

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»**

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель программы аспирантуры



В.В. Зильбершmidt
к.ф.-м.н., профессор,
научный руководитель НИЛ «МБМУ»

« _____ » « _____ » 2023 г.

Рабочая программа дисциплины по программе аспирантуры
«Механика деформируемого твердого тела»

Научная специальность	1.1.8. Механика деформируемого твердого тела
Направленность (профиль) программы аспирантуры	Механика биоматериалов
Выпускающая(ие) кафедра(ы)	Динамика и прочность машин (ДПМ)
Форма обучения	Очная
Курс: 3	Семестр (ы): 5
Виды контроля с указанием семестра:	
Экзамен: 5	Зачет: Диф.зачет

Пермь 2023

1. Общие положения

Рабочая программа дисциплины «Механика деформируемого твердого тела» разработана на основании следующих нормативных документов:

- Приказ Минобрнауки России от 20.10.2021 N 951 "Об утверждении федеральных государственных требований к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов (адъюнктов)";
- Постановление Правительства РФ от 30.11.2021 N 2122 "Об утверждении Положения о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре)";
- Самостоятельно устанавливаемые требования к реализуемым программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре Пермского национального исследовательского политехнического университета;
- Базовый план по программе аспирантуры;
- Паспорт научной специальности.

1.1 Цель учебной дисциплины

Целью изучения дисциплины «Механика деформируемого твердого тела» является формирование умений и навыков применения подходов, методов и математических моделей механики при выполнении научно-исследовательской работы в области изучения закономерностей процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов различной природы, а также напряженно-деформированного состояния твердых тел из этих материалов, при механических, тепловых, радиационных, статических и динамических воздействиях в пассивных и активных, газовых и жидких средах и полях различной природы, необходимого при подготовке научно-квалификационной работы (диссертации) на соискание ученой степени кандидата наук.

1.2 Место учебной дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Механика деформируемого твердого тела» является обязательной дисциплиной из образовательного компонента учебного плана.

Дисциплина используется при подготовке к сдаче кандидатского экзамена по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Кандидатский экзамен представляют собой форму оценки степени подготовленности соискателя ученой степени кандидата наук к проведению научных исследований по конкретной научной специальности и отрасли науки, по которой подготавливается или подготовлена диссертация.

2. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

В результате изучения дисциплины аспирант должен демонстрировать следующие результаты:

Знать:

- проблемы механики деформируемого твердого тела с учетом современных достижений науки и мировых тенденций развития техники и технологий, потребностей промышленности;
- методы построения математических моделей механических процессов, знаний структуры уравнений баланса для параметров механической природы, типов граничных и начальных условий;
- вариационные принципы и основные численные методы механики деформируемого твердого тела.

Уметь:

- критически анализировать проблемы механики деформируемого твердого тела с учетом современных достижений науки и мировых тенденций развития техники и технологий, потребностей промышленности, ставить задачи и разрабатывать программу исследования, выбирать адекватные способы и методы решения теоретических, прикладных и экспериментальных задач, анализировать, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты;
- развивать и применять новые методы и средства экспериментальных исследований деформирования, повреждения и разрушения современных материалов и механических характеристик конструкций, обрабатывать, анализировать и обобщать результаты экспериментов.

Владеть:

- навыками применения новых методов и средств экспериментальных исследований деформирования, повреждения и разрушения современных материалов и механических характеристик конструкций, обработки, анализа и обобщения результатов экспериментов.

3. Структура учебной дисциплины по видам и формам учебной работы

Таблица 1

Объем и виды учебной работы

№ п.п.	Вид учебной работы	Трудоемкость, ч
		5 семестр
1	Аудиторная работа	20
	В том числе:	
	Лекции (Л)	5
	Практические занятия (ПЗ)	6
2	Контроль самостоятельной работы (КСР)	9
	Самостоятельная работа (СР)	88
	Форма итогового контроля:	Экзамен

4. Содержание учебной дисциплины

4.1 Содержание разделов и тем учебной дисциплины

Раздел 1. Теоретические основы механики сплошных сред

(Л – 2, СР – 13)

Тема 1. 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. Понятия 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.

Раздел 2. Механика упругих и неупругих деформируемых твердых тел

(Л – 3, СР – 45)

Тема 2. 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-Мусхелишвили. 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.

Тема 3. 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 упругопластических 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.

Тема 4. 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.

