

А.А. Смердов

**Оптимизация композитных структур
в ракетно-космической технике**

Краткий курс в тринадцати лекциях



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана

2 0 1 9

УДК 629.7-620.22
ББК 39.62:30.36
С50

Издание доступно в электронном виде по адресу
ebooks.bmstu.press/catalog/75/book1990.html

Факультет «Специальное машиностроение»
Кафедра «Космические аппараты и ракеты-носители»

Смердов, А. А.
С50 Оптимизация композитных структур в ракетно-космической технике. Краткий курс в тринадцати лекциях. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — 149, [1] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-5109-8

В курсе лекций приведены основные положения теории оптимального проектирования конструкций, рассмотрены методы проектных расчетов композитных материалов и простейших элементов конструкций, а также несущих композитных оболочек различных конструктивных схем и размеростабильных композитных космических конструкций. Представлены алгоритмы расчета типовых композитных элементов конструкций, которые могут быть самостоятельно использованы студентами при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Курс лекций предназначен для студентов старших курсов, обучающихся по специальности 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов». Материал отдельных лекций может быть также использован при изучении смежных дисциплин, таких как «Проектные расчеты композитных конструкций ракетно-космической техники», «Строительная механика ракет» и «Строительная механика космических аппаратов».

УДК 629.7-620.22
ББК 39.62:30.36

ISBN 978-5-7038-5109-8

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Предисловие

Лекции, представленные в этой книге, предназначены для студентов шестого курса, обучающихся по программе специалиста. Эти специалисты — уже почти готовые инженеры, владеющие основными приемами проведения расчетов конструкций ракетно-космической техники (РКТ). Цель данного курса — собрать воедино и отшлифовать знания, умения и навыки, относящиеся к проектным расчетам композитных элементов конструкций РКТ.

В настоящее время композитные конструкции составляют основу РКТ и в ближайшем будущем сохраняют свое значение. Чрезвычайно высокие жесткость и прочность, малая плотность, малые (вплоть до нулевых) характеристики теплового расширения, высокая способность демпфировать колебания композитов — все это обеспечивает их конкурентные преимущества перед традиционными материалами. Однако при этом не следует забывать о главном преимуществе композитных конструкций, которое в принципе отсутствует у конструкций металлических. Это возможность управления внутренней структурой материала, возможность создавать для каждой конкретной конструкции материал именно с теми свойствами, которые в данной конструкции необходимы.

В свою очередь, это означает необходимость проведения оптимизации для каждого проектируемого элемента композитной конструкции. Можно утверждать, что без оптимизации применение композитов не имеет смысла, поскольку при неудачной структуре композитная конструкция окажется хуже аналогичной металлической.

Отсюда следует необходимость для современного инженера владеть основными приемами оптимизационных расчетов композитных материалов и конструкций. Это особые расчеты. В подавляющем большинстве случаев инженер-расчетчик на предприятии использует готовые программные продукты ведущих иностранных фирм. Эти продукты реализуют метод конечных элементов, и, как правило, детали этой реализации не раскрываются конечному пользователю.

Оптимизационные расчеты, рассмотренные в данном курсе лекций, проводятся на ранних этапах проектирования, когда только определяется общий облик конструкции, выбираются рациональные конструктивные решения и анализируются материалы и структуры, которые целесообразно использовать в данной конкретной конструкции.

Главное содержание таких расчетов — сравнительный анализ различных вариантов конструкции и отбраковка тех из них, которые будут признаны неудачными, сужение круга возможных технических решений. На этом этапе оказывается бессмысленным главное преимущество конечно-элементных программных комплексов — минимальная схематизация конструкции, возможность анализировать ее со всеми усилениями, вырезами, люками и прочими конструктивными деталями. Всех этих деталей еще нет на данном этапе расчета. С другой стороны, важно учесть многообразие свойств проектируемого композитного элемента, взаимозависимость его различных характеристик, определяемых структурой материала. И, конечно, весьма важно быстрое действие используемых расчетных алгоритмов, которые должны обеспечить сравнение десятков, сотен тысяч, а может быть, и миллионов различных вариантов. Итак, современный инженер должен уметь составлять простейшие расчетные программы на основе этих простых алгоритмов и владеть всем спектром способов расчета композитных конструкций, включая приведенные в данной книге.

Курс лекций может быть использован как для аудиторной работы, так и для самообразования. Он рассчитан на 26 академических часов и разделен на четыре части. Первая часть содержит общие вопросы теории оптимального проектирования. Во второй части представлена оптимизация композитных материалов. Третья часть посвящена проектным расчетам композитных стержней и оболочек. Проектные расчеты композитных конструкций РКТ представлены в четвертой части. Не все лекции потребуют одинаковых затрат времени: на усвоение некоторых тем потребуются больше времени, на других можно будет сэкономить. Для закрепления материала рекомендуется выполнить домашнее задание. Методические указания по его выполнению приведены в списке литературы, типовые варианты с ответами — в приложении.

