

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
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
«02» сентября 2022 г.

УТВЕРЖДАЮ



Директор ПФИЦ УрО РАН
РАН О.А. Плехов

«02» сентября 2022 г.

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

«МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА»

Специальность 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела
(код и наименование)

Форма обучения:

Очная

Курс: 3

Семестр(ы): 5

Трудоёмкость:

Часов по рабочему учебному плану: 108

Виды контроля:

Экзамен: 1

Зачёт: нет

Курсовой проект: нет

Курсовая работа: нет

Пермь 2022

Фонд оценочных средств (ФОС) для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине «Механика деформируемого твердого тела» разработан на основании:

- Приказа Министерства науки и высшего образования РФ от 20 октября 2021г. №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)»;
- рабочего учебного плана очной формы обучения по специальности: «Механика деформируемого твердого тела», основной образовательной программы аспирантуры (уровень подготовки кадров высшей квалификации), утверждённой протоколом №3 заседания Объединенного ученого совета ПФИЦ УрО РАН от «18» марта 2022 г.
- Положения о порядке разработки и утверждения программ аспирантуры Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН) принятого на заседании Объединенного ученого совета ПФИЦ УрО РАН, протокол № 3 от 18.03.2022.
- Примерной программы кандидатского экзамена, утвержденной Министерством образования и науки Российской Федерации.

Разработчик

д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. РАН
(учёная степень, звание)

(подпись)

Плехов О.А.
(инициалы, фамилия)

Рецензент:

д.ф.-м.н., профессор
(учёная степень, звание)

(подпись)

Роговой А.А.
(инициалы, фамилия)

1. Контролируемые результаты обучения

1.1 Описание курса «Механика деформируемого твердого тела», результаты обучения

Согласно профессиональной образовательной программе аспирантуры по специальности Механика деформируемого твердого тела (1.1.8), учебная дисциплина, относится к образовательному компоненту структуры программы аспирантуры и входит в число обязательных дисциплин, направленных на сдачу кандидатского экзамена образовательной программы по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

«Механика деформируемого твердого тела» предназначена для формирования и развития у аспирантов знаний, умений, навыков в области решения задач механики сплошных сред, и смежных областей; получения 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; овладения 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 и успешную сдачу кандидатского экзамена по специальности, а также на подготовку аспирантов к защите диссертации на соискание степени кандидата наук.

В процессе изучения дисциплины «Механика деформируемого твердого тела» аспирант формирует:

- Способность проводить научные исследования в области механики деформируемого твердого тела;
- Способность получать численные и аналитические решения краевых задач для прогноза поведения деформируемых твердых тел различной природы при разнообразных воздействиях);
- Способность анализировать и формулировать связи между структурой материалов, характером внешних воздействий и процессами деформирования и разрушения);
- Способность проводить моделирование технологических проблем деформирования и разрушения, а также предупреждения недопустимых деформаций и трещин в конструкциях различного назначения);
- Способность планировать, проводить и интерпретировать экспериментальные данные по изучению деформирования, повреждения и разрушения материалов).

1.2 Этапы формирования знаний по дисциплине.

Учебный материал дисциплины осваивается за 5-й семестр, в котором предусмотрены консультации и самостоятельная работа аспирантов. Уровень освоения дисциплины проверяется по результатам промежуточного и итогового контроля.

Перечень контролируемых результатов обучения по дисциплине

Контролируемые результаты обучения дисциплине	Текущий контроль	Промежуточный контроль	Кандидатский экзамен (итоговый контроль)
Знать 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)	УО	ТВ	ТВ
Знать методологию, конкретные методы и приемы решения краевых задач, встречающихся при исследовании проблем механики деформируемого твёрдого тела	УО	ТВ	ТВ
Знать методологию, конкретные методы и приемы анализа связи между структурой материалов, характером внешних воздействий и процессами деформирования и разрушения	УО	ТВ	ТВ
Знать современные методы моделирования технологических проблем деформирования и разрушения, а также предупреждения недопустимых деформаций и трещин в конструкциях различного назначения	УО	ТВ	ТВ
Знать современные методы, приемы планирования эксперимента, обработки и интерпретации экспериментальных данных по изучению деформирования, повреждения и разрушения материалов	УО	ТВ	ТВ
Уметь 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	ОТЗ	ПЗ	
Уметь ставить задачу и проводить численные и аналитические исследования краевых задач для прогноза поведения	ОТЗ	ПЗ	

