

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
**Пермский федеральный исследовательский центр  
Уральского отделения  
Российской академии наук**

Принято на заседании  
Объединенного ученого совета  
ПФИЦ УрО РАН  
Протокол № 6/18  
«28» сентября 2018 г.



Утверждаю  
Директор ПФИЦ УрО РАН  
чл.-корр. РАН А.А. Барях

28 сентября 2018 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**«МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА»**  
(наименование дисциплины по учебному плану)

Направление 01.06.01 «Математика и механика»  
(код и наименование)

Профиль программы аспирантуры 01.02.04 Механика деформируемого твердого тела

Квалификация выпускника: Исследователь. Преподаватель-исследователь

Форма обучения: Очная

Курс: 2 Семестр(ы): 1, 2

**Трудоёмкость:**

Кредитов по рабочему учебному плану: 3 ЗЕ

Часов по рабочему учебному плану: 108 ч

**Виды контроля:**

Экзамен: - **1**

Зачёт: **1**

Курсовой проект: - **нет** Курсовая работа: - **нет**

**ПЕРМЬ 2018**

# 1. НАИМЕНОВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Механика деформируемого твердого тела

(полное наименование дисциплины)

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.В.ОД2 входит в Блок 1 Относится к циклу обязательных дисциплин профиля подготовки «ОД2» образовательной программы по направлению подготовки (специальности): Направление: **01.06.01** Математика и механика, направленностей 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела, разработана на основании:

- федерального государственного образовательного стандарта высшего образования, утверждённого приказом Министерства образования и науки Российской Федерации «30» июля 2014 г. номер приказа «866» по направлению подготовки 01.06.01 «Математика и механика (уровень подготовки кадров высшей квалификации)»;
- компетентностной модели выпускника ООП по направлению подготовки 01.06.01 «Математика и механика» (уровень подготовки кадров высшей квалификации), программы аспирантуры «Механика деформируемого твердого тела», утверждённой «28» сентября 2018 г.;
- базовых учебных планов очной формы обучения по направлению подготовки 01.06.01 «Математика и механика (уровень подготовки кадров высшей квалификации), программ аспирантуры 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела, утверждённых «28» сентября 2018 г.
- примерной программы кандидатского экзамена, утвержденного Министерством образования и науки Российской Федерации.

Рабочая программа дисциплины «Механика деформируемого твердого тела» является дополненной программой минимума, более глубоко раскрывает отдельные разделы МЖГ, получившие развитие в последние годы, в том числе отражающие научные направления «ИМСС УрО РАН», разработана ведущими специалистами «ИМСС УрО РАН» и согласована с рабочими программами

Обязательных дисциплин:

Педагогика высшей школы

Методика оформления научно-квалификационной работы (диссертации)

Дисциплин по выбору:

Соотношения на поверхностях разрыва

Нелинейные аспекты разрушения

Параллельные вычисления в механике сплошных сред

Операторная школа тензорного исчисления и ее использование в термодинамике сплошной среды

Физика вязкоупругих магнитных материалов

Современные экспериментальные методы

участвующих в формировании компетенций совместно с данной дисциплиной.

### 3. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

В результате освоения дисциплины Механика деформируемого твердого тела у обучающегося должны быть сформированы следующие части компетенций ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5.

#### 3.1. Дисциплинарная карта компетенции ПК-1

<b>Код ПК-1</b>	<b>Формулировка компетенции</b>
<b>Код Б1.В.ОД2</b>	Способность проводить научные исследования в области механики деформируемого твёрдого тела

#### Требования к компонентному составу части компетенции

Перечень компонентов	Виды учебной работы	Средства оценки
<p><b>В результате освоения компетенции аспирант:</b></p> <p><b>Знает:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- методологию, конкретные методы и приемы научно-исследовательской работы в области механики деформируемого твёрдого тела (основные современные теории процессов деформирования и разрушения, взаимодействия структуры материала и внешних полей различной природы и интенсивности, методы описания процессов деформирования, фазовых и структурно-кинетических переходов в материале) (З ПК-1);</li> </ul>	Индивидуальные консультации, самостоятельная работа аспирантов по изучению теоретического материала, подготовка отчета, ведение текущей научно-исследовательской работы	Вопросы для промежуточного и итогового контроля. Выполнение индивидуального плана аспирантов в части публикаций и участия в конференциях
<p><b>Умеет:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ставить задачу и применять современные методы (численные, аналитические, экспериментальные) для решения задач в области механики деформируемого твёрдого тела с учётом эволюции структуры материала и внешних воздействий различной природы и интенсивности (У ПК-1).</li> </ul>		

