

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Московский Государственный Строительный Университет

СОГЛАСОВАНО

Председатель МК

По специальности _____

« ____ » _____ 200 ____ г.

УТВЕРЖДАЮ

Декан Факультета

« ____ » _____ 200 ____ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕРМОУПРУГОСТИ

Автор проф., дфмн Кузнецов С.В.

По направлению 553300 «Прикладная механика»

Для специальности 553300 «Прикладная механика»

Факультет ФОК

Курс IV

Рабочая программа составлена на основе Примерной программы дисциплины

«Теория термоупругости»

Дата утверждения _____

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры Сопротивления материалов,

Протокол № _____ от « ____ » _____ 200 ____ г.

Зав. Кафедрой
Сопротивления материалов,
Д.т.н., проф.

Андреев В.И.

Москва 2009 г.

1. Цели и задачи дисциплины.

Данная дисциплина является одной из базовых дисциплин специальности 07.11.01 и входит в цикл профилирующей подготовки специалиста.

Цель дисциплины - освоение студентами теоретических основ расчетов элементов строительных и машиностроительных конструкций на прочность при температурных воздействиях, а также выработка практических навыков проведения этих расчетов, умения формулировать математические модели, отвечающие комбинированным температурным и силовым воздействиям и обоснованно выбирать эффективные численные методы расчета с широким использованием ЭВМ.

В курсе ставятся задачи ознакомления студентов с современными проблемами строительства и машиностроения в области расчета конструкций на прочность, жесткость и долговечность с учетом температурных и силовых воздействий, с современными методами расчета с использованием ЭВМ, с вопросами обеспечения надежности конструкций, повышения их эффективности, экологической безопасности; обучения навыкам и приемам выполнения конкретных практических расчетов широкого класса элементов строительных и машиностроительных конструкций.

Основой изучения данной дисциплины являются курсы: «Высшая и прикладная математика», «Физика», «Теоретическая механика», «Сопроотивление материалов», «Теория упругости», «Строительная механика». В свою очередь знания, приобретенные при изучении данной дисциплины, используются в курсах «Физика прочности и разрушения», «Технологическая механика», в научно-исследовательских работах студентов, в курсовом и дипломном проектировании.

Программа реализуется в форме лекций, практических и лабораторных занятий, консультаций и в форме самостоятельной работы студента, заключающейся в проработке материала лекций, подготовке к лабораторным работам, выполнении домашних заданий.

Контроль самостоятельной работы студентов осуществляется в форме защиты домашних заданий, рубежного контроля, зачета и экзамена.

2. Требования к уровню освоения содержания дисциплины.

Студент должен знать терминологию и все определения вводимых величин и параметров. Знать постановку задач, способ их решения и вывод всех формул. Знать физический смысл рассматриваемых величин и пределы их применения.

Уметь применять теоретические результаты для решения конкретных задач.

Иметь практический навык работы с испытательным оборудованием и приборами, применяемыми при исследовании процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций.

3. Объем дисциплины и виды учебной работы.

Виды учебной работы			
	Всего	7 сем.	8 сем.
Общая трудоемкость дисциплины	260	130	130
Аудиторные занятия	96	48	48
Лекции	64	32	32
Практические занятия (ПЗ)	23	16	7
Лабораторные работы (ЛР)	4	-	4
Самостоятельная работа	39	17	22
Курсовой проект (работа)	17	-	17
Расчетно-графические работы	-	-	-
Реферат	-	-	-
и (или) другие виды самостоятельной работы	17	17	-
Вид итогового контроля (зачет, экзамен)		зачет	экзамен

4. Содержание дисциплины

4.1. Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п	Раздел дисциплины	Лекции	ПЗ (или С)	ЛР
1.	Введение	*		
2.	Основные понятия и соотношения теории	*	*	
3.	Основы термодинамики твердого тела	*	*	
4.	Понятие о связанных термоупругих полях	*	*	*
5.	Решение некоторых одномерных задач теории термоупругости	*	*	
6.	Решение некоторых осесимметричных задач теории термоупругости	*	*	
7.	Общие методы решения пространственных задач теории термоупругости	*	*	*
8.	Нестационарные температурные поля	*	*	
9.	Динамические задачи в теории термоупругости	*	*	
10.	Основные результаты и методы экспериментальных исследований в теории термоупругости	*		
11.	Математические модели в теории температурного разрушения	*	*	*
12.	Методы решения задач теории ползучести при температурных воздействиях	*	*	
13.	Усталостные напряжения при температурных воздействиях	*	*	*

4.2. Содержание разделов дисциплины

1. Введение.