Раздел 3. Прочность и разрушение твердых тел

(ПЗ – 2, СР – 10)

Тема 5. 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.

Раздел 4. Экспериментальные и численные методы механики деформируемого твердого тела

(ПЗ – 4, СР – 20)

Тема 6. Экспериментальная механика

Методы и средства экспериментальных исследований в механике деформируемого тела. Метод электротензометрии (виды тензорезисторов, схемы их размещения для одноосных и двухосных НДС, мостовая схема измерения, тензорезисторные преобразователи перемещений, сил, давлений, вибраций).

Метод хрупких покрытий для исследования полей главных напряжений (канифольные, оксидные, эмалевые покрытия, область их применения). Метод координатных сеток (прямоугольные, касательные, окружные и комбинированные сетки, область их применения). Метод муаровых полос для измерения линейных и угловых перемещений на поверхности.

Метод фотоупругости. Принцип действия прямого полярископа и кругового. Изохромы (полосы) И изоклина. Методы их разделения с помощью "белого" света, синхронного вращения анализатора и поляризатора, введения $1/4$ волновых пластинок. Методы разделения на разности главных напряжений (метод, использующий измерение поперечных деформаций; метод наклонного просвечивания путем поворота относительно оси одного из главных напряжений, определяемых значением угла изоклины, вариационно-разностный метод решения уравнения равновесия задачи для ПНС (способ разности касательных напряжений). Метод оптически чувствительных покрытий и соответствующие схемы полярископов.

Теория подобия и моделирования. Виды соответствий. Методы определения масштабов физического моделирования. Метод анализа известных функциональных связей (уравнений) явления. Полное и приближенное моделирование. Частные случаи моделирования ПНС, действия массовых сил, кинематического и динамического подобия.

Определение масштабов моделирования на основе теории размерностей, основанной на $7!$ -теореме. Формулировка $7!$ -теоремы. Индикаторы и критерии подобия. Основные теоремы подобия.

Математические методы планирования последовательности экспериментальных исследований. Схема эксперимента. Объект исследования (черный ящик). Параметры оптимизации. Методы построения обобщенного параметра оптимизации, Факторы. Выбор области эксперимента. Условия, которым должны удовлетворять вышеперечисленные понятия.

Математическая модель, аппроксимирующая результаты эксперимента и условия ее выбора. Основные стратегии экспериментального определения экстремума целевой функции эксперимента.

Полный факторный эксперимент (ПФЭ). Матрица ПФЭ. Методы ее построения и ее свойства. Определение коэффициентов математической модели (уравнения регрессии) при ПФЭ.

Определение погрешности при проведении эксперимента по повторным опытам на нулевом уровне и погрешности коэффициентов уравнения регрессии. Определение значимости коэффициентов по "t"-критерию.

Дробный факторный эксперимент (ДФЭ) для построения линейной модели, аппроксимирующей неизвестную поверхность параметра оптимизации. Дробные реплики. Генерирующее соотношение, определяющее с каким из эффектов взаимодействия факторов смешан дополнительный фактор. Определяющий контраст и его применение для построения оценок неизвестных истинных коэффициентов модели. Обработка результатов ПФЭ и ДФЭ. Определение статистической значимости коэффициентов уравнения. Проверка адекватности линейной модели и участка истинной поверхности отклика по критерию Фишера и действия в случае неадекватности.

Обработка результатов экспериментальных исследований. Построение доверительных интервалов для оценок математического ожидания и дисперсии. Случай неизвестного вида закона распределения вероятности. Использование знаний о виде закона распределения анализируемой величины. Однофакторный анализ. Постановка задачи. Непараметрические критерии однородности. Оценивание эффектов обработки. Дисперсионный анализ. Двухфакторный анализ. Связь задач однофакторного и двухфакторного ана. Пиза. Аддитивная модель данных двухфакторного эксперимента при независимом действии факторов. Непараметрические критерии проверки гипотез об отсутствии эффектов обработки. Двухфакторный дисперсионный анализ. Линейный

регрессионный анализ. Модель линейного регрессионного анализа. Стратегии, методы и проблемы регрессионного анализа. Простая линейная регрессия. Непараметрическая линейная регрессия. Нелинейное оценивание. Модели нелинейного регрессионного анализа. Используемые методы оценивания неизвестных параметров. Логистическая регрессия. Регрессия экспоненциального типа. Разрывная регрессия.