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Лекция 1. Иерархия проектных задач. **Скалярная и векторная оптимизация**

Теория оптимального проектирования конструкций (ОПК) насчитывает уже несколько сотен лет. Задачи оптимального проектирования ставились Г. Галилеем, Ж.Л. Лагранжем и другими великими учеными прошлых времен. Однако наибольшее развитие теория ОПК получила в последней трети XX в., и прежде всего с появлением мощной вычислительной техники и развитием эффективных численных методов оптимизации. В настоящее время поддается решению почти любая из задач ОПК. Тем важнее становится квалификация специалиста, способного правильно сформулировать задачу и умело провести анализ полученного решения.

В рамках данного курса мы можем лишь вкратце коснуться проблем оптимального проектирования композитных конструкций, дать основные понятия и определения. Более подробная информация доступна в учебном пособии [1] или специальных монографиях [2–4].

Говоря простыми словами, сформулировать задачу ОПК — значит последовательно ответить на три вопроса.

1. Что мы оптимизируем?

Ответ: выбор объекта оптимизации.

2. Что и как можно изменить в оптимизируемом объекте для того, чтобы улучшить его?

Ответ: выбор варьируемых параметров.

3. Какова цель оптимизации (чем хороший проект должен отличаться от плохого)?

Ответ: выбор критериев качества.

Выбор оптимизируемого объекта — это прежде всего выделение его из более общей системы, подсистемой которой он является. Грамотно выделить объект — значит выявить все связи

Лекция 2. Аналитические решения оптимизационных задач. Оптимизация сжатой стойки

Аналитические решения задач ОПК — большая редкость. Тем не менее изучать аналитические решения необходимо для того, чтобы на простых и ясных примерах усвоить закономерности исследования, которое в дальнейшем придется проводить численно.

Цикл задач оптимизации с аналитическими решениями подобран в учебном пособии [1]. Здесь рассмотрена простейшая из этих задач — оптимизация сжатой стойки из изотропного материала без ограничений.

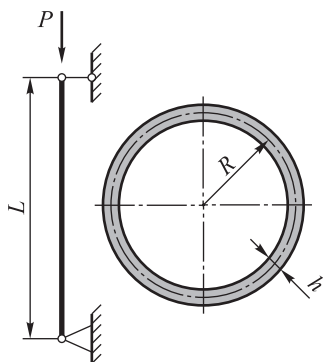


Рис. 2.1. Оптимизация сжатой стойки

Объект оптимизации изображен на рис. 2.1 и представляет собой прямолинейный стержень длиной L с тонкостенным трубчатым сечением, нагруженный осевой сжимающей силой P . Стержень выполнен из однородного изотропного линейно упругого материала. Граничные условия на торцах соответствуют шарнирному опиранию (несложно рассмотреть аналогичную задачу и при других вариантах граничных условий).

Варьируемыми параметрами являются радиус стержня R и толщина стенки h :

$$\mathbf{X} = \{R, h\}, \quad (2.1)$$

причем из условия тонкостенности

$$R \gg h \quad (2.2)$$

следует, что можно не делать разницы между средним, внешним и внутренним радиусами. Для простоты не будем накладывать никаких ограничений на диапазоны варьирования параметров (такие ограничения рассмотрены в работе [1]):

$$R \in (0, \infty); h \in (0, \infty), \quad (2.3)$$

2. ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Лекция 3. Многослойный пакет как объект оптимизации. Оптимизация жесткостных и термдеформационных характеристик композитов

Задачи проектирования композитных материалов дают необходимый для проектирования сложных композитных конструкций опыт. Вместе с тем во многих случаях требования к композитной конструкции формулируются как требования к свойствам ее материала. Особенно ценные знания приносит исследование предельных возможностей материалов, позволяющее понять, чего можно добиться от того или иного композита применительно к каждому конкретному классу конструкций.

Свойства любого традиционного материала можно определить набором констант. В отличие от таких материалов, проектируемый композит представляет собой материал с варьируемой внутренней структурой. Целенаправленно изменяя структурные параметры композитного материала, можно управлять его свойствами. Характеристикой свойств такого материала являются уже не константы, а зависимости, связывающие предельно возможные требования к жесткости, прочности и другим свойствам структур, которые могут быть построены на базе данного материала.

При оптимизации любого типа композитной структуры должна быть составлена модель макрооднородного материала с приведенными (эффективными) характеристиками. Эти характеристики зависят как от свойств компонентов композитного материала, так и от его структурных параметров, определяющих соотношения между этими компонентами, их взаимное расположение и т. п. При этом свойства компонентов композита считаются неизменными, а структурные параметры можно варьировать при поиске оптимального проекта, обеспечивая требуемое изменение его характеристик.

лютной величины КЛТР). На этой основе создаются космические размеростабильные конструкции, которые будут рассмотрены в последней лекции курса.

Лекция 4. Оптимизация характеристик прочности

Расчет прочности композитов — весьма сложная задача. В настоящее время в мире существует множество разных подходов и созданных на их базе методик и алгоритмов расчета прочности многослойного композита, причем во многих случаях эти алгоритмы приводят к существенно различающимся результатам.

Дело в том, что процесс разрушения материала с произвольным армированием может быть многостадийным, так что само понятие прочности каждый раз приходится формулировать заново применительно к данным условиям нагружения и требованиям к композитному объекту.