Теория термоупругости - задачи, прикладное значение, краткая историческая справка. Термоупругость и упругость как физические явления и их учет в расчетах. Основные экспериментальные факты о термоупругости материалов. Термоупругость и упрочнение, влияние истории нагружения, закон Герстнера, эффект Баушингера, деформационная анизотропия, независимость пластических свойств от теплового нагружения.

2. Основные понятия и соотношения теории.

В основу лекций положены основные разделы курса термоупругости. Изложение посвящено теории термоупругости, основанной на термодинамике необратимых процессов. В курсе излагаются основные положения и методы теории термоупругости, включающей теплопроводность, тепловые напряжения, вызванные градиентами температуры, динамические эффекты при резко нестационарных процессах нагрева и термомеханические эффекты, обусловленные процессом деформирования. Содержание курса отвечает следующему плану: сначала рассматриваются термодинамические основы термоупругости и дается постановка задачи термоупругости для самого общего случая, когда приращение температуры не является малой величиной по сравнению с начальной температурой, а нестационарные процессы деформирования сопровождаются существенными динамическими эффектами и взаимодействием между полями деформации и температуры; затем приводятся основные уравнения квазистатической задачи термоупругости и сообщаются основные сведения по теории стационарной и нестационарной теплопроводности, необходимые для исследования температурных полей и соответствующих им тепловых напряжений в квазистатической и динамической постановках; далее разбираются основные классы квазистатических задач термоупругости (плоская задача термоупругости, задача термоупругости круглых пластин и оболочек вращения, осесимметричная пространственная задача термоупругости); в последних двух главах рассматриваются динамические и связанные задачи термоупругости.

3. Основные концепции термоупругости

Исследования по термоупругости сначала стимулировались задачами о термоупругих напряжениях в элементах конструкций. Они проводились на основе теории, разработанной Дюамелем (1838) и Нейманом (1841), которые исходили из следующего предположения: полная деформация является суммой упругой деформации, связанной с напряжениями обычными соотношениями, и чисто теплового расширения, соответствующего известному из классической теории теплопроводности температурному полю. С принципиальной точки зрения теория Дюамеля — Неймана для нестационарных тепловых и механических воздействий оказалась ограниченной: она не позволяет строго описать движение упругого тела, связанное с его тепловым состоянием. При определенных условиях нестационарный нагрев сопровождается динамическими эффектами в конструкции. В общем случае изменение температуры тела происходит не только вследствие подвода тепла от внешних источников, но и в результате самого процесса деформирования. При деформировании тела от механических или тепловых воздействий, протекающих с большой скоростью, возникает так называемый эффект связанности, обусловленный взаимодействием полей деформации и температуры. Он проявляется в образовании и движении тепловых потоков внутри тела, возникновении связанных упругих и тепловых волн, термоупругом рассеянии энергии и т. п. Последовательное рассмотрение процессов упругого деформи-

вания и теплопроводности в их взаимосвязи возможно только на основе термодинамических соображений. Томсон (1855) впервые применил основные законы термодинамики для изучения свойств упругого тела. Ряд исследователей [Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц (1953) и др.] с помощью методов классической термодинамики получили связанные уравнения термоупругости. Однако в рамках классической термодинамики строгий анализ справедлив лишь для изотермического и адиабатического обратимых процессов деформирования. Реальный процесс деформирования, неразрывно связанный с необратимым процессом теплопроводности, является в общем случае также необратимым. Термодинамика необратимых процессов, разработанная в последние годы, позволила более строго поставить задачу о необратимом процессе деформирования и дать единую трактовку механических и тепловых процессов, нашедшую отражение в работах Био (1956), Чадвика (1960), Боли и Уэйнера (1960) и др. В связи с этим более четко определилась теория термоупругости, обобщающая классическую теорию упругости и теорию теплопроводности. Она охватывает следующие явления: перенос тепла теплопроводностью в теле при стационарном и нестационарном теплообмене между ним и внешней средой; термоупругие напряжения, вызванные градиентами температуры; динамические эффекты при резко нестационарных процессах нагрева и, в частности, термоупругие колебания тонкостенных конструкций при тепловом ударе; термомеханические эффекты, обусловленные взаимодействием полей деформации и температуры.

4. Упрощающие гипотезы в теории термоупругости

В теории термоупругости обычно накладывается ограничение на величину термического возмущения: приращение температуры предполагается малым по сравнению с начальной абсолютной температурой. Снятие этого ограничения не нарушает предположения о малости деформаций, но приводит к появлению нелинейных членов в связанных уравнениях термоупругости. Возможно построение единой теории термоупругости без указанного ограничения в рамках предположения о малости деформаций, учитывающей зависимость упругих и термических коэффициентов от температуры. В общем случае она является нелинейной теорией связанной термоупругости и в качестве частных случаев охватывает как линейную теорию связанной термоупругости при малом термическом возмущении, так и теорию несвязанной термоупругости при большом термическом возмущении, использующую линейные уравнения движения и нелинейное уравнение теплопроводности.