деформируемых твердых тел различной природы при разнообразных воздействиях			
Уметь применять теоретические знания по методам сбора, хранения, обработки и передачи информации	ОТЗ	ПЗ	
Уметь ставить и решать задачу о связи между изменением структуры материала и особенностями процесса деформирования и разрушения	ОТЗ	ПЗ	
Уметь ставить задачу и проводить анализ технологических проблем деформирования и разрушения, прогнозировать особенности возникновения и распространения трещин в конструкционных материалах	ОТЗ	ПЗ	
Уметь планировать проведение экспериментов, анализировать и интерпретировать экспериментальные данные по изучению деформирования, повреждения и разрушения материалов	ОТЗ	ПЗ	
Владеть - методами решения задач и анализа проблем механики деформируемого твёрдого тела	ОТЗ	ПЗ	
Владеть методами самостоятельного анализа краевых задач для различных классов уравнений, практическими навыками и знаниями использования современных исследовательских и проектных технологий	ОТЗ	ПЗ	
Владеть методами самостоятельного анализа имеющейся информации (данных оптической, атомно-силовой и электронной микроскопии, результатов механических и физических экспериментов); практическими навыками и знаниями использования результатов современных исследований в области связи между структурой материалов, характером внешних воздействий и процессами деформирования и разрушения	ОТЗ	ПЗ	
Владеть методами самостоятельного анализа имеющейся информации (лабораторных и натурных испытаний), практическими навыками и знаниями использования результатов современных исследований в области моделирования технологических проблем деформирования и разрушения	ОТЗ	ПЗ	

Владеть методами самостоятельного анализа имеющейся информации, практическими навыками и знаниями анализа и использования результатов экспериментальных данных по изучению деформирования, повреждения и разрушения материалов	ОТЗ	ПЗ		
--	-----	----	--	--

УО - устный опрос; ТВ - теоретический вопрос; ОТЗ - отчет о творческом задании; ПЗ - практическое задание с учетом темы научно-исследовательской деятельности.

Устный опрос - средство контроля, организованное для выяснения объема знаний обучающегося по определенному разделу, теме, проблеме и т.п.

Творческое задание - выступление с подготовленным в ходе самостоятельной работы материалом на тему научно-исследовательской деятельности, позволяющее диагностировать умения интегрировать знания различных областей.

Итоговой оценкой результатов обучения по дисциплине является кандидатский экзамен по специальности, проводимый с учетом результатов текущего и промежуточного контроля.

2. Описание показателей и критериев оценивания, описание шкал оценивания

Используются различные формы оценочных средств текущего и промежуточного контроля. В качестве контролируемых результатов обучения в рамках освоения учебного материала дисциплины выступают знать, уметь, владеть.

2.1 Текущий контроль

Текущий контроль для комплексного оценивания показателей **знаний, умений и владений** проводится в форме собеседования или творческого задания.

– Устный опрос

Устный опрос – средство контроля, организованное как специальная беседа преподавателя с аспирантом на темы, связанные с изучаемой дисциплиной, и рассчитанное на выяснение объема *знаний* обучающегося по определенному разделу, теме, проблеме и т.п.

Устный опрос может выполняться в индивидуальном порядке или с группой аспирантов. Критерии и показатели оценивания собеседования отображены в шкале, представленной в Таблице.

Уровень освоения	Критерии оценивания уровня освоения учебного материала
Зачтено	Аспирант достаточно свободно использует фактический материал по заданному вопросу, умеет определять причинно-следственные связи событий, логично и грамотно, используя профессиональную терминологию, обосновывает свою точку зрения.
Не	Аспирант демонстрирует полное незнание материала или наличие

зачтено	бессистемных, отрывочных знаний, связанных с поставленным перед ним вопросом, при этом не ориентируется в профессиональной терминологии.
---------	--

Защита отчёта о творческом задании

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

Творческие задания могут выполняться в индивидуальном порядке или группой аспирантов. Критерии оценивания защиты отчёта о творческом задании отображены в шкале, приведённой в Таблице.