Жизненный цикл композитной конструкции можно охарактеризовать последовательностью расчетных случаев, в каждом из которых на нее действуют различные нагрузки. При расчете напряженно-деформированного состояния конструкции формулируются требования к прочности материала в выбранных опасных точках. Мы ограничимся плоской задачей для материала. Будем полагать нагружение пропорциональным [15], тогда средние напряжения в пакете σ_x , σ_y , τ_{xy} возрастают пропорционально значению *параметра нагрузки* P :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = P \begin{Bmatrix} \sigma_x^{(0)} \\ \sigma_y^{(0)} \\ \tau_{xy}^{(0)} \end{Bmatrix}, \quad (4.1)$$

где $\sigma_x^{(0)}$, $\sigma_y^{(0)}$, $\tau_{xy}^{(0)}$ — *начальные напряжения*, заданные значения, показывающие соотношения между величинами σ_x , σ_y и τ_{xy} в данном расчетном случае. При таком подходе расчет на прочность сводится к определению значения параметра P , соответствующего предельному состоянию материала.

Далее в зависимости от требований к конструкции может быть использован один из двух основных подходов к расчету прочности композитов [15]:

3. ПРОЕКТНЫЕ РАСЧЕТЫ КОМПОЗИТНЫХ СТЕРЖНЕЙ И ОБОЛОЧЕК

Лекция 5. Основные подходы к расчету композитных элементов конструкций. Принцип минимума полной потенциальной энергии и его использование в задачах статики

Решение задач механики для композитных элементов конструкций во многих случаях отличается от привычного использования классических теорий стержней, пластин и оболочек.

В общем виде объект исследования — механическая система — представлен на рис. 5.1. Она включает упругое тело, закрепленное в пространстве с помощью системы жестких или упругих

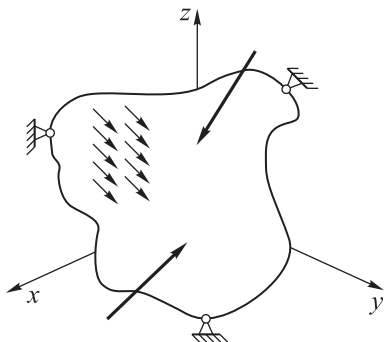


Рис. 5.1. Механическая система под нагрузкой

связей и нагруженное системой распределенных и сосредоточенных нагрузок. Объект рассматривается в неподвижной декартовой системе координат x, y, z , оси которой в дальнейшем будем называть осями конструкции (в отличие от осей естественных систем координат отдельных слоев).

Внешние силы подразделяют на объемные, непрерывно распределенные по объему тела, и поверхностные, которые распределены по поверхности границы

тела. Частным случаем последних являются сосредоточенные нагрузки. Объемные нагрузки задают функциями $X(x, y, z)$, $Y(x, y, z)$ и $Z(x, y, z)$, которые описывают силы, действующие в направлении соответствующих координатных осей, поверхностные — соответствующими функциями $p_x(x, y, z)$, $p_y(x, y, z)$ и $p_z(x, y, z)$.

Четыре константы $c_1 \dots c_4$ находят из четырех граничных условий на торцах стержня.

Сравнивая решения, полученные по формулам (5.30) и (5.45), можно констатировать, что при расчете по схеме Тимошенко прогиб получается несколько больше, чем при использовании гипотез Бернулли, поскольку последние завышают жесткость стержня.

Расхождение между значениями перемещений определяется так называемой поправкой Тимошенко

$$\frac{\xi EI}{L^2 GF}, \quad (5.46)$$

где ξ — численный коэффициент, значение которого зависит от конкретных граничных условий. Если эта поправка значительно меньше единицы, расчет по гипотезам Бернулли не приведет к большой потере точности. Это возможно в случае, когда значения продольного модуля упругости и модуля сдвига не слишком сильно различаются между собой, а также в тех случаях, когда длина стержня очень велика. Если есть сомнения в выполнении этих условий, следует использовать гипотезы Тимошенко.

Лекция 6. Проектные параметры композитных стержней и оболочек. Анализ жесткостных, термоупругих и прочностных характеристик

Задачи оптимального проектирования композитных элементов конструкций, даже таких простых, как цилиндрические стержни и оболочки, обычно более сложны, чем задачи оптимального проектирования композитных материалов. С одной стороны, это обусловлено большим числом варьируемых параметров, которые теперь включают размеры элементов и абсолютные, а не относительные величины толщин слоев, с другой — более сложным характером критериев качества. Так, часто необходимо знать характеристики многослойной стенки не только при мембранном деформировании, но и при изгибе; несущая способность наряду с прочностью может определяться устойчивостью; во многих случаях приходится рассчитывать динамические характеристики и т. д.

$$\begin{aligned}\sigma_x^{(0)} &= -\frac{N}{2\pi RH}; \\ \sigma_y^{(0)} &= 0; \\ \tau_{xy}^{(0)} &= 0.\end{aligned}\tag{6.8}$$

Коэффициент запаса численно равен значению параметра нагрузки, определяемому согласно формулам (4.4)–(4.8) с учетом соотношений (6.8).

Лекция 7. Анализ устойчивости композитных стержней

Краткость данного курса не дает возможности подробно остановиться на исследовании явления потери устойчивости. Отметим лишь, что наиболее удобным инструментом такого исследования для композитных элементов конструкций является энергетический подход, подробно описанный в работе [21]. Этот подход базируется на *принципе минимума полной потенциальной энергии*.