Анализ временных рядов и прогнозирование. Основные задачи анализа временных рядов. Классификация временных рядов. Основные характеристики временных рядов. Стационарные временные ряды. Параметрические модели временных рядов. Детерминированная и случайная составляющие временного ряда. Тренд, сезонная и циклические составляющие. Модели тренда, его подбор и прогнозирование. Выделение сезонной компоненты. Проблемы сглаживания временных рядов. Линейные модели временных рядов: авторегрессии 1-го, 2-го, p 'го порядка. Процессы скользящего среднего. Комбинированные процессы авторегрессии -скользящего среднего.

Тема 7. 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 Рунге-Кутты, Бундмана-Галеркина и градиентного спуска в задачах минимизации функционала полной потенциальной энергии.

Метод конечных элементов в теории упругости. Пределы применимости метода конечных элементов.

Формула Соммерфельда 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.

4.2 Перечень тем практических занятий

Таблица 2

Темы практических занятий (из пункта 4.1)

№ п.п.	Номер темы дисциплины	Наименование темы практического занятия	Наименование оценочного средства	Представление оценочного средства
1	1	Механика разрушения	Собеседование. Творческое задание.	Вопросы по темам / разделам дисциплины. Темы творческих заданий.
2	2	Экспериментальная механика	Собеседование. Творческое задание.	Вопросы по темам / разделам дисциплины. Темы творческих заданий.
3	3	Численные методы решения задач механики деформируемого твердого тела	Собеседование. Творческое задание.	Вопросы по темам / разделам дисциплины. Темы творческих заданий.

				заданий.
--	--	--	--	----------

4.3 Перечень тем для самостоятельной работы аспирантов

Самостоятельная работа аспирантов заключается в теоретическом изучении конкретных вопросов и выполнении творческих заданий.

Таблица 3

Темы самостоятельных заданий

№ п.п.	Номер темы дисциплины	Наименование темы самостоятельной работы	Наименование оценочного средства	Представление оценочного средства
1	1	Термодинамические процессы и циклы. Термодинамические параметры состояния. Понятия о работе, теплоте, внутренней энергии, температуре и энтропии. Первый и второй законы термодинамики.	Собеседование	Вопросы по темам / разделам дисциплины
2	2	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.	Собеседование	Вопросы по темам / разделам дисциплины
3	3	Упругопластические волны в стержне. Ударное нагружение. Волна разгрузки. Остаточные деформации. Критическая скорость удара.	Собеседование	Вопросы по темам / разделам дисциплины
4	4	Вариационные принципы в линейной вязкоупругости. Применение вариационного метода к задачам изгиба	Собеседование	Вопросы по темам / разделам дисциплины
5	5	Длительная прочность вязкоупругих тел. Кинетические уравнения накопления поврежденности. Принцип линейного суммирования повреждений. Накопление повреждений в условиях ползучести.	Творческое задание	Темы творческих заданий
6	6	Анализ временных рядов и прогнозирование	Творческое задание	Темы творческих заданий
7	7	Метод граничных элементов.	Собеседование	Вопросы по темам / разделам дисциплины

5. Методические указания для аспирантов по изучению дисциплины

При изучении дисциплины «Механика деформируемого твердого тела» аспирантам целесообразно выполнять следующие рекомендации:

1. Изучение учебной дисциплины должно вестись систематически;
2. После изучения какого-либо раздела по учебнику или конспектным материалам рекомендуется по памяти воспроизвести основные термины, определения, понятия раздела;
3. Список вопросов, изучаемых самостоятельно, задается руководителем. Им же даются источники (в первую очередь вновь изданные в периодической научной литературе) для более детального понимания вопросов;

4. К выполнению практических заданий приступать после самостоятельной работы после консультации с научным руководителем.