Уровень освоения	Критерии оценивания уровня освоения учебного материала
Зачтено	Аспирант выполнил творческое задание успешно, показав в целом систематическое или сопровождающееся отдельными ошибками применение освоенных умений и владений. Аспирант ориентируется в предложенном решении, может его модифицировать при изменении условия задачи. Аспирант может объяснить полностью или частично полученные результаты.
Не зачтено	Аспирант допустил много ошибок или не выполнил творческое задание.

2.2 Промежуточный контроль

Допуск к промежуточному контролю осуществляется по результатам текущего контроля. Промежуточный контроль проводится в виде контрольных мероприятий в конце изучения дисциплины в виде собеседования (промежуточный контроль - 1 контрольное мероприятие)

2.2.1 Шкалы оценивания результатов обучения в ходе промежуточного контроля

Оценка результатов обучения дисциплине в форме уровня сформированности знаний, умений, и навыков проводится по шкале оценивания «зачтено», «не зачтено» путем выборочного контроля во время контрольных мероприятий

Типовая шкала и критерии оценки результатов обучения при сдаче контрольного мероприятия приведена в Таблице.

Шкала оценивания уровня знаний, умений и владений во время контрольного мероприятия

Оценка	Критерии оценивания
Зачтено	Аспирант продемонстрировал сформированные или содержащие отдельные пробелы знания при ответе на теоретический вопрос билета. Показал сформированные или содержащие отдельные пробелы знания в рамках усвоенного учебного материала. Ответил на большинство дополнительных вопросов правильно. Аспирант выполнил практическое задание билета правильно или с небольшими неточностями. Показал отличные или сопровождающиеся отдельными ошибками применение навыков полученных знаний и умений при решении профессиональных

	задач в рамках усвоенного учебного материала. Ответил на большинство дополнительных вопросов правильно.
<i>Не зачтено</i>	При собеседовании с преподавателем аспирант продемонстрировал фрагментарные знания. При ответах на дополнительные вопросы было допущено множество неправильных ответов. При выполнении практического задания аспирант продемонстрировал частично освоенное умение и применение полученных навыков при решении профессиональных задач в рамках учебного процесса. При ответах на дополнительные вопросы было допущено множество неточностей.

2.3 Итоговый контроль

Допуск к итоговому контролю осуществляется по результатам текущего и промежуточного контроля. Итоговый контроль по дисциплине проходит в форме кандидатского экзамена по специальности, в устно-письменной форме по билетам.

Экзамен сдаётся по программе кандидатского экзамена по дисциплине «Механика деформируемого твердого тела», утверждённой директором ПФИЦ УрО РАН и входит в промежуточную аттестацию по программе аспирантуры.

Кандидатский экзамен по специальности «Механика деформируемого твердого тела» оценивается по 5-балльной системе оценивания. Типовая шкала и критерии оценки результатов обучения при сдаче кандидатского экзамена для компонентов *знать, уметь и владеть*.

Для сдачи кандидатского экзамена формируются и утверждаются билеты (Приложение 1 - пример типового билета). Билет содержит теоретический вопрос (ТВ) для проверки *знаний* и практические задания (ПЗ) для проверки *умений и владений*.

Критерии оценивания ответов на экзамене

При определении оценки учитывается грамотность предоставленных ответов, стиль изложения и способность ответить на поставленный вопрос по существу.

Ответы на вопросы оцениваются исходя из следующих критериев:

«Отлично» - содержание ответа исчерпывает содержание вопроса. Аспирант демонстрирует как понимание, так и знание вопроса, а также проявляет способность применить исследовательские и информационные компетенции на практике по профилю своего обучения.