Применение этого принципа в задачах устойчивости отличается от его использования для решения задач статики.

Как было показано выше, если используется линейная связь между перемещениями и деформациями (5.2), то положение равновесия механической системы является единственным.

Это остается справедливым, пока нагрузки невелики. Однако с увеличением нагрузок растут и перемещения, и линейная связь между ними и деформациями может оказаться недостаточно точной. Тогда используют квадратичные зависимости (5.1). При этом дифференциальные уравнения становятся нелинейными, и может возникнуть ситуация, когда исходное положение равновесия перестает быть единственным. На этом основан *бифуркационный критерий упругой устойчивости* [21].

В соответствии с этим критерием полагают, что вследствие некоторых случайных причин система переходит из исходного состояния равновесия в некоторое смежное состояние, характеризующееся дополнительными — *бифуркационными* — перемещениями u , v , w , отсчитываемыми от исходного положения равновесия (они считаются малыми величинами первого порядка малости). Этим

Лекция 8. Анализ устойчивости композитных оболочек

Объект исследования — многослойная тонкостенная цилиндрическая оболочка — представлен на рис. 8.1, *a*. Оболочка нагружена осевой силой N , равномерно распределенной по периметру, и боковым давлением p , равномерно распределенным по всей боковой поверхности (полагается, что нагрузки возрастают пропорционально одному параметру). Положительные направления нагрузок как обычно принимают растягивающими. Этим нагрузкам соответствуют внутренние погонные силы в координатной плоскости:

$$\begin{aligned} T_x^{(0)} &= \frac{N}{2\pi R}; \\ T_y^{(0)} &= pR; \\ T_{xy}^{(0)} &= 0. \end{aligned} \quad (8.1)$$

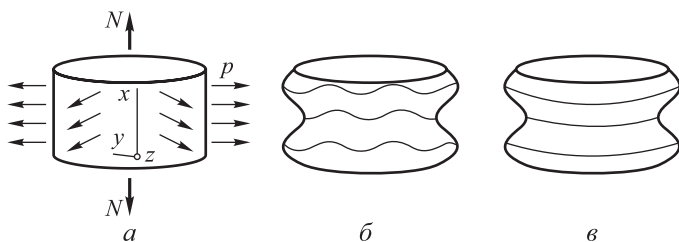


Рис. 8.1. Цилиндрическая оболочка под нагрузкой (*a*) и ее формы потери устойчивости: неосесимметричные (*b*) и осесимметричные (*в*)

Исходное состояние с идеальной цилиндрической координатной поверхностью при любых нагрузках остается равновесным, но не всегда единственным и не всегда устойчивым. Для нахождения точек бифуркации предположим, что вследствие неких случайных причин координатная поверхность получила отклонения, определяемые бифуркационными перемещениями первого порядка малости $u(x, y)$, $v(x, y)$ и $w(x, y)$.

Будем считать при деформировании оболочки справедливыми гипотезы Кирхофа — Лява [13]. Согласно этим гипотезам, нормаль к координатной поверхности при деформировании остается пря-

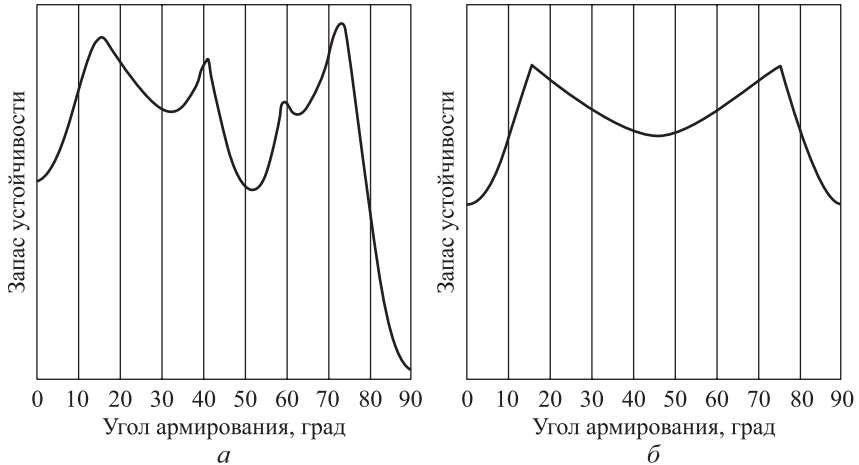


Рис. 8.2. Устойчивость цилиндрической оболочки небольшой длины (а) и длинного цилиндрического стержня (б)

в домашнем задании. Средняя часть этого графика соответствует осесимметричным формам потери устойчивости, а крайние части — неосесимметричным.

Лекция 9. Динамические характеристики композитных элементов в проектных расчетах

Задачи динамики ракетно-космических конструкций сложны и многообразны; их изучают в специальных курсах. В данном курсе рассмотрен только один аспект исследования проблем динамики — расчет частот собственных колебаний композитных элементов конструкций.

При проектировании композитных элементов во многих случаях задают ограничения на собственные частоты, позволяющие избежать резонансов. Возможны также задачи максимизации низших частот собственных колебаний. Кроме того, знание частот и форм колебаний необходимо для расчета характеристик демпфирования, которые рассмотрены в лекции 10.

