

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Н.Э. БАУМАНА

А.А. Смердов

ОСНОВЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия по курсу «Проектирование
композитных конструкций. Часть I» для студентов высших
учебных заведений, обучающихся по направлению
подготовки 652600 «Ракетостроение и космонавтика»,
специальностям 130600 «Ракетостроение» и 130700
«Космические летательные аппараты и разгонные блоки»*

Москва
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
2006

УДК 620.22-419.8(075.8)

ББК 34.42:30.36

С35

Рецензенты: *В.А. Бунаков, Б.Г. Попов*

Смердов А.А.

С35 Основы оптимального проектирования композитных конструкций:
Учебное пособие по курсу «Проектирование композитных конструкций.
Ч. I». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 88 с.: ил.

ISBN 5-7038-2838-4

Изложены основы теории оптимального проектирования композитных материалов и конструкций. Описана иерархия задач оптимального проектирования. На примере оптимизации сжатой стойки проведено аналитическое исследование проектных задач.

Для студентов старших курсов высших технических учебных заведений, изучающих механику композитных материалов и методы проектирования конструкций из них.

Ил. 15. Библиогр. 24 назв.

УДК 620.22-419.8(075.8)

ББК 34.42:30.36

Андрей Анатольевич Смердов

ОСНОВЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Учебное пособие

Редактор *С.А. Серебрякова*

Корректор *М.А. Василевская*

Компьютерная верстка *В.И. Товстоног*

Подписано в печать 20.02.2006. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.

Печ. л. 5,5. Усл. печ. л. 5,12. Уч.-изд. л. 5,45.

Тираж 200 экз. Изд. № 154. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.

105005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

ISBN 5-7038-2838-4

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование конструкций — творческий процесс. Он включает в себя элементы научного знания и плоды инженерной интуиции, опыт и традиции конкретного предприятия и многое другое. В рамках данного курса нас будет интересовать лишь научная сторона этого процесса, а именно: как с помощью математических методов выбрать параметры той или иной конструкции таким образом, чтобы конструкция эта была наилучшей, т. е. *оптимальной*. Исходя из этого понятия «проектирование», «оптимальное проектирование» и «оптимизация» в этом курсе мы будем употреблять в одинаковом смысле.

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

Задачи оптимального проектирования композитных конструкций имеют ряд особенностей, позволяющих выделить их в самостоятельный класс. К таким особенностям относятся:

- значительное увеличение числа и типа варьируемых параметров;
- взаимообусловленность и взаимозависимость всех свойств проектируемого изделия;

- появление «нетрадиционных» задач и возможность проектирования конструкций с уникальными свойствами;
- возможность проектирования материалов;
- опасность отказа традиционной инженерной интуиции.

Рассмотрим эти особенности подробнее.

В традиционных конструкциях мы можем *варьировать* (т. е. изменять при оптимизации) размеры отдельных элементов, число и тип этих элементов. При проектировании композитных изделий наряду с этим появляется возможность варьировать структурные параметры материала — толщины отдельных слоев, углы их ориентации, соотношения между армирующим материалом и связующим и т. п. С одной стороны, это усложняет и формулировку, и решение задач ОПК, с другой — позволяет во многих случаях значительно улучшить характеристики проектируемой конструкции.

С варьированием внутренней структуры материала связана и вторая из перечисленных особенностей. При проектировании традиционных конструкций мы, как правило, могли следить лишь за теми их характеристиками, которые представляют для проектанта наибольший интерес (для несущих конструкций ракетно-космической техники это обычно масса и несущая способность). Если же варьируется внутренняя структура анизотропных материалов, то наряду с улучшением требуемых характеристик могут возникнуть самые неожиданные эффекты, например, связанные с появлением новых механизмов разрушения, особенностями деформирования конструкции при силовом и тепловом нагружении, ее теплопроводностью и т. д. Таким образом, свойства композитных конструкций нужно рассматривать в комплексе: необходимо следить, чтобы улучшение одних свойств не приводило к недопустимому ухудшению других.