#### 3.2. Дисциплинарная карта компетенции ПК-2

<b>Код ПК-2</b>	<b>Формулировка компетенции</b>
<b>Б1.В.ОД2</b>	Способность получать численные и аналитические решения краевых задач для прогноза поведения деформируемых твердых тел различной природы при разнообразных воздействиях

### Требования к компонентному составу части компетенции

Перечень компонентов	Виды учебной работы	Средства оценки
<p><b>В результате освоения компетенции аспирант:</b></p> <p><b>Знает:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- методологию, конкретные методы и приемы решения краевых задач, встречающихся при исследовании проблем механики деформируемого твёрдого тела (3 ПК-2);</li> </ul>	<p>Индивидуальные консультации, самостоятельная работа аспирантов по изучению теоретического материала, подготовка отчета, ведение текущей научно-исследовательской работы</p>	<p>Вопросы для промежуточного и итогового контроля. Выполнение индивидуального плана аспирантов в части публикаций и участия в конференциях</p>
<p><b>Умеет:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ставить задачу и проводить численные и аналитические исследования краевых задач для прогноза поведения деформируемых твердых тел различной природы при разнообразных воздействиях (У1 ПК-2);</li> <li>- применять теоретические знания по методам сбора, хранения, обработки и передачи информации (У2 ПК-2);</li> </ul>		

### 3.3. Дисциплинарная карта компетенции ПК-3

Код ПК-3	Формулировка компетенции
Б1.В.ОД2	Способность анализировать и формулировать связи между структурой материалов, характером внешних воздействий и процессами деформирования и разрушения

### Требования к компонентному составу части компетенции

Перечень компонентов	Виды учебной работы	Средства оценки
<p><b>В результате освоения компетенции аспирант:</b></p> <p><b>Знает:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- методологию, конкретные методы и приемы анализа связи между структурой материалов, характером внешних воздействий и процессами деформирования и разрушения (3 ПК-3);</li> </ul>	<p>Индивидуальные консультации, самостоятельная работа аспирантов по изучению теоретического материала, подготовка отчета, ведение текущей научно-исследовательской работы</p>	<p>Вопросы для промежуточного и итогового контроля. Выполнение индивидуального плана аспирантов в части публикаций и участия в конференциях</p>
<p><b>Умеет:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ставить и решать задачу о связи между изменением структуры материала и особенностями процесса деформирования и разрушения (У ПК-3);</li> </ul>		

### 3.4. Дисциплинарная карта компетенции ПК-4

<b>Код ПК-4</b>	<b>Формулировка компетенции</b>
<b>Б1.В.ОД2</b>	Способность проводить моделирование технологических проблем деформирования и разрушения, а также предупреждения недопустимых деформаций и трещин в конструкциях различного назначения

#### Требования к компонентному составу части компетенции

Перечень компонентов	Виды учебной работы	Средства оценки
<b>В результате освоения компетенции аспирант:</b> <b>Знает:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- современные методы моделирования технологических проблем деформирования и разрушения, а также предупреждения недопустимых деформаций и трещин в конструкциях различного назначения (3 ПК-4);</li> </ul>	Индивидуальные консультации, самостоятельная работа аспирантов по изучению теоретического материала, подготовка отчета, ведение текущей научно-исследовательской работы	Вопросы для промежуточного и итогового контроля. Выполнение индивидуального плана аспирантов в части публикаций и участия в конференциях
<b>Умеет:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ставить задачу и проводить анализ технологических проблем деформирования и разрушения, прогнозировать особенности возникновения и распространения трещин в конструкционных материалах (У ПК-4);</li> </ul>		

#### 3.5. Дисциплинарная карта компетенции ПК-5

<b>Код ПК-5</b>	<b>Формулировка компетенции</b>
<b>Б1.В.ОД2</b>	Способность планировать, проводить и интерпретировать экспериментальные данные по изучению деформирования, повреждения и разрушения материалов

#### Требования к компонентному составу части компетенции

Перечень компонентов	Виды учебной работы	Средства оценки
<b>В результате освоения компетенции аспирант:</b> <b>Знает:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Современные методы, приемы планирования эксперимента, обработки и интерпретации экспериментальных данных по изучению деформирования, повреждения и разрушения материалов (3 ПК-5);</li> </ul>	Индивидуальные консультации, самостоятельная работа аспирантов по изучению теоретического материала, подготовка отчета, ведение текущей научно-исследовательской работы	Вопросы для промежуточного и итогового контроля. Выполнение индивидуального плана аспирантов в части публикаций и участия в конференциях
<b>Умеет:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Планировать проведение экспериментов, анализировать и интерпретировать экспериментальные данные по изучению деформирования, повреждения и разрушения материалов (У ПК-5);</li> </ul>		