Для использования принципа минимума полной потенциальной энергии в задачах динамики его следует дополнить принципом д'Аламбера, известным из курса теоретической механики. Прин-

ня достаточно большой длины от угла армирования. Видно, что разница в расчетных подходах сказывается только в небольшой зоне малых углов, где отношение продольного модуля упругости к модулю сдвига особенно велико. Однако для высших тонов колебаний, когда длина волны уменьшается, разность между собственными частотами, рассчитанными по формулам (9.26) и (9.33), становится существенной во всем диапазоне изменения углов.

Аналогичным образом выражение (9.1) с учетом (9.5) может быть использовано для расчета собственных частот композитных пластин, панелей и оболочек.

Лекция 10. Управление характеристиками демпфирования композитных элементов

Среди многих выдающихся качеств композитов присутствует и отличающая их от традиционных материалов высокая способность гасить вибрации. Рассеяние энергии при колебаниях происходит всегда. Однако соответствующие характеристики металлов настолько малы, что обычно рекомендуют пренебрегать демпфированием в материале по сравнению с демпфированием в соединениях [25]. С композитами ситуация иная. Их диссипативные характеристики могут на два порядка превосходить соответствующие характеристики металлов [15, 20, 26], так что пренебрегать демпфированием в композитных элементах нельзя. Главное их преимущество заключается в возможности управления способностью гасить вибрации путем целенаправленного изменения внутренней структуры композита.

Рассмотрим эти вопросы подробнее. До сих пор мы считали механическую систему консервативной, но теперь придется отказаться от этого допущения. Наиболее простой подход заключается в том, что при описании свободных затухающих колебаний сохраняется линейная зависимость между напряжениями и деформациями, однако наряду с упругими константами вводятся также независимые диссипативные константы материала (логарифмические декременты колебаний, относительные коэффициенты рассеяния и т. п.). Таким образом, сначала определяются частоты и формы колебаний консервативной системы, а затем используются урав-

4. ПРОЕКТНЫЕ РАСЧЕТЫ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Лекция 11. Принципы расчета трехслойных элементов. Проектные расчеты трехслойных композитных оболочек

Трехслойные конструкции — одна из наиболее используемых сегодня конструктивных схем композитных изделий РКТ. Их применяют в случаях, когда требуется воспринимать сжимающие нагрузки или обеспечить высокую изгибную жесткость.

Основная идея создания трехслойной конструкции — та же, что и у профилей типа швеллера или двутавра [14]: за счет сравнительно небольшой добавки массы резко повысить изгибную жесткость элемента. Для этого многослойный пакет делят пополам и в середину вставляют довольно толстый слой заполнителя из легкого, но не жесткого материала (в ответственных конструкциях РКТ обычно используют соты из алюминиевой фольги). При этом жесткость на растяжение-сжатие не повышается, так что при растягивающих нагрузках использовать трехслойные конструкции не имеет смысла.

Основные элементы трехслойной конструкции — многослойные композитные обшивки и заполнитель — показаны на рис. 11.1, где приведены и основные обозначения.

В дальнейшем будем считать, что обшивки ортотропны, одинаковы и расположены симметрично относительно срединной поверхности за-

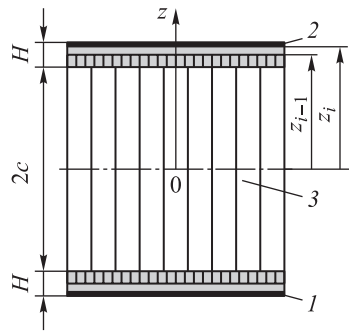


Рис. 11.1. Трехслойный элемент:

1, 2 — обшивки; 3 —
заполнитель

$$a_{45} = a_{54} = \lambda_m \lambda_n (B_{xy} + B_{ss});$$

$$a_{55} = \lambda_m^2 B_{ss} + \lambda_n^2 B_{yy} + \frac{G_{yz}^{(3)}}{c};$$

$$b_{33} = \frac{1}{2} (\lambda_m^2 T_x^{(0)} + \lambda_n^2 T_y^{(0)}).$$

Здесь изгибные жесткости одной (внешней) обшивки относительно срединной поверхности заполнителя D_{xx} , D_{xy} , D_{yy} , D_{ss} рассчитывают по формулам (8.9), смешанные жесткости C_{xx} , C_{xy} , C_{yy} , C_{ss} — согласно зависимостям (8.8), мембранные жесткости B_{xx} , B_{xy} , B_{yy} , B_{ss} — по формулам (8.7).

Расчет устойчивости оболочки проводят путем перебора целочисленных значений параметров волнообразования слоев m (число полуволн в осевом направлении оболочки) и n (число волн по окружности): $m = 1, 2, 3, \dots$ и $n = 0, 2, 3, \dots$. Для каждой собственной формы решают линейное уравнение (11.28) и определяют собственное значение P_{mn} . Среди собственных значений находится минимальное, соответствующее критической нагрузке [21].

При расчете реальных оболочек, имеющих различного рода несовершенства, критические значения нагрузок умножают на понижающие коэффициенты [21, 23] в соответствии с выражением (8.14). Для трехслойных оболочек $k_{уст}$ могут достигать значений 0,6...08 и более [13, 23, 28].