5. Квазистатические задачи теории термоупругости

Задача термоупругости в квазистатической постановке, когда не учитываются инерционные члены в уравнениях движения и связывающий член в уравнении теплопроводности, имеет наибольшее практическое значение; при обычных условиях теплообмена динамические эффекты, обусловленные нестационарным нагревом, и тепловые потоки, образующиеся вследствие деформации, настолько невелики, что соответствующие им члены в уравнениях могут быть отброшены, и система уравнений распадается на обычное уравнение нестационарной теплопроводности и уравнения, описывающие задачу о термоупругих напряжениях при заданном температурном поле. Представление общего решения квазистатической задачи термоупругости в форме, удобной для практического применения, впервые предложил, по-видимому, П.Ф. Папкович (1932—1937). В этой форме решение однородного уравнения для вектора перемещения содержит произвольные вектор и скаляр, а частное решение неоднородного уравнения, соответствующего заданному температурному полю, определяется через скалярную функцию, получившую название термоупругого потенциала перемещений, которая удовлетворяет уравнению Пуассона.

6. Плоские задачи теории термоупругости

Важными для практики квазистатическими задачами термоупругости являются плоская задача термоупругости, термоупругость круглых пластин и оболочек вращения и осесимметричная задача термоупругости. Постановка плоской задачи термоупругости имеет особенности по сравнению с плоской задачей изотермической теории упругости, связанные с характером температурного поля. Плоское деформированное состояние вызывается двумерным (плоским) температурным полем. Плоское напряженное состояние в рамках пространственной теории упругости может существовать при пространственном температурном поле, удовлетворяющем определенному условию. При произвольном плоском температурном поле в тонкой пластине возникает напряженное состояние, мало отличающееся от плоского напряженного состояния. Формулировка плоской задачи термоупругости в напряжениях должна учитывать условия однозначности перемещений; в связи с этим случай стационарного температурного поля для многосвязных плоских или цилиндрических тел требует специального рассмотрения. Н. И. Мусхелишвили (1916), используя теорию функций комплексного переменного, выяснил связь многозначности перемещений с тепловыми напряжениями и установил аналогию между плоской задачей термоупругости для многосвязных тел при стационарном температурном поле и соответствующей плоской задачей изотермической теории упругости с дислокациями. Комплексное представление позволяет также более сжато и четко сформулировать условия отсутствия тепловых напряжений в многосвязном теле при стационарном температурном поле..

7. Осесимметричные задачи теории термоупругости

Осесимметричная задача разработана наиболее полно по сравнению с другими задачами пространственной термоупругости. Характерные математические трудности, связанные с решением этой задачи, можно установить при исследовании тепловых напряжений в толстостенной сферической оболочке и в коротком сплошном цилиндре. Задача о тепловых напряжениях в толстостенной сферической оболочке является типичной задачей, решаемой с помощью классических методов разложения переменных и представления величин, входящих в граничные условия, в виде рядов по полной ортогональной системе функций. Задача о тепловых напряжениях в коротком цилиндре вводит в круг идей, реализуемых при исследовании тела вращения, для которого невозможно представить граничные значения искомых величин в рядах по полной ортогональной системе функций на всей его поверхности. Применяются в основном два метода решения такой задачи: метод однородных решений,

разработанный А. И. Лурье (1947) и В.К. Прокоповым, и метод суперпозиции решений для более простых граничных задач, истоки которого содержатся в работах Ляме (1861) и Матье (1890). Использование второго метода позволило изучить термоупругое напряженное состояние тела вращения конечных размеров во всей его области, включая и особые точки.

8. Термоупругость при импульсных воздействиях.

В связи с анализом работы конструкций, подвергающихся им- импульсивным тепловым воздействиям, проведены исследования ряда динамических задач термоупругости. Задача о тепловом ударе на поверхности полупространства явилась первой динамической задачей термоупругости, исследованной методами операционного исчисления В.И. Даниловской (1950), которая выяснила особенности распространения динамических тепловых напряжений, характерных для рассматриваемого типа задач (тепловой удар на поверхности цилиндра, сферы и др.). Эта задача получила обобщение в двух направлениях: Стернберг и Чакраворти (1959) исследовали динамический эффект, когда изменение температуры поверхности полупространства происходит не скачкообразно, а с конечной скоростью; Муки и Брейер (1962), Дилон (1965) и др. рассмотрели влияние на тепловой удар эффекта связанности полей деформации и температуры. Теоретическими исследованиями Боли и Барбера (1957), Крауса (1966) и др. установлена возможность возбуждения колебаний тонкостенных элементов конструкций (балок, пластин, оболочек) посредством импульсивных тепловых воздействий.