#### 4. АННОТАЦИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина нацелена на формирование и развитие у аспирантов компетенций в области решения задач механики сплошных сред, и смежных областей; получение обучающимися теоретических знаний для быстрой и квалифицированной переработки фундаментальных теоретических исследований и получении новых результатов в процессе практической работы над проблемами механики деформированного твердого тела; овладение математическими моделями и методами решения задач, позволяющими выпускнику успешно работать в различных областях профессиональной деятельности: научно-исследовательской, проектной и производственно-технологической с применением современных компьютерных технологий. Курс «Механика деформируемого твердого тела» нацелен на подготовку аспирантов к защите научно-квалификационной работы в виде диссертации на соискание степени кандидата наук, а также к подготовке и успешной сдаче кандидатского и государственного экзамена по специальности.

Курс «Механика деформируемого твердого тела» является междисциплинарным. Аттестация по усвоению содержания дисциплины проводится в форме зачета в первом семестре второго курса и экзамена по окончании второго года обучения. Программой дисциплины предусмотрены консультации (18 ч.) и самостоятельная работа аспирантов (86 ч).

#### 5. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель** курса заключается в формировании у аспиранта комплекса знаний, умений и навыков в области механики деформируемого твердого тела.

**Задачами** учебной дисциплины являются установление законов деформирования, повреждения и разрушения материалов; разработка методов постановки и методов решения краевых задач для прогноза поведения деформируемых твердых тел различной природы при разнообразных воздействиях; выявление новых связей между структурой материалов, характером внешних воздействий и процессами деформирования и разрушения; решение технологических проблем деформирования и разрушения, а также предупреждения недопустимых деформаций и трещин в конструкциях различного назначения; планирование, проведение и интерпретация экспериментальных данных по изучению деформирования, повреждения и разрушения материалов, а также формирование

- знаний законов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых.
- знаний теории моделей деформируемых тел с простой и сложной структурой.
- знаний мезомеханики многоуровневых сред со структурой.

- знаний механики композиционных и интеллектуальных материалов и конструкций.
- знаний теории упругости, пластичности и ползучести.
- знаний теории накопления повреждений, механика разрушения твердых тел и критерии прочности при сложных режимах нагружения.
- умений ставить и решать краевые задачи для тел различной конфигурации и структуры при механических, электромагнитных, радиационных, тепловых и прочих воздействиях, в том числе применительно к объектам новой техники.
- умений применять математические модели и численные методы анализа к задачам, не допускающим прямого аналитического исследования.
- навыков владения экспериментальными методами исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях.

## **6. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ, ФОРМЫ ТЕКУЩЕГО И ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОНТРОЛЯ, ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН**

<b>Вид учебной работы</b>	<b>Количество часов (форма обучения очная)</b>
№ семестров	3,4
Аудиторные занятия	0
Самостоятельная работа	86
Индивидуальные консультации	18
Всего часов на дисциплину	108
Всего зачетных единиц на дисциплину	3
Формы итогового контроля	экзамен
Формы промежуточного контроля	зачет
Формы текущего контроля	Отчет по результатам в соответствии с индивидуальным учебным планом аспиранта

### Тематический план

Наименование тем и разделов	Всего часов	Аудиторные занятия			самостоятельная работа
		лекции	Индивидуальные консультации	практики	
Механика и термодинамика сплошных сред	8	0	1	0	7
Теория упругости	8	0	1	0	7
Теория пластичности	8	0	1	0	7
Теория вязкоупругости и ползучести	8	0	1	0	7
Механика разрушения	9	0	1	0	8
Численные методы решения задач механики деформируемого твердого тела	9	0	1	0	8
Тензорное исчисление в механике сплошной среды	9	0	2	0	7
Принципы термодинамики	9	0	2	0	7
Теория устойчивости	9	0	2	0	7
Механика композиционных материалов. Основы мезомеханики	9	0	2	0	7
Динамика неупругих сред	9	0	2	0	7
Экспериментальные методы механики деформируемого твердого тела	9	0	2	0	7
Зачет	2				
Экзамен	2				



## 7. АННОТИРОВАННОЕ ОПИСАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ РАЗДЕЛОВ И ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