Проектный расчет устойчивости трехслойной оболочки должен быть дополнен расчетом ее на прочность, а также анализом местной устойчивости, о котором рассказано в лекции 12.

Лекция 12. Проектные расчеты подкрепленных, сетчатых и ферменных композитных конструкций.

Местная устойчивость

Традиционные подкрепленные конструкции — клепаные стрингерные и шпангоутные оболочки отсеков и обтекателей из алюминиевых сплавов — в сегодняшней РКТ полностью вытеснены композитными изделиями. Однако идея создания конструкций, в которых основную нагрузку воспринимают или помогают вос-

ных заполнителей из алюминиевой фольги), местная потеря устойчивости обычно происходит по осесимметричным формам ($n = 0$), которыми при проектных расчетах можно и ограничиться.

Наименьшее из найденных положительных значений P_{mn} следует умножить на коэффициент устойчивости в соответствии с формулой (8.14), при этом значение коэффициента $k_{уст}$ можно увеличить, поскольку поддерживающее влияние заполнителя ослабляет отрицательный эффект от начальных несовершенств формы.

В заключение отметим, что все варианты подкрепленных и ферменных конструкций могут конкурировать между собой и с трехслойными оболочками, поэтому для выбора оптимальной конструктивной схемы в каждом случае следует проводить их сравнительную оптимизацию с учетом общей, местной устойчивости и прочности.

Лекция 13. Расчет размеростабильных композитных конструкций космической техники

Все твердые тела реагируют на изменение температуры, однако для некоторых композитных структур эту реакцию можно уменьшить практически до нуля. Благодаря этому свойству за последние 20 лет созданы и создаются новые композитные конструкции, основным качеством которых является так называемая размеростабильность, т. е. способность с высокой точностью сохранять свои размеры при различных воздействиях окружающей среды.

Эти воздействия могут включать в себя и изменение влажности, и действие различных излучений и других факторов космического пространства, но в первую очередь речь идет об изменении температуры. К таким конструкциям относятся крупногабаритные космические антенны, платформы и другие несущие конструкции для размещения высокоточной аппаратуры, корпуса спутниковых телескопов и фотоаппаратов.

На рис. 13.1 представлены некоторые примеры размеростабильных композитных конструкций, созданных с участием специалистов МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Несущая конструкция космического радиотелескопа (рис. 13.1, а) представляет собой оболочку, состоящую из отдельных лепестков и центрального зеркала. Каждый лепесток, в свою очередь, имеет трехслойную оболочку и несущий каркас из угле-

Литература

1. *Смердов А.А.* Основы оптимального проектирования композитных конструкций. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 88 с.
2. *Баничук Н.В.* Введение в оптимизацию конструкций. М.: Наука, 1986. 304 с.
3. *Баничук Н.В., Кобелев В.В., Рикардс Р.Б.* Оптимизация элементов конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 224 с.
4. *Нарусберг В.Л., Тетерс Г.А.* Устойчивость и оптимизация оболочек из композитов. Рига: Зинатне, 1988. 299 с.
5. *Аттетков А.В., Галкин С.В., Зарубин В.С.* Методы оптимизации. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 440 с.
6. *Химмельблау Д.* Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 534 с.
7. *Хог Э., Арора Я.* Прикладное оптимальное проектирование: механические системы и конструкции. М.: Мир, 1983. 478 с.
8. *Банди Б.* Методы оптимизации: вводный курс. М.: Радио и связь, 1988. 128 с.
9. *Растрингин Л.А.* Статистические методы поиска. М.: Наука, 1968. 376 с.
10. *Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М.* Генетические алгоритмы. М.: Физматлит, 2006. 320 с.
11. *Панченко Т.В.* Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие. Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. 87 с.
12. *Борисов В.И.* Проблемы векторной оптимизации. В кн.: Исследование операций. М.: Наука, 1972. С. 72–91.
13. *Балабух Л.И., Алфутов Н.А., Усюкин В.И.* Строительная механика ракет. М.: Высшая школа, 1984. 391 с.
14. *Феодосьев В.И.* Сопротивление материалов: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 543 с.
15. *Зиновьев П.А., Смердов А.А.* Оптимальное проектирование композитных материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 103 с.

16. *Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г.* Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
17. *Hinton M.J., Kaddour A.S., Soden P.D.* Failure Criteria in Fibre Reinforced Polymer Composites: The World-Wide Failure Exercise. Amsterdam: Elsevier Science, 2004. 700 p.
18. *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.
19. *Смердов А.А.* Анализ оптимальных структур композитных стержней: методические указания к выполнению домашнего задания. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 44 с.
20. Композиционные материалы: справочник / под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. С. 232–267.
21. *Алфутов Н.А.* Основы расчета на устойчивость упругих систем. М.: Машиностроение, 1991. 336 с.
22. *Эльсгольц Л.Э.* Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Книга по требованию, 2012. 424 с.
23. *Васильев В.В.* Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
24. *Светлицкий В.А.* Механика стержней. В 2 ч. Ч. II. Динамика. М.: Высшая школа, 1987. 304 с.
25. *Бидерман В.Л.* Теория механических колебаний. 3-е изд., доп. М.: URSS, 2017. 416 с.
26. *Zinoviev P.A., Ermakov Y.N.* Energy Dissipation in Composite Materials. Lancaster (USA): Technomic Publishing Co., 1994. 246 p.
27. *Григолюк Э.И., Чулков П.П.* Устойчивость и колебания трехслойных оболочек. М.: Машиностроение, 1973. 172 с.
28. *Лизин В.Т., Пяткин В.А.* Проектирование тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 2003. 448 с.
29. *Смердов А.А.* Возможности повышения местной устойчивости подкрепленных и интегральных композитных конструкций // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. Вып. 10. С. 77–86.