6. Перечень учебно-методического, библиотечно-справочного и информационного, информационно-справочного обеспечения для работы аспиранта по дисциплине

6.1 Библиотечные фонды и библиотечно-справочные системы

№	Библиографическое описание (автор, заглавие, вид издания, место, издательство, год издания, количество страниц)	Количество экземпляров в библиотеке+кафедре; местонахождение электронных изданий
1	2	3
1. Основная литература		
1	Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела : учебное пособие. 2-е изд., испр. Москва : Наука : Физматлит, 1988. 712 с.	46
2.	Бабкин А. В., Селиванов В. В. Прикладная механика сплошных сред. Основы механики сплошных сред. 3-е изд., стер. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 375 с.	3
3.	Селиванов В.В. Прикладная механика сплошных сред. Механика разрушения деформируемого тела. 2-е изд., испр. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 419 с.	7
4.	Прикладная механика сплошных сред. Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов / Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. 2-е изд., испр. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 518 с.	17
5.	Новацкий В. Теория упругости : пер. с польск. Москва : Мир, 1975. 872 с.	4
6.	Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести : учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Машиностроение, 1975. 399 с.	48
7.	Качанов Л. М. Основы теории пластичности : учебное пособие для университетов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Наука, 1969. 420 с.	54
8.	Методы прикладной вязкоупругости / Адамов А. А., Матвеев В. П., Труфанов Н. А., Шардаков И. Н. Екатеринбург : УрО РАН, 2003. 411 с.	37
9.	Колтунов М. А., Кравчук А. С., Майборода В. П. Прикладная механика деформируемого твердого тела : учебное пособие для вузов. Москва : Высш. шк., 1983. 349 с.	13
10.	Бреббия К., Уокер С. Применение метода граничных элементов в технике : пер. с англ. Москва : Мир, 1982. 248 с.	5
11.	Кузьмин М.А., Лебедев Д.Л., Попов Б.Г. Решение задач механики методом конечных элементов : учебное пособие для вузов. М. : Академкнига, 2008. 160 с.	10
12.	Трушин С. И. Метод конечных элементов. Теория и задачи : учебное пособие. Москва : Изд-во АСВ, 2008. 256 с. 16,0 усл. печ. л.	4
2. Дополнительная литература		
2.1. Учебные и научные издания		
1.	Контактные задачи теории упругости для неоднородных сред / Айзикович С.М., Александров В.М., Белоконов А.В., Кренин Л.И., Трубочик И.С. М. : Физматлит, 2006. 236 с.	3
2.	Джонсон К. Механика контактного взаимодействия : пер. с англ. М. : Мир, 1989. 509 с.	3
3.	Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Тарлаковский Д.В. Теория упругости и пластичности : учебник для вузов. М. : Физматлит, 2002. 415 с.	54

№	Библиографическое описание (автор, заглавие, вид издания, место, издательство, год издания, количество страниц)	Количество экземпляров в библиотеке+кафедре; местонахождение электронных изданий
1	2	3
4.	Победря Б. Е., Георгиевский Д. В. Основы механики сплошной среды : курс лекций учебное пособие для вузов. Москва : Физматлит, 2006. 272 с.	19+ЭБ
5.	Ильюшин А. А., Победря Б. Е. Основы математической теории термовязкоупругости. М. : Наука, 1970. 280 с.	1
6.	Шенк Х. Теория инженерного эксперимента : пер. с англ. Москва : Мир, 1972. 382 с.	6
7.	Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Наука, 1976. 279 с.	86+ЭБ
8.	Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. 10-е изд., доп. Москва : Наука : Физматлит, 1987. 430 с.	3
9.	Степнов М. Н., Шаврин А. В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник. 2-е изд., испр. и доп. Москва : Машиностроение, 2005. 399 с.	6
10	Герасимович А. И. Математическая статистика : учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Минск : Вышэйш. шк., 1983. 279 с.	6
11.	Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Малые деформации. М. : Наука, 1984. 596 с.	3
12.	Бердичевский В. Л. Вариационные принципы механики сплошной среды. Москва : Наука, 1983. 447 с. 28,00 усл. печ. л.	7
13.	Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения : учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Наука : Физматлит, 1985. 502 с.	11
14.	Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости : пер. с англ. Москва : Мир, 1974. 338 с.	10
15.	Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости : пер. с англ. 2-е изд. Москва : Наука : Физматлит, 1979. 560 с.	23
16.	Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. Москва : Наука : Физматлит, 1974. 640 с.	3
17.	Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности : пер. с англ. М. : Мир, 1987. 542 с.	7+ЭБ
18.	Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки : пер. с англ. 2-е изд., стер. Москва : Наука : Физматлит, 1966. 635 с.	29
19.	Пригоровский Н. И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений : справочник. Москва : Машиностроение, 1983. 248 с.	11
20.	Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений : справочное пособие / Касаткин Б.С., Кудрин А.Б., Лобанов Л.М., Пивторак В.А. Киев : Наук. думка, 1981. 583 с.	31
2.2 Периодические издания		
1.	Математическое моделирование : журнал. Москва : Наука, 1989 - . https://elibr.pstu.ru/Record/RUPSTUser29677#description	