### **Механика и термодинамика сплошных сред**

Понятие сплошного тела. Гипотеза сплошности. Физически и геометрически малый элемент. Деформация элемента сплошной среды. Два способа описания деформации сплошного тела. Координаты Эйлера и координаты Лагранжа. Переход от Эйлера описания к Лагранжеву и обратно. Тензор деформации Коши-Грина. Геометрический смысл компонент тензора деформации Грина. Тензор деформации Альманси. Геометрический смысл компонент тензора деформации Альманси. Условия совместности деформаций. Формулировка условий совместности деформаций в цилиндрической и сферической системе координат. Вычисление тензора малых деформаций по заданному полю перемещений. Формулы Чезаро. Классификация сил в механике сплошных сред: внешние и внутренние силы, массовые и поверхностные силы. Тензоры напряжений Коши, Пиолы и Кирхгофа. Законы сохранения механики сплошных сред: уравнения баланса массы, импульса, момента импульса, кинетической, потенциальной и полной энергии. Термодинамические процессы и циклы. Термодинамические параметры состояния. Понятие о работе, теплоте, внутренней энергии, температуре и энтропии. Первый и второй законы термодинамики. Термодинамические потенциалы состояния. Общие формы определяющих соотношений механики сплошных сред. Физическая размерность. Анализ размерностей и П-теорема. Автомодельные решения. Примеры.

### **Теория упругости**

Упругое деформирование твердых тел. Упругий потенциал и энергия деформации. Линейно упругое тело Гука. Понятие об анизотропии упругого тела. Тензор упругих модулей. Частные случаи анизотропии: трансверсально изотропное и ортотропное упругое тело. Упругие модули изотропного тела. Полная система уравнений теории упругости. Уравнения Ламе в перемещениях. Уравнения Бельтрами-Митчелла в напряжениях. Граничные условия. Постановка краевых задач математической теории упругости. Основные краевые задачи. Принцип Сен-Венана. Общие теоремы теории упругости: теорема Клапейрона, тождество взаимности, теорема единственности. Основные энергетические функционалы линейной теории упругости. Вариационные принципы теории упругости: принцип минимума полной потенциальной энергии, принцип минимума дополнительной энергии, принцип Рейснера. Теоремы Кастильяно. Теорема Бетти. Примеры. Действие сосредоточенной силы в неограниченной упругой среде. Тензор Грина. Граничные интегральные представления напряжений и перемещений. Формула Соммильяны. Общие представления решений уравнений теории упругости: представление Кельвина, представление Галеркина и представление Папковича-Нейбера. Нормальная нагрузка на границе полупространства (задача Буссинеска). Касательная нагрузка на границе полупространства (задача Черрути). Плоское напряженное и плоское деформированное состояние. Плоская задача теории упругости. Метод комплексных потенциалов Колосова-Мухелишвили. Комплексное представление напряжений и перемещений. Уравнения плоской задачи теории упругости в полярных координатах. Смешанная задача для полуплоскости. Задача Гриффитса. Антиплоская деформация. Трещина антиплоского сдвига в упругом теле. Кручение и изгиб призматического тела (задача Сен-Венана). Теоремы о циркуляции касательного напряжения при кручении и изгибе. Центр изгиба. Задача о действии штампа с плоским основанием на полуплоскость. Контактная задача Герца. Теория тонких упругих пластин и оболочек. Основные гипотезы. Полная система уравнений теории пластин и оболочек. Граничные условия. Постановка задач теории пластин и оболочек. Безмоментная теория. Краевые эффекты. Задача о круглой симметрично нагруженной пластине. Динамические задачи теории упругости. Уравнения движения в форме Ламе. Динамические, геометрические и кинематические условия совместности на волновом фронте. Свободные волны в неограниченной изотропной упругой среде. Общее решение в форме Ламе. Фундаментальное решение

динамических уравнений теории упругости для пространства. Плоские гармонические волны. Коэффициенты отражения, прохождения и трансформации. Полное отражение. Поверхностные волны Релея. Волны Лява. Установившиеся колебания упругих тел. Частоты и формы собственных колебаний. Вариационный принцип Релея. Температурные задачи теории упругости. Уравнения термоупругости.