Приложение

Типовые варианты домашних заданий с ответами

Проектируется цилиндрический трубчатый стержень из углепластика длиной L и радиусом R . Стержень должен быть образован намоткой одного семейства перекрестно армированных слоев и иметь толщину h . Постройте графики требуемых характеристик и определите диапазон допустимых углов намотки исходя из предъявляемых к конструкции требований.

Расчеты проведите в соответствии со следующими требованиями.

1. Используйте формулы для тонкостенного стержня.
2. При нагружении стержня необратимое деформирование не допускается.
3. При расчетах следует принимать коэффициент местной (оболочечной) устойчивости равным 0,3.
4. Термическое деформирование ограничено только в положительную сторону; отрицательные КЛТР допускаются.
5. Диапазоны углов определите с точностью до $0,1^\circ$.
6. При расчетах используйте следующие характеристики однонаправленного углепластика.

Характеристика	Материал 1	Материал 2
Модуль упругости, ГПа:		
в направлении армирования	180,00	280,00
в поперечном направлении	9,00	6,50
Модуль сдвига в плоскости монослоя, ГПа	4,40	4,00
Коэффициент Пуассона	0,31	0,32
Предел прочности, МПа:		
при растяжении в направлении армирования	2200	1800
при сжатии в направлении армирования	900	700
при растяжении в поперечном направлении	60	40
при сжатии в поперечном направлении	180	160
при сдвиге	60	35

Окончание таблицы

Характеристика	Материал 1	Материал 2
Коэффициент линейного расширения, K^{-1} : в направлении армирования в поперечном направлении	$-0,2 \cdot 10^{-6}$ $25 \cdot 10^{-6}$	$-0,6 \cdot 10^{-6}$ $30 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент поглощения энергии, %: в направлении армирования в поперечном направлении при сдвиге	0,55 5,50 6,40	0,40 3,20 4,60
Плотность, $кг/м^3$	1500	1550

Вариант 1

Материал	L , м	R , мм	h , мм
1	1,1	40	1,2

Требования к конструкции:

- изгибная жесткость стержня не менее $12 \text{ кН} \cdot \text{м}^2$;
- продольный коэффициент линейного расширения не более $4 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$;
- низшая частота крутильных колебаний не менее 1800 Гц;
- коэффициент диссипации при изгибных колебаниях на низшей частоте не менее 3 %;
- необходимость обеспечения несущей способности при нагрузке осевого сжатия 50 кН.

Вариант 2

Материал	L , м	R , мм	h , мм
2	0,8	20	0,8

Требования к конструкции:

- крутильная жесткость стержня не менее $1,2 \text{ кН} \cdot \text{м}^2$;
- продольное перемещение торцов при нагреве на 50 К не более 0,025 мм;
- низшая частота изгибных колебаний не менее 150 Гц;
- коэффициент диссипации при изгибных колебаниях на низшей частоте не менее 2 %;

– необходимость обеспечения несущей способности при нагрузке осевого сжатия 20 кН.

Вариант 3

Материал	L , м	R , мм	h , мм
1	1,1	35	0,8

Требования к конструкции:

- изгибная жесткость стержня не менее $3 \text{ кН} \cdot \text{м}^2$;
- продольное перемещение торцов при нагреве на 50 К не более 0,01 мм;
- низшая частота продольных колебаний не менее 2200 Гц;
- коэффициент диссипации при изгибных колебаниях на низшей частоте не менее 3,5 %;
- необходимость обеспечения несущей способности при нагрузке осевого сжатия 22 кН.

Вариант 4

Материал	L , м	R , мм	h , мм
2	2,2	45	1,8

Требования к конструкции:

- продольная жесткость стержня не менее 50 МН;
- продольное перемещение торцов при нагреве на 50 К не более 0,05 мм;
- низшая частота крутильных колебаний не менее 900 Гц;
- коэффициент диссипации при продольных колебаниях не менее 1,2 %;
- необходимость обеспечения несущей способности при нагрузке осевого сжатия 120 кН.

Вариант 5

Материал	L , м	R , мм	h , мм
1	1,4	40	0,8

Требования к конструкции:

- продольная жесткость стержня не менее 24 МН;

- продольный коэффициент линейного расширения не более $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;
- низшая частота изгибных колебаний не менее 180 Гц;
- коэффициент диссипации при крутильных колебаниях не менее 1,6 %;
- необходимость обеспечения несущей способности при нагрузке осевого сжатия 24 кН.

