущества композитных материалов с конструктивно-технологическими решениями, что позволяет достаточно полно использовать высокую удельную прочность и жесткость материалов. Эти конструкции до настоящего времени не имеют аналогов, сравнимых с ними в классе высоконагруженных конструкций по весовой, технологической и экономической эффективности.

Оглавление

Предисловие	3
Основные обозначения	5
Введение	7
Глава 1. Основные конструктивные концепции тонкостенных конструкций	8
1.1. Подкрепленные, трехслойные и сетчатые конструкции	8
1.2. Сравнительный анализ конструктивных концепций	9
1.3. Сетчатые композитные конструкции	20
Вопросы и задания для самоконтроля	29
Глава 2. Расчетные модели сетчатых структур	30
2.1. Геометрические параметры сетчатых структур	30
2.2. Континуальная модель сетчатой структуры	33
2.3. Дискретно-континуальная модель сетчатой структуры	37
2.3.1. Коэффициенты жесткости структуры, образованной системой симметричных диагональных ребер	37
2.3.2. Коэффициенты жесткости структур, образованных системой диагональных и поперечных ребер	44
2.4. Местная форма потери устойчивости ребер сетчатой структуры ...	48
2.4.1. Структура, состоящая из диагональных и поперечных ребер, проходящих через узлы пересечения диагональных ребер	48
2.4.2. Структура, состоящая из диагональных и поперечных ребер, проходящих через середины участков диагональных ребер	54
Вопросы и задания для самоконтроля	61
Глава 3. Уравнения прикладной теории сетчатых композитных оболочек	63
3.1. Уравнения равновесия	63
3.2. Соотношения упругости	64
3.3. Коэффициенты жесткости сетчатых конструкций	66
3.4. Геометрические соотношения	68
3.5. Упрощенные варианты теории	69
3.5.1. Классическая теория	70
3.5.2. Техническая теория	71
3.5.3. Безмоментная теория	71
3.6. Обобщенные варианты теории	71
3.6.1. Нелинейная теория	72
3.6.2. Уравнения устойчивости	73
3.6.3. Уравнения динамики	74
3.7. Определение напряжений в ребрах и обшивках	75
Вопросы и задания для самоконтроля	76
Глава 4. Расчет сетчатых цилиндрических оболочек	77
4.1. Уравнения теории цилиндрических оболочек	77
4.2. Расчет цилиндрических оболочек	79
4.2.1. Расчет цилиндрических оболочек при учете осесимметричной деформации	79
4.2.2. Расчет с помощью безмоментной теории	83

4.3. Устойчивость сетчатых цилиндрических оболочек.....	88
4.3.1. Устойчивость при осевом сжатии.....	88
4.3.2. Устойчивость при изгибе	98
4.4. Динамика сетчатых цилиндрических оболочек.....	99
Вопросы и задания для самоконтроля	103
Глава 5. Проектирование сетчатых цилиндрических оболочек	104
5.1. Постановка задачи проектирования	104
5.1.1. Ограничения по прочности и жесткости	105
5.1.2. Ограничения по устойчивости	106
5.1.3. Конструктивно-технологические ограничения	107
5.2. Оптимизация структуры цилиндрической оболочки, состоящей из спиральных и кольцевых ребер	107
5.2.1. Основные соотношения	107
5.2.2. Оптимизация при ограничениях по прочности и устойчивости...	110
5.2.3. Оптимизация при ограничении по осевой жесткости.....	119
5.2.4. Оптимизация при ограничении на изгибную жесткость.....	123
5.3. Проектирование сетчатых цилиндрических оболочек со структурой изогрид.....	126
5.4. Весовая эффективность экспериментальных композитных сетчатых цилиндрических оболочек	131
5.4.1. Сравнение сетчатых и трехслойных композитных оболочек	131
5.4.2. Сравнение композитных сетчатых и металлических подкрепленных конструкций	135
Вопросы и задания для самоконтроля	137
Глава 6. Расчет сетчатых конических оболочек	138
6.1. Уравнения безмоментной теории сетчатых конических оболочек	138
6.2. Осевое нагружение конической оболочки	141
6.3. Изгиб сетчатой конической оболочки	143
6.4. Устойчивость сетчатых конических оболочек при осевом сжатии ...	145
6.5. Динамика сетчатых конических оболочек	147
Вопросы и задания для самоконтроля	150
Глава 7. Проектирование сетчатых конических оболочек	151
7.1. Определение оптимальных значений параметров сетчатых конических оболочек при ограничениях по прочности и устойчивости	151
7.2. Определение оптимальных значений параметров сетчатых конических оболочек при ограничениях по жесткости	159
Вопросы и задания для самоконтроля	161
Глава 8. Расчет и проектирование сетчатых композитных стержней.....	162
8.1. Расчет сетчатых композитных стержней.....	163
8.2. Особенности деформирования сетчатых стержней.....	166
8.3. Проектирование сетчатых стержней на основе требований по изгибной жесткости	173
8.4. Размеростабильные сетчатые стержни	175
Вопросы и задания для самоконтроля	176
Литература	177