«Хорошо» - содержание ответа в основных чертах отражает содержание вопроса. Аспирант демонстрирует как понимание, так и знание вопроса, но обнаруживает незначительные проблемы в проявлении способности применить исследовательские и информационные компетенции на практике по профилю своего обучения.

«Удовлетворительно» - содержание ответа в основных чертах отражает содержание вопроса, но допускаются ошибки. Не все положения вопроса раскрыты полностью. Имеются фактические пробелы и неполное владение информацией из учебной литературы. Нарушаются нормы разговорного языка, наблюдается нечеткость и двусмысленность устной речи. Слабая практическая применимость исследовательских и информационных компетенций по профилю своего обучения.

«Неудовлетворительно» - содержание ответа не отражает содержание вопроса. Имеются грубые ошибки, а также незнание ключевых определений и информации из учебной литературы. Ответ не носит характер развернутого изложения темы, наличие отсутствие практического применения исследовательских и информационных компетенций на практике по профилю своего обучения.

Критерии оценивания на кандидатском экзамене

Итоговая оценка	Критерии оценивания
5	Аспирант получил по дисциплине оценку «отлично»
4	Аспирант получил по дисциплине оценку «хорошо»
3	Аспирант получил по дисциплине оценку «удовлетворительно»
2	Аспирант получил по дисциплине оценку «неудовлетворительно»

3. 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.

Задания для оценивания когнитивных умений (знаний) должны предусматривать необходимость проведения аспирантом интеллектуальных действий:

- по дифференциации информации на взаимозависимые части, выявлению взаимосвязей между ними и т.п.;
- по интерпретации и творческому усвоению информации из разных источников, ее системного структурирования;
- по комплексному использованию интеллектуальных инструментов учебной дисциплины для решения учебных и практических проблем.

При составлении заданий необходимо иметь в виду, что они должны носить практико-ориентированный комплексный характер.

4. Типовые контрольные вопросы и задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

4.1 Перечень тем творческих заданий для текущего контроля

1. Сформулировать возможные типы граничных условий на поверхности контакта упругопластических тел, с учетом и без учета трения.
2. Обосновать выбор варианта нелинейной теории вязкоупругости для описания семейства экспериментально полученных кривых ползучести. (Берутся конкретные экспериментальные данные из статьи и монографии).
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 ком позиционных материалов и конструкций и т.п.).
4. Получить приближенное решение задачи неустановившейся ползучести стержневой решетки в рамках технической теории течения.
5. Записать слабую формулировку плоской задачи теории упругости на основе метода Галеркина.
6. Построить общую схему формирования глобальных матриц жесткости и вектора внешних узловых сил метода конечных элементов.
7. Обосновать возможность оценки долговечности с учетом залечивания повреждений на основе теории длительной прочности А.А. Ильюшина.
8. Сформулировать постановку задачи в напряжениях или в перемещениях: записать необходимые уравнения и граничные условия; решить задачу и определить напряжения и перемещения; проанализировать полученное решение: сравнить (если это возможно) с соответствующими решениями, полученными в курсе сопротивления материалов; построить эпюры напряжений (по указанию преподавателя) или определить значения напряжений и (или) перемещений в отдельных точках в задаче на выбор:
 - упругое полупространство, нагруженное сосредоточенной силой, перпендикулярной к границе (задача Буссинеска);
 - упругое полупространство, нагруженное касательной силой в граничной плоскости (задача Черутти);
 - кручение конического вала;
 - кручение стержней треугольного поперечного сечения;
 - кручение круглого стержня с полукруглой выточкой;
 - кручение стержня прямоугольного сечения;
 - напряжения в толстостенной трубе при действии внутреннего и внешнего давления;
 - местные напряжения вокруг сферической полости;
 - давление между двумя соприкасающимися сферическими телами (задача Герца);
 - напряжения от действия силы, приложенной в произвольной точке бесконечного тела (задача Кельвина);
 - толстостенный сферический сосуд, находящийся под действием равномерного внутреннего и внешнего давления;
 - напряжения во вращающемся толстом диске.

4.2 Типовые контрольные вопросы для оценивания знаний на контрольном мероприятии по дисциплине

1. Криволинейные системы координат – ковариантный и