№	Библиографическое описание (автор, заглавие, вид издания, место, издательство, год издания, количество страниц)	Количество экземпляров в библиотеке+кафедре; местонахождение электронных изданий
1	2	3
2.	Вестник ПНИПУ. Механика : журнал. Пермь : ПНИПУ, 2012 - . https://elib.pstu.ru/Record/RUPSTUser122695#description	
3.	Известия Российской академии наук. Механика твердого тела : научный журнал. Москва : Наука, 1966 - . https://elib.pstu.ru/Record/RUPSTUser23964#description	
4.	Вычислительная механика сплошных сред : журнал. Пермь : ИМСС УрО РАН, 2008 - . https://elib.pstu.ru/Record/RUPSTUser96485#description	
5.	Прикладная механика и техническая физика : журнал. Новосибирск : СО РАН, 1960 - . https://elib.pstu.ru/Record/RUPSTUser39993#description	
6.	Физическая мезомеханика : журнал. Томск : Ин-т физики прочности и материаловедения СО РАН, 1998 - . https://elib.pstu.ru/Record/RUPSTUser70600#description	
7.	Физика твердого тела : журнал. Санкт-Петербург : Наука, 1959 - . https://elib.pstu.ru/Record/RUPSTUser52642#description	
8.	Журналы издательств Elsevier, Springer и др.. доступные в e-library	Научная электронная библиотека (НЭБ)

6.2 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

6.2.1. Информационные и информационно-справочные системы

1. Электронная библиотека Пермского национального исследовательского политехнического университета [Электронный ресурс] [полнотекстовая база данных электрон. док., издан. в Изд-ве ПНИПУ] / Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, Науч. б-ка. - Пермь, 2016. -Режим доступа: <https://elib.pstu.ru>, свободный. - Загл. с экрана.
2. Электронно-библиотечная система «Лань» [Электронный ресурс] : [полнотекстовая база данных: электрон. версии кн., журн. по гуманит., обществ., естеств. и техн. наукам] / Электрон.-библ. система «Лань». - СанктПетербург, 2011-2023. - Режим доступа: <https://e.lanbook.com>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана.
3. Архив научных журналов [Электронный ресурс] : [полнотекстовая база данных : электрон. журн. по гуманит., естеств., и техн. наукам на англ. яз.]/Арх. науч. журн. – Москва, 1798-2012. – Режим доступа: <https://arch.neicon.ru>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана
4. МИАН. Полнотекстовая коллекция математических журналов [Электронный ресурс] : [полнотекстовая база данных : электрон. журн. по естеств. наукам на рус. яз.]/ МИАН. Москва, 1866-2022. – Режим доступа: <https://www.mathnet.ru>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана
5. Научная электронная библиотека [Электронный ресурс] : [полнотекстовая база данных : электрон. журн. на рус. яз.]/_Науч. электрон. б-ка. – Москва, 1900-. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru>, компьютер. сеть Науч. б-ки Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. -Загл. с экрана
6. Национальная электронная библиотека [Электронный ресурс] : [реферат. база данных : электрон. версии дис. и автореф. дис. по всем отраслям знания, электрон. журн.,