### **Теория пластичности**

Пластическое деформирование твердых тел. Предел текучести. Упрочнение. Остаточные деформации. Идеальная пластичность. Физические механизмы пластического течения. Понятие о дислокациях. Локализация пластических деформаций. Линии Людерса-Чернова. Идеальное упругопластическое тело. Идеальное жесткопластическое тело. Пространство напряжений. Критерий текучести и поверхность текучести. Критерии Треска и Мизеса. Пространство главных напряжений. Геометрическая интерпретация условий текучести. Условие полной пластичности. Влияние среднего напряжения. Упрочняющееся упругопластическое тело. Упрочняющееся жесткопластическое тело. Функция нагружения, поверхность нагружения. Параметры упрочнения. Законы связи между напряженным и деформированным состояниями в теории течения. Принцип Мизеса. Постулат Друккера. Ассоциированный закон пластического течения. Теория скольжения. Краевые задачи теории течения. Теоремы единственности. Вариационные принципы теории течения. Теория предельного равновесия. Статическая и кинематическая теоремы теории предельного равновесия. Верхние и нижние оценки. Примеры. Кручение призматического тела за пределом упругости. Предельное равновесие при кручении. Характеристики. Поверхность напряжений, как поверхность постоянного ската. Песчаная аналогия. Разрывы напряжений. Песчано-мембранная аналогия Прандтля - Надаи для кручения идеально упругопластических тел. Пластическое плоское деформированное состояние. Уравнения для напряжений и скоростей. Статически определимые и неопределимые задачи. Характеристики. Свойства линий скольжения. Методы решения основных краевых задач теории плоской пластической деформации. Задача Прандтля о вдавливании штампа. Пластическое плоское напряженное состояние. Уравнения для напряжений и скоростей при условии пластичности Мизеса. Характеристики. Плоские упругопластические задачи теории идеальной пластичности. Двухосное растяжение толстой и тонкой пластин с круговым отверстием. Деформационные теории пластичности. Теория Генки. Теория малых упруго пластических деформаций А.А. Ильюшина. Теорема о разгрузке. Метод упругих решений. Задача о толстостенной трубе из упрочняющегося материала. Упругопластические волны в стержне. Ударное нагружение. Волна разгрузки. Остаточные деформации. Критическая скорость удара.

### **Теория вязкоупругости и ползучести**

Понятие о ползучести и релаксации. Кривые ползучести и релаксации. Простейшие модели линейно вязкоупругих сред: модель Максвелла, модель Фохта, модель Томсона. Время релаксации. Время запаздывания. Определяющие соотношения теории вязкоупругости. Ядра ползучести и релаксации. Непрерывные ядра и ядра со слабой особенностью. Термодинамические ограничения на выбор ядер ползучести и релаксации. Формулировка краевых задач теории вязкоупругости. Методы решения краевых задач теории вязкоупругости: принцип соответствия Вольтерры, применение интегрального преобразования Лапласа, численные методы. Теорема единственности. Вариационные принципы в линейной вязкоупругости. Применение вариационного метода к задачам изгиба. Плоская задача о вдавливании жесткого штампа в вязкоупругую полуплоскость. Контакт вязкоупругих тел: аналог задачи Герца. Определяющие соотношения нелинейной теории вязкоупругости. Разложение Вольтерры-Фреше. Упрощенные одномерные модели. Теории старения, течения, упрочнения и наследственности. Ползучесть при сложном напряженном состоянии. Определяющие соотношения. Установившаяся ползучесть. Уравнения состояния деформируемых тел, находящихся в условиях установившейся ползучести. Постановка краевых задач. Вариационные принципы теории

установившейся ползучести: принцип минимума полной мощности, принцип минимума дополнительного рассеяния. Установившаяся ползучесть и длительная прочность стержня. Неустановившаяся ползучесть. Определяющие уравнения теории неустановившейся ползучести. Вариационные принципы теории течения и теории упрочнения. Неустановившаяся ползучесть стержневой решетки. Устойчивость стержней и пластин из реономных материалов.

### **Механика разрушения**

Понятие о разрушении и прочности тел. Общие закономерности и основные типы разрушения. Концентраторы напряжений. Коэффициент концентрации напряжений: растяжение упругой полуплоскости с круговым и эллиптическим отверстиями. Феноменологические теории прочности. Критерии разрушения: деформационный, энергетический, энтропийный. Критерии длительной и усталостной прочности. Расчет прочности по допускаемым напряжениям. Коэффициент запаса прочности. Двумерные задачи о трещинах в упругом теле. Метод разложения по собственным функциям в задаче о построении асимптотик полей напряжений и перемещений у вершины трещины в упругом теле. Коэффициент интенсивности напряжений, методы его вычисления и оценки. Скорость высвобождения энергии при продвижении трещины в упругом теле. Энергетический подход Гриффитса в механике разрушения. Силовой подход в механике разрушения: модели Баренблатта и Ирвина. Эквивалентность подходов в случае хрупкого разрушения. Формула Ирвина.  $J$ -интеграл Эшелби-Черепанова-Райса и его инвариантность. Вычисление потока энергии в вершину трещины.  $JR$  –кривая. Динамическое распространение трещин. Динамический коэффициент интенсивности напряжений. Предельная скорость трещины хрупкого разрушения (теоретическая оценка и экспериментальные данные). Локализованное пластическое течение у вершины трещины. Оценка линейного размера пластической зоны у вершины трещины по Ирвину. Поле скольжения у вершины трещины нормального отрыва в идеально пластическом теле. Модель трещины Леонова-Панасюка-Дагдейла с узкой зоной локализации пластических деформаций. Кинетическая концепция прочности твердых тел. Формула Журкова. Кинетическая теория трещин. Рост трещин в условиях ползучести. Понятие об усталостном разрушении. Малоцикловая и многоцикловая усталость. Основные законы роста усталостных трещин. Понятие о поврежденности. Типы поврежденности. Математическое представление поврежденности. Параметр поврежденности Качанова-Работнова. Кинетические уравнения накопления поврежденности. Принцип линейного суммирования повреждений. Накопление повреждений в условиях ползучести.

### **Численные методы решения задач механики деформируемого твердого тела**

Метод конечных разностей. Типичные разностные схемы для параболических, эллиптических и гиперболических уравнений. Метод конечных разностей для дифференциальных уравнений теории упругости. Вариационный принцип минимума полной потенциальной энергии упругого тела. Методы Релея-Ритца, Бубнова-Галеркина и градиентного спуска в задачах минимизации функционала полной потенциальной энергии. Метод конечных элементов в теории упругости. Пределы применимости метода конечных элементов. Формула Сомильяны и метод граничных интегральных уравнений (метод граничных элементов). Метод характеристик в двумерных задачах теории пластичности. Область определенности и область зависимости решения гиперболической краевой задачи. Метод лучевых разложений для решения гиперболических задач теории пластичности и волновой динамики. Понятие о вычислительном эксперименте. Использование вычислительного эксперимента для решения задач механики деформируемого твердого тела.

### **Тензорное исчисление в механике сплошной среды**

Безиндексная запись тензорных выражений. Понятие тензора как линейного отображения векторного пространства на себя. Операции сложения, умножения, скалярного умножения, транспонирования тензоров. Тензорное произведение векторов. Внешнее произведение векторов. Дифференцирование векторной функции по векторному аргументу.

Понятие единичного, обратного, симметричного, антисимметричного (кососимметричного), ортогонального, собственно ортогонального (поворота), положительно определенного и индифферентного тензоров. След тензора. Собственные векторы и собственные числа тензора. Инварианты тензора. Отсчетная и актуальная конфигурации. Градиенты вектора в отсчетной и актуальной конфигурациях. Дивергенция вектора и тензора в отсчетной и актуальной конфигурациях. Деформационный градиент. Полярное разложение деформационного градиента. Правый и левый тензоры растяжения. Правый и левый тензоры Коши-Грина. Кратности удлинения. Тензорные функции. Мера Генки. Тензор скоростей растяжения. Спин. Объективные производные тензоров. Контравариантные, ковариантные и смешанные компоненты тензоров. Физические компоненты. Символы Кристоффеля. Компонентная запись уравнений механики сплошной среды в криволинейной системе координат.

### **Принципы термодинамики**

Определяющие соотношения механики деформируемого твердого тела. Принцип детерминизма. Принцип локального действия. Принцип материальной независимости от системы отсчета. Дополнительные неравенства в теории упругости. Термодинамические процессы. Первый принцип термодинамики. Принцип физического равноправия всех инерциальных систем отсчета. Второй принцип термодинамики. Неравенство Клаузиуса-Дюгема. Приведенное неравенство диссипации. Невозможность создания вечных двигателей первого и второго рода. Внутренняя энергия, свободная энергия и энтропия деформируемой сплошной среды. Дифференциальные модели деформируемого твердого тела. Интегральные модели. Материалы с наложенными связями. Несжимаемые среды. Формулировка первого и второго принципов термодинамики для полярной среды. Формулировка первого и второго принципов термодинамики смеси континуумов. Баланс массы, уравнение движения и уравнение теплопроводности смеси континуумов.

### **Теория устойчивости**

Концепция устойчивости упругих и вязкопластических систем. Устойчивость упругих и упругопластических сжатых стержней. Решений Эйлера, Энгессера, Кармана. Концепция устойчивости Шенли. Постановка задач об устойчивости стержней за пределом упругости в догружающихся и разгружающихся конструкциях Ильюшина, Зубчанинова. Методы временных поддерживающих систем и упругопластической тренировки для повышения устойчивости конструкций. Выпучивание стержней за пределом упругости при продольном изгибе. Теория устойчивости оболочек и пластины в пределах и за пределом упругости. Теория устойчивости Ильюшина. Ее обобщение на случай использования частных теорий пластичности при сложном нагружении. Теории устойчивости оболочек и пластины за пределом упругости Зубчанинова при сложном нагружении. Бифуркации оболочек и пластин в условиях ползучести. Выпучивание и устойчивость сжатых элементов конструкций в условиях ползучести.