9. Динамика жестко-пластических конструкций при температурных воздействиях

Динамические задачи теории пластичности. Схема жестко-пластического тела в динамических задачах. Энергетические теоремы (теоремы Мартина).

Изгиб жестко-пластической балки под действием импульсной нагрузки. Условия кинематической совместности. Анализ поведения жестко-пластических тел при ударной нагрузке.

10. Основные результаты экспериментального изучения ползучести

Об экспериментальном изучении ползучести. Основные экспериментальные результаты для одноосного растяжения. Кривые ползучести. Релаксация напряжений. Гомологические температуры. Основные аппроксимации. Принцип подобия кривых ползучести.

11. Математические модели ползучести при температурных воздействиях

О феноменологических уравнениях ползучести. Технические теории ползучести в рамках одноосного напряженного состояния. Теория старения. Формулировка теории старения Ю.Н.Работнова. Два подхода в описании упрочнения при ползучести. Теории течения и упрочнения.

Описание ступенчатого нагружения техническими теориями ползучести. Использование различных параметров упрочнения в теории упрочнения. Описание кривых релаксации техническими теориями ползучести.

Общие соотношения теории наследственности в формулировке Ю.Н.Работнова. Эффект обратной ползучести.

Формулировка уравнений технических теорий ползучести в общем случае сложного напряженного состояния. Использование основных гипотез теории пластичности. Потенциал скоростей деформации ползучести. Постулат Друккера для реономных сред.

Теория ползучести с анизотропным упрочнением. Внутренние (добавочные) напряжения. Гипотеза Р.Бейли о термическом разупрочнении. Описание обратной ползучести.

12. Методы решения задач теории ползучести с учетом температурных полей

Задачи установившейся и неуставившейся ползучести. Численные методы решения. Связь с численными методами теории пластичности. Методы шагов по времени. Автоматический выбор шага для явных методов. Неявные методы. Линеаризация уравнений ползучести на шаге. Использование МКЭ.

Задачи установившейся ползучести для одноосного напряженного состояния. Растяжение-сжатие стержневых систем. Примеры решений. Итерационные методы упругих решений.

Задачи неуставившейся ползучести для одноосного напряженного состояния. Растяжение-сжатие стержневых систем. Примеры решений. Шаговые методы решений.

Задачи установившейся ползучести при изгибе стержневых систем. Статически неопределимые задачи изгиба. Использование приближенной гипотезы Л.М.Качанова о полной скорости кривизны.

Задачи установившейся ползучести при кручении. Кручение бруса кольцевого поперечного сечения. Произвольное односвязное сечение. Тонкостенные открытый профиль и замкнутый профиль.

Энергетические (вариационные) методы решения задач установившейся ползучести. Удельная мощность диссипации и удельная дополнительная мощность диссипации. Неравенство Мартина. Теоремы о минимуме полной и дополнительной мощностей диссипации.

Двусторонние оценки для полной и дополнительной мощности диссипации в задачах установившейся ползучести. Теорема Кастильяно. Двусторонние оценки для скоростей перемещений (оценки Хилла). Оценка Мартина для скорости перемещения. Использование неравенства Мартина в задачах установившейся ползучести.

Приближенные методы решения задач установившейся ползучести. Теорема о напряженном состоянии в условиях неуставившейся ползучести при постоянных внешних нагрузках. Принцип минимума дополнительной мощности диссипации для неуставившейся ползучести. Приближенный метод решения основной и релаксационной задач неуставившейся ползучести. Примеры приближенных решений основной и релаксационной задач неуставившейся ползучести.

Приближенные обобщенные модели в установившейся ползучести при степенном законе. Теорема о вложенных поверхностях постоянной мощности диссипации (теорема Келледайна-Друкера). Замечания к построению обобщенных моделей в задачах неуставившейся ползучести.

5. Лабораторный практикум.

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование лабораторных работ
1.	3	Моделирование плоской конструкции, находящейся в условиях стационарного температурного поля.
2.	7	Решение задачи о пространственном стационарном тепловом нагружении трехмерного упругого тела
3.	11	Ступенчатое нагружение при термовязкоупругости. Анализ технических теорий ползучести для случая ступенчатого нагружения.
4.	13	Температурное разрушение при ползучести. Проверка схемы Хоффа для вязкого разрушения.