- кн., на рус. яз.]/ Нац. электрон. б-ка. – Режим доступа: <https://rusneb.ru>, Науч.-библиограф. отдел Науч. б-ки Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. -Загл. с экрана
7. Реферативная БД ВИНТИ РАН [Электронный ресурс] : [реферат. база данных : электрон. журн. по естеств., точн. и техн. наукам на рус. и англ. яз.]/Реферат. БД ВИНТИ РАН. – Москва, 1981 -. – Режим доступа: <http://bd.viniti.ru>, Науч.-библиограф. отдел Науч. б-ки Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. -Загл. с экрана
8. Российский индекс научного цитирования [Электронный ресурс] : [мультидисциплинар. реф.-библиограф. и наукометр. база данных на рус. яз.] / Науч. электрон. б-ка. Москва, 2000-2016. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/project_risc.asp, свободный. - Загл. с экрана.
9. Academic Reference на платформе China National Knowledge Infrastructure (CNKI) [полнотекстовая база данных : электрон. версии дис. и автореф. дис. по всем отраслям знания на англ. яз.] / CNKI. – Режим доступа: <https://ar.oversea.cnki.net>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана
10. American Chemical Society Journals [Электронный ресурс] : [Электронный ресурс] : [полнотекстовые базы данных журн. и кн. естеств. наукам на ин. яз.] / ACS Publication. – Washington, DC, 1996-. – Режим доступа: <https://pubs.acs.org>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана
11. American Institute of Physics Journals [Электронный ресурс] : [Электронный ресурс] : [полнотекстовые базы данных журн. и кн. естеств. наукам на ин. яз.] / AIP Publishing. – Режим доступа: <https://pubs.aip.org/aip>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана
12. American Physical Society Journals [Электронный ресурс] : [Электронный ресурс] : [полнотекстовые базы данных журн. и кн. естеств. наукам на ин. яз.] / APS Journals. – Режим доступа: <http://publish.aps.org/browse.html>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана
13. Begell House Engineering Collection Journals [Электронный ресурс] : [Электронный ресурс] : [полнотекстовые базы данных журн. и кн. естеств. наукам на ин. яз.] / BEGELL HOUSE Inc. – Режим доступа: https://www.begellhouse.com/begell_digital_portal/, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана
14. Cambridge Journals [Электронный ресурс] : [Электронный ресурс] : [полнотекстовые базы данных журн. и кн. естеств. наукам на ин. яз.] / Cambridge University Press. – Cambridge, 1770-2014, 2019-2020. – Режим доступа: <https://www.cambridge.org/core/>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана
15. China Academic Journals [полнотекстовая база данных : электрон. журн. по гуманитар., естеств., и техн. наукам на кит. яз.] / China Academic Journals. – Режим доступа: <https://oversea.cnki.net/>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана
16. EBSCO Databases [полнотекстовая база данных : электрон. версии дис. и автореф. дис. по всем отраслям знания, электрон. журн. по гуманитар., естеств., и техн. наукам на англ. яз.] / EBSCOhost, Ipswich, 1800-. – Режим доступа: <https://search.ebscohost.com/>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана
17. EDP Sciences full collection [полнотекстовая база данных : электрон. журн. по гуманитар., естеств., и техн. наукам на англ. и фр. яз.] / EDP Sciences, Les Ulis. – Режим доступа: <https://publications.edpsciences.org/>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана

18. Nature Journal [полнотекстовая база данных : электрон. журн. по естеств., наукам на ин. яз.] / Nature, 1869-. – Режим доступа: <https://www.nature.com/nature/index.html>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана
19. Oxford Journals [полнотекстовая база данных : электрон. журн. по естеств., наукам на ин. яз.] / Oxford University Press, Oxford, 1996-2019. – Режим доступа: <https://academic.oup.com/journals/>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана
20. Royal Society Digital Journal Archive [полнотекстовая база данных : электрон. журн. по естеств., наукам на ин. яз.] / The Royal Society., London, 1665-2020. – Режим доступа: <https://royalsocietypublishing.org/journals>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана
21. SAGE Journals [полнотекстовая база данных : электрон. журн. по естеств., наукам на ин. яз.] / SAGE Publications, – Los Angeles, 1847-. – Режим доступа: <https://journals.sagepub.com/>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана
22. ScienceDirect [полнотекстовая база данных : электрон. журн. по гуманит., естеств., и техн. наукам на англ. яз.] / Elsevier. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана
23. Springer ScienceDirect [полнотекстовая база данных : электрон. журн. по гуманит., естеств., и техн. наукам на англ. и нем. яз.] / SpringerLink. – Режим доступа: <https://link.springer.com/>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана
24. Taylor & Francis [Электронный ресурс] : [полнотекстовая база данных электрон. мультидисциплинар. журн. на англ. яз.] / Informa UK Limited. – London, 1930-. – Режим доступа: <https://www.tandfonline.com/>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана
25. Wiley Online Library [Электронный ресурс] : [полнотекстовая база данных электрон. мультидисциплинар. журн. на англ. яз.] / Wiley Journals. – 1996-. – Режим доступа: <https://onlinelibrary.wiley.com/>, по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - Загл. с экрана
26. Справочная Правовая Система КонсультантПлюс [Электронный ресурс] : [полнотекстовая база данных правовой информ. : док., коммент., кн., ст., обзоры и др.]. – Версия 4015.00.02, сетевая, 50 станций. – Москва, 1992–2016. – Режим доступа: Компьютер. сеть Науч. б-ки Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. – Загл. с экрана.

7. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

7.1 Основное учебное оборудование. Рабочее место аспиранта

Таблица 4

№ п.п.	Наименование и марка оборудования (стенда, макета, плаката, лабораторное оборудование)	Кол-во, ед.	Форма приобретения / владения (собственность, оперативное управление, аренда и т.п.)	Номер аудитории
1	2	3	4	5
1	Высокопроизводительная рабочая станция AMD Ryzen 9 5900X, 64 GB DDR 4	12	Оперативное управление	317, 319 корпус Г

8. Фонд оценочных средств

Освоение учебного материала дисциплины запланировано в течение одного семестра. Формой контроля освоения результатов обучения по дисциплине является кандидатский экзамен, проводимый с учетом результатов текущего контроля.

8.1 Описание показателей и критериев оценивания, описание шкал оценивания.

Контроль качества освоения дисциплины включает в себя текущий контроль успеваемости и промежуточную аттестацию аспирантов

Текущий контроль

Текущий контроль успеваемости обеспечивает оценку освоения дисциплин и проводится в форме собеседования и защиты отчета о творческом задании.

- **Собеседование:** Для оценки **знаний** аспирантов проводится собеседование в виде специальной беседы преподавателя с обучающимся на темы, связанные с изучаемой дисциплиной для выяснения объема знаний по определенному разделу, теме, проблеме.

Собеседование может выполняться в индивидуальном порядке или группой аспирантов.

- **Защита отчета о творческом задании**

Для оценки **умений и владений** аспирантов используется творческое задание, имеющее нестандартное решение и позволяющее интегрировать знания различных областей, аргументировать собственную точку зрения.

Творческие задания могут выполняться в индивидуальном порядке или группой аспирантов.

Промежуточная аттестация

Допуск к промежуточной аттестации осуществляется по результатам текущего контроля. Промежуточная аттестация проводится в виде экзамена по дисциплине, в устно-письменной форме по билетам. Билет содержит теоретические вопросы (ТВ) и практическое задание (ПЗ).

Билет формируется таким образом, чтобы в него попали вопросы и практические задания. Пример билета представлен в приложении 1.

- **Шкалы оценивания результатов обучения при сдаче экзамена:**

Оценка результатов обучения по дисциплине проводится по 5-балльной системе оценивания путем выборочного контроля во время экзамена.

Шкалы и критерии оценки результатов обучения при сдаче экзамена приведены в табл. 5.

Шкала оценивания результатов освоения на экзамене

Оценка	Критерии оценивания
5	<p>Аспирант продемонстрировал сформированные и систематические знания при ответе на теоретический вопрос билета. Показал отличные знания в рамках усвоенного учебного материала. Ответил на все или большинство дополнительных вопросов.</p> <p>Аспирант правильно выполнил контрольное задание билета. Показал успешное и систематическое применение полученных знаний и умений при решении профессиональных задач в рамках усвоенного учебного материала. Ответил на все или большинство дополнительных вопросов.</p>
4	<p>Аспирант продемонстрировал сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания при ответе на теоретический вопрос билета. Показал недостаточно уверенные знания в рамках усвоенного учебного материала. Ответил на большинство дополнительных вопросов.</p> <p>Аспирант выполнил контрольное задание билета с небольшими неточностями. Показал в целом успешное, но сопровождающееся отдельными ошибками применение навыков полученных знаний и умений при решении профессиональных задач в рамках усвоенного учебного материала. Ответил на большинство дополнительных вопросов.</p>
3	<p>Аспирант продемонстрировал неполные знания при ответе на теоретический вопрос билета с существенными неточностями. Показал неуверенные знания в рамках усвоенного учебного материала. При ответах на дополнительные вопросы было допущено много неточностей.</p> <p>Аспирант выполнил контрольное задание билета с существенными неточностями. Показал в целом успешное, но не систематическое применение полученных знаний и умений при решении профессиональных задач в рамках усвоенного учебного материала. При ответах на дополнительные вопросы было допущено много неточностей.</p>
2	<p>При ответе на теоретический вопрос билета аспирант продемонстрировал фрагментарные знания при ответе на теоретический вопрос билета. При ответах на дополнительные вопросы было допущено множество неправильных ответов.</p> <p>При выполнении контрольного задания билета аспирант продемонстрировал частично освоенное умение и применение полученных навыков при решении профессиональных задач в рамках усвоенного учебного материала. При ответах на дополнительные вопросы было допущено множество неточностей.</p>

9. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине

Задания для текущего контроля и проведения промежуточной аттестации должны быть направлены на оценивание:

1. уровня освоения теоретических понятий, научных основ профессиональной деятельности;
2. степени готовности аспиранта применять теоретические знания и профессионально значимую информацию и оценивание сформированности когнитивных умений.
3. приобретенных умений, профессионально значимых для профессиональной деятельности.