### **Механика композиционных материалов. Основы мезомеханики**

Механика армированного слоя. Микромеханика монослоя. Микромеханика упругих свойств монослоя. Микромеханика ползучести монослоя. Микромеханика кратковременной и длительной прочности. Диссипативные свойства монослоя. Термоупругие свойства слоистых композитов. Диссипативные свойства слоистых композитов. Свойства конструкционных композиционных материалов. Мезомеханика структурно-неоднородных сред. Мезомеханика разрушения. Физическая мезомеханика материалов. Мезомеханика функциональных материалов с эффектом памяти формы. Структурно-аналитическая теория прочности Лихачева-Малинина. Структурно-аналитическая теория мезомеханики материалов.

### **Динамика неупругих сред**

Механические свойства материалов при динамических нагрузках. Влияние скорости деформирования на основные механические характеристики (предел текучести, предел прочности, остаточная деформация, диаграмма деформирования). Законы сохранения массы и импульса на фронте ударной волны. Ударная адиабата. Упрочнение металлов в ударных волнах и фазовые переходы. Структура ударных волн. Модели упруго – вязкопластических

сред. Распространение возмущений. Модель Рахматуллина – Кармана. Модель Соколовского – Малверна. Модель Пэжины. Модель Работнова – Суворовой. Модель Григоряна для грунтов. Распространение упругопластических волн в стержне. Прохождение волн через границу раздела двух сред. Модели разрушения при ударно – волновом нагружении. Характерные особенности разрушения в ударных волнах. Тыльный откол. Множественный откол. Разрушение при взаимодействии ударника с преградой (прокол, сдвиг пробки, образование лепестков). Приближенные способы описания механизмов разрушения преграды. Сопrotивление преграды динамическому внедрению ударника при проколе.

#### **Экспериментальные методы механики деформируемого твердого тела**

Современная аппаратура для проведения исследований механических свойств деформируемых материалов. Измерительная аппаратура для получения данных по перемещениям. Датчики силы. Обработка экспериментальных данных. Природа экспериментальных ошибок. Систематические и случайные ошибки. Способы выявления и устранения систематических ошибок. Характеристики случайных ошибок. Аппаратура и образцы для исследования поведения материала при кручении, сдвиге, растяжении по двум осям. Измерение объемных изменений. Методы измерения комплексных динамических модулей. Усталостные испытания. Исследование ползучести. Использование температурно-временной аналогии при изучении релаксационных свойств полимерных материалов. Температурные испытания.

Аппаратура для получения информации о структуре материалов и ее изменении при деформировании. Оптические, электронные, атомно-силовые и туннельные микроскопы. Ядерный магнитный резонанс. Акустические методы. Датчики для осуществления измерений в точках конструкции. Тензометрирование моделей и конструкций. Методы лаковых и оптически чувствительных покрытий. Метод муаровых полос. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений.

## **8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

### ***Обязательная:***

1. Бреббия К., Уокер С. Применение метода граничных элементов в технике. М.: Мир, 1982.
2. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
3. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969.
4. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975.
5. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975.
6. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966.
7. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988.
8. Седов Л.И. Механика сплошной среды: В 2-х томах. М.: Наука, 1983.

### ***Дополнительная:***

1. Ивлев Д.Д. Теория идеальной пластичности. М.: Наука, 1966.
2. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. М.: Изд-во МГУ, 1978.
3. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974.
4. Ключников В.Д. Математическая теория пластичности. М.: Изд-во МГУ, 1979.
5. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982.
6. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970.
7. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980.
8. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. М.: Наука, 1985.
9. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1981.
10. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1954.
11. Черепанов Г.П. Механика разрушения композиционных материалов. М.: Наука, 1983.

12. Гольденблат И.И. Некоторые вопросы механики деформируемых сред М.: Гостехиздат 1955
13. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975.
14. Жермен П. Курс механики сплошных сред. Общая теория. М.: Высшая школа, 1983.
15. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. М.: Мир, 1987.
16. Демидов С.П. Теория упругости. М.: Высш. шк., 1979.
17. Зубчанинов В.Г. Устойчивость в механике деформируемого твердого тела. Калинин 1986.
18. Ильюшин А.А. Прочность, пластичность и вязкоупругость материалов и конструкций. Свердловск 1986.
19. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. М.: МГУ 1978.
20. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975.
21. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. М.: Наука, 1974.
22. Адлер Ю.П. и др. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976.
23. Деденко Л.Г., Керженцев В.В. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента. Изд-во МГУ, 1977.
24. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений. М.: Машиностроение, 1983.
25. Белл Дж. Экспериментальные основы механики деформируемого твердого тела. М.: Мир, 1984.
26. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризациино-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973.