Неожиданные, «нетрадиционные» эффекты не всегда играют отрицательную роль. Используя эти эффекты, можно создавать конструкции с недостижимыми ранее свойствами. Одним из примеров могут служить так называемые *размеростабильные* конструкции, размеры которых не изменяются при изменении параметров окружающей среды (температуры и влажности). Другой пример —

конструкции высокого демпфирования, когда за счет оптимального подбора внутренней структуры материала удастся значительно повысить его способность гасить вибрации. Использование композитных материалов позволяет в целом резко расширить класс задач ОПК. Работоспособность многих современных композитных конструкций определяется не только прочностью и жесткостью, но и многими другими качествами. Стоит заметить, что традиционное название расчетных отделов на предприятиях — «отдел прочности» — сегодня безнадежно устарело. Сегодня «прочнисты» зачастую могут быть заняты расчетом термического деформирования или демпфирующих свойств конструкции.

Следующая особенность связана с возможностью *проектирования материалов*. Непривычное словосочетание! Разработка традиционных материалов — дело металлургов и химиков; механик-проектант может лишь придавать этим материалам требуемую форму. С композитами дело обстоит иначе. Изменяя такие *механические* параметры, как, например, толщины и углы укладки слоев, можно создавать материалы с требуемым набором характеристик. В отличие от традиционных материалов, свойства которых раз и навсегда определены, композит представляет собой некий «черный ящик», характеристики которого зависят от его внутренней структуры. Так, варьируя только углы ориентации одного и того же углепластика, можно изменить его жесткость и прочность на 1,5 – 2 порядка, теплопроводность и диссипативные характеристики — в несколько раз, а коэффициент линейного термического расширения может изменить даже свой знак.

Наконец, последняя из рассматриваемых особенностей — ненадежность традиционной инженерной интуиции и опыта. Даже весьма опытный конструктор зачастую не может предусмотреть всех последствий перехода от традиционных материалов к композитам. Более того, бывает, что и для специалиста по композитам оказываются сюрпризом те или иные сочетания свойств композитной конструкции. Композиты настолько многообразны и многогранны, что изучить все их особенности не представляется возможным. Можно

лишь овладеть методологией оптимального проектирования композитных конструкций и исследования полученных оптимальных решений. Этому и посвящен наш курс. Рассматриваемые в нем примеры большей частью касаются волокнистых армированных композитов с полимерной матрицей. Вместе с тем, многие положения сохраняют свой смысл и для более широкого класса композитных материалов.

При изучении отдельных вопросов проектирования композитных материалов и конструкций можно воспользоваться книгами [1 – 8]. Дополнительная литература к отдельным главам курса дается по мере их изложения.

1. ПОСТАНОВКИ И РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Как уже отмечалось, сегодня может быть поставлена и решена практически любая задача оптимального проектирования композитных конструкций. При наличии эффективных методов решения в центре внимания оказываются вопросы постановки задач оптимизации и анализа полученных оптимальных проектов.

Что посеешь — то и пожнешь. Если задача сформулирована односторонне, если не учтены все возможные требования к конструкции и их связи между собой — никакой метод решения не способен будет обеспечить нахождение действительно *оптимального* проекта. Поэтому, несмотря на развитие вычислительной техники, роль человека — специалиста по проектированию композитных конструкций — будет только возрастать.

Общая схема постановки и решения задач проектирования композитных конструкций представлена на рис. 1.1. При рассмотрении этой схемы стоит представить себе проектирование какого-либо конкретного изделия, например переходного отсека ракеты.

1.1. Формулировка задачи оптимального проектирования

Сформулировать задачу ОПК — значит последовательно ответить на три вопроса.

1. *Что мы оптимизируем?*

Ответ на этот вопрос — выбор объекта оптимизации.

2. *Что можно изменить в оптимизируемом объекте?*

Ответ на этот вопрос — выбор варьируемых параметров.