Вариант 6

Материал	L , м	R , мм	h , мм
1	1,2	25	1,0

Требования к конструкции:

- изгибная жесткость стержня не менее $2,5 \text{ кН} \cdot \text{м}^2$;
- продольное перемещение торцов при нагреве на 50 К не более 0,04 мм;
- низшая частота изгибных колебаний не менее 120 Гц;
- мощность диссипации при изгибных колебаниях на низшей частоте не менее 300 %/с;
- необходимость обеспечения несущей способности при нагрузке осевого сжатия 25 кН.

Ответы к приведенным вариантам домашних заданий

Указаны диапазоны допустимых углов исходя из требований по жесткости (1), КЛТР (2), частотам (3), демпфированию (4), прочности (5), устойчивости стержня (6) и устойчивости оболочки (7), а также итоговый диапазон допустимых углов.

Вариант 1. $0...30,2^\circ$ (1), $0...48,0^\circ$ (2), $21,3...68,7^\circ$ (3), $25,7...90,0^\circ$ (4), $0...37,9^\circ$ и $69,5...90,0^\circ$ (5), $0...38,2^\circ$ (6), $11,2...31,5^\circ$ и $58,5...78,8^\circ$ (7). Итого: $25,7...30,2^\circ$.

Вариант 2. $19,2...70,8^\circ$ (1), $0...45,2^\circ$ (2), $0...36,4^\circ$ (3), $22,1...90,0^\circ$ (4), $0...28,5^\circ$ (5), $0...28,0^\circ$ (6), $7,3...82,7^\circ$ (7). Итого: $22,1...28,0^\circ$.

Вариант 3. $0...37,1^\circ$ (1), $0...43,6^\circ$ (2), $0...34,3^\circ$ (3), $28,0...90,0^\circ$ (4), $0...43,8^\circ$ и $62,3...90,0^\circ$ (5), $0...38,4^\circ$ (6), $11,0...32,5^\circ$ и $57,5...79,0^\circ$ (7). Итого: $28,0...32,5^\circ$.

Вариант 4. $0...23,9^\circ$ (1), $0...45,0^\circ$ (2), $16,7...73,3^\circ$ (3), $16,8...90,0^\circ$ (4), $0...26,8^\circ$ (5), $0...22,2^\circ$ (6), $9,3...80,7^\circ$ (7). Итого: $16,8...22,2^\circ$.

Вариант 5. $0...18,6^\circ$ (1), $0...43,5^\circ$ (2), $0...21,8^\circ$ (3), $0...17,9^\circ$ и $72,1...90,0^\circ$ (4), $0...45,2^\circ$ и $60,6...90,0^\circ$ (5), $0...36,2^\circ$ (6), $9,2...80,8^\circ$ (7). Итого: $12,4...17,9^\circ$.

Вариант 6. $0...30,0^\circ$ (1), $0...44,2^\circ$ (2), $0...28,3^\circ$ (3), $19,7...59,0^\circ$ (4), $0...38,6^\circ$ и $68,6...90,0^\circ$ (5), $0...25,3^\circ$ (6), $5,4...84,6^\circ$ (7). Итого: $19,7...25,3^\circ$.

Оглавление

Предисловие	3
1. Общие вопросы теории оптимального проектирования ...	5
<i>Лекция 1.</i> Иерархия проектных задач. Скалярная и векторная оптимизация	5
<i>Лекция 2.</i> Аналитические решения оптимизационных задач. Оптимизация сжатой стойки	18
2. Оптимизация композитных материалов	26
<i>Лекция 3.</i> Многослойный пакет как объект оптимизации. Оптимизация жесткостных и термомодеформационных характеристик композитов	26
<i>Лекция 4.</i> Оптимизация характеристик прочности	39
3. Проектные расчеты композитных стержней и оболочек	52
<i>Лекция 5.</i> Основные подходы к расчету композитных элементов конструкций. Принцип минимума полной потенциальной энергии и его использование в задачах статики	52
<i>Лекция 6.</i> Проектные параметры композитных стержней и оболочек. Анализ жесткостных, термоупругих и прочностных характеристик	66
<i>Лекция 7.</i> Анализ устойчивости композитных стержней	71
<i>Лекция 8.</i> Анализ устойчивости композитных оболочек	79
<i>Лекция 9.</i> Динамические характеристики композитных элементов в проектных расчетах	86
<i>Лекция 10.</i> Управление характеристиками демпфирования композитных элементов	95
4. Проектные расчеты композитных конструкций ракетно-космической техники	105
<i>Лекция 11.</i> Принципы расчета трехслойных элементов. Проектные расчеты трехслойных композитных оболочек	105

<i>Лекция 12.</i> Проектные расчеты подкрепленных, сетчатых и ферменных композитных конструкций. Местная устойчивость	115
<i>Лекция 13.</i> Расчет размеростабильных композитных конструкций космической техники	127
Литература	141
<i>Приложение.</i> Типовые варианты домашних заданий с ответами	143
Ответы к приведенным вариантам домашних заданий	147

Учебное издание

Смердов Андрей Анатольевич

Оптимизация композитных структур в ракетно-космической технике

Редактор *Л.Т. Мартыненко*

Художники *Я.М. Асинкритова, Э.Ш. Мурадова*

Корректор *Ю.Н. Морозова*

Компьютерная верстка *Т.В. Батраковой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 15.04.2019. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 9,375. Тираж 300 экз. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
baumanprint@gmail.com