#### ***Периодические издания***

1. Журнал «Вычислительная механика сплошных сред»  
<http://www2.icmm.ru/journal/cont.htm>
2. Журнал «Известия РАН. Механика твердого тела»,  
<http://mtt.ipmnet.ru/ru>
3. Журнал «Известия РАН. Механика жидкости и газа»  
<http://mzg.ipmnet.ru/ru>
4. Вестник ПНИПУ. «Механика» журнал / Пермский национальный исследовательский политехнический университет; Под ред. А. А. Ташкинова. - Пермь: Изд-во ПНИПУ.  
<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>
5. Вестник ПГНИУ. «Физика» журнал / Пермский государственный национальный исследовательский университет; Под ред. В. А. Дёмина. - Пермь: Изд-во ПГНИУ.  
<http://press.psu.ru/index.php/phys/index>

#### ***Электронные информационно-образовательные ресурсы***

1. Электронная библиотека диссертаций РГБ  
<http://diss.rsl.ru>
2. Научная электронная библиотека РИНЦ (Elibrary)  
<http://elibrary.ru>
3. Научная электронная библиотека ScienceDirect  
<https://www.sciencedirect.com/>
4. Научная электронная библиотека SpringerLink  
<https://link.springer.com/>
5. Научная электронная библиотека Elsevier  
<https://www.elsevier.com>
6. Полнотекстовая мультидисциплинарная база данных диссертаций ProQuest  
Dissertations & Theses Global <http://proquest.com/pqdtglobal/dissertations>
7. Университетская информационная система Россия  
<https://uisrussia.msu.ru/>
8. Университетские библиотеки г. Перми

- <http://biblioclub.ru/>  
<http://pspu.ru/university/biblioteka/jelektronnye-resursy-biblioteki>  
<https://perm.hse.ru/library/>  
<http://biblioteki.perm.ru/main/index.html?id=34>
9. Научометрическая и реферативная база данных Scopus  
<https://www.scopus.com>
  10. Электронная база данных Web of Science  
<http://apps.webofknowledge.com>
  11. Национальная электронная библиотека  
<https://нэб.рф/>

## **9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

### **Аспирантам**

Освоение курса требует систематического изучения всех тем в той последовательности, в какой они указаны в программе.

Основными видами учебной работы является самостоятельная работа. Их цель - расширить базовые знания студентов по изучаемой дисциплине и систему теоретических ориентиров для более глубокого освоения программного материала. Студенту важно помнить, что индивидуальные консультации эффективно помогут студенту овладеть программным материалом благодаря прямому визуальному и эмоциональному контакту студента с преподавателем, обеспечивая более полную реализацию воспитательной компоненты обучения.

При самостоятельной работе следует использовать:

- учебно-методическую литературу из рекомендованного списка;
- ресурсы информационной поддержки учебного процесса.

Студенту необходимо помнить, что результаты самостоятельной работы контролируются преподавателем и учитываются при аттестации студента.

### **Преподавателям**

Преподавателю следует иметь в виду, что освоение курса требует систематического изучения всех тем в той последовательности, в какой они указаны в программе.

Важно помнить, что индивидуальные консультации помогают студенту овладеть программным материалом благодаря правильной расстановке преподавателем необходимых акцентов и удержанию внимания интонационными модуляциями голоса, а также подключением аудиовизуального механизма восприятия информации. Кроме того, во время консультации имеет место прямой визуальный и эмоциональный контакт студента с преподавателем, обеспечивающий более полную реализацию воспитательной компоненты обучения, в том числе на личном примере педагога (культура речи, манера одеваться, общаться со студентами и аудиторией в целом, и т.д.).

Преподавателю следует иметь в виду, что содержание консультации должно удовлетворять следующим дидактическим требованиям, обеспечивающим активную работу студента и эффективное освоение им программного материала:

- логичности, четкости и ясности в изложении материала;
- последовательности изложения материала - от простого к сложному, от известного к неизвестному;
- проблемности (с широким привлечением диалога, дискуссии);
- наглядности;
- связи с практикой и будущей профессиональной деятельностью студента.

Преподавателю необходимо систематически контролировать результаты самостоятельной работы и учитывать их при аттестации студента.

При проведении аттестации студентов важно помнить, что систематичность, объективность, аргументированность – главные принципы, на которых основаны контроль и оценка знаний. Проверка, контроль и оценка знаний студента требуют учета его индивидуального стиля в осуществлении учебной деятельности. Знание критериев оценки знаний обязательно и для преподавателя, и для студента.