6. Учебно-методическое обеспечение дисциплины.

6.1. Рекомендуемая литература.

а) основная литература:

1. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин. – М.: 1967.
2. Аменадзе Ю.А. Теория упругости. – М.:Высшая школа, 1976, 272с.
3. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973.
4. Ван Фо Фы Г.А. Теория армированных материалов.–М.:Наука,1971.
5. Васидзу Кюитри. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987, 542 с.
6. Волков С.Д., Ставров В.П. Статистическая механика композитных материалов. – Минск, Изд-во БГУ, 1978, 205 с.
7. Вольмир А.С. Оболочки в потоке жидкости и газа (задачи аэроупругости). – М.: Наука, 1976, 416с.
8. Ворович И.И. Бабешко В.А. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. – М.: Наука, 1979, 319с.
9. Григоренко Я.М. и др. Задачи теории упругости неоднородных тел. – Киев: Наукова думка, 1991, 215 с.
10. Еременко С.Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел. – Харьков: Основа, 1991, 271 с.
11. Жигалко Ю.П. Вынужденные колебания оболочек и пластин: Учебное пособие. – Казань: Изд-во Казан.ун-та, 1990, 102 с.
12. Зубчанинов В.Г. Основы теории упругости и пластичности. – М.: Высшая школа, 1990, 367 с.
13. Ишлинский А.Ю., Ивлев Д.Д. Математическая теория пластичности. – М.: Физматлит, 2001. – 704 с.
14. Кан С. Н., Свердлов И. А. Расчёт самолёта на прочность. Издание 5-е переработанное и дополненное. М: Машиностроение, 1966, 514 с.
15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. –М.:Наука,1987,248с.
16. Ломакин В.А. Статистические задачи механики твердых деформируемых тел. – М.: Наука, 1970.
17. Ломакин В.А. Теория упругости неоднородных тел. – М.: Изд-во МГУ, 1976, 368 с.
18. Лурье А.И. Теория упругости. - М.: Наука, 1980, 940 с.
19. Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975, 872 с.
20. Победря Б.Е. Численные методы теории упругости и пластичности. – М.: Изд-во МГУ, 1995, 366 с.
21. Поручиков В.Б. Методы динамической теории упругости. – М.: Наука, 1986, 328 с.
22. Работнов Ю.Н. Проблемы механики деформируемого твердого тела.– М.: Наука, 1991, 134 с.

б) дополнительная литература:

1. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. – М.: Высшая школа, 1990, 398 с.
2. Берковский Б.С. Статическая аэрогидроупругость несущих элементов и их систем, работающих вблизи границ. - Иркутск: Из-во Иркутского ун-та, 1983. - 122 с.
3. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике. – М.: Стройиздат, 1961.
4. Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Яровая А.В. Механика слоистых вязкоупругопластических элементов контстукций. – М.: Физматлит, 2005, 576 с.
5. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды.–М.:Изд.МГУ, 1990, 310с.
6. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974.
7. Кристенсен Р.Введение в механику композитов.– М.:Мир,1982, 334с.
8. Мухелишвили Н.И., Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966, 634 с.
9. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек.–Л.: Судпрогиз,1962, 432 с.
10. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988, 712 с.
11. Ржаницын А.Р. Теория ползучести. – М.: Стройиздат, 1968, 418 с.
12. Савин Г.Н. Распределения напряжений около отверстий. – Киев: Наукова думка, 1968.
13. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – М.: Наука, 1983, т.2, 530с.
14. Соколовский В.В. Теория пластичности.– М.: Высшая школа, 1969, 608 с.
15. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости.–М.:Наука, 1975, 560 с.

6.2. Средства обеспечения освоения дисциплины.

При выполнении расчетно-графических работ рекомендуется использовать универсальные математические программы типа Maple, Mathcad, Matlab и университетские версии конечно-элементных комплексов ANSYS, NASTRAN.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины.

Компьютерный класс с компьютерами. Испытательная машина с механическим, гидравлическим или электрогидравлическим приводом, метрологические параметры которой соответствуют ГОСТ 7855-84.

Программа составлена в соответствии Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по направлению специальности 653500 – строительство (подготовка дипломированного специалиста).

Программу составили:

Андреев Владимир Игоревич – Чл.корр., зав кафедрой сопротивления материалов МГСУ

Кузнецов Сергей Владимирович - Профессор МГСУ

Программа одобрена на заседании НМС по естественно-научным и общепрофессиональным дисциплинам

Председатель НМС _____