10. Типовые контрольные вопросы и задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов освоения дисциплины

Перечень контрольных вопросов и заданий для сдачи кандидатского экзамена по научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела разработан с учетом научных достижений научно-исследовательской школы кафедр.

Типовые творческие задания:

1. Сформулировать возможные типы граничных условий на поверхности контакта упругих тел. (Варианты: упруго-пластических тел, с учетом и неучетом трения).

2. Обосновать выбор варианта нелинейной теории вязкоупругости для описания семейства экспериментально полученных кривых ползучести. (Берутся конкретные экспериментальные данные из статьи или монографии, опубликованные в рекомендованном руководителем научном издании).

3. Выполнить анализ задач и проблем механики деформируемого твердого тела в связи с описанием механических явлений, реализующихся в конкретном технологическом процессе: постановки задач, методы решения. (Берется конкретный технологический процесс по рекомендации научного руководителя: например, аддитивные технологии металлов и полимеров, технологии изготовления композиционных материалов и конструкций и т.п.).

Типовые контрольные задания:

1. Получить приближенное решение задачи неустановившейся ползучести стержневой решетки в рамках технической теории течения.

2. Записать слабую формулировку плоской задачи теории упругости на основе метода Галеркина.

3. Построить общую схему формирования глобальных матриц жесткости и вектора внешних узловых сил метода конечных элементов.

4. Обосновать возможность оценки долговечности с учетом залечивания повреждений на основе теории длительной прочности А.А.Ильюшина.

5. Сформулировать схему построения дискретного аналога плоской задачи теории упругости на основе непрямого метода граничных элементов.

6. Сравнить время до разрушения вязкоупругого стержня по критериям Бейли и Ильюшина при заданном режиме изменения напряжения во времени (задается научным руководителем).

7. Вывести слабую формулировку плоской задачи теории упругости на основе метода Галеркина.

8. Получить конечно-разностный аналог задачи о кручении упругого стержня квадратного сечения. Оценить порядок аппроксимации построенной разностной схемы.

9. Получить законы сохранения механики сплошных сред: уравнения баланса массы, импульса, момента импульса.

10. Получить уравнения движения динамической задачи теории упругости в форме Ламе. Сформулировать динамические, геометрические и кинематические условия совместности на волновом фронте. Свободные волны в неограниченной изотропной упругой среде. Общее решение в форме Ламе.

11. Формулировка краевых задач теории вязкоупругости. Методы решения краевых задач теории вязкоупругости: принцип соответствия Вольтерры, применение интегрального преобразования Лапласа, численные методы.

12. Феноменологические теории прочности. Критерии разрушения: деформационный, энергетический, энтропийный.

Полный комплект вопросов и заданий в форме утвержденных билетов хранится на кафедре ДПМ.

Программа
Механика биоматериалов
Кафедра
Динамика и прочность машин

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет» (ПНИПУ)

Дисциплина
«Механика деформируемого твердого тела»

БИЛЕТ № 1

1. Тензор деформации Коши-Грина. Геометрический смысл компонент тензора деформации Грина. Тензор деформации Альманси. Геометрический смысл компонент тензора деформации Альманси. Условия совместности деформаций. Формулы Чезаро.
2. Вывод слабой формулировки плоской задачи теории упругости на основе метода Галеркина.
3. Получить конечно-разностный аналог задачи о кручении упругого стержня квадратного сечения. Оценить порядок аппроксимации построенной разностной схемы.

Доцент кафедры ДПМ

« ____ » _____ 2023 г.

(подпись)

Ташкинов М.А.

Лист регистрации изменений

№ п.п.	Содержание изменения	Дата, номер протокола заседания кафедры. Подпись заведующего кафедрой
1	2	3
1		
2		
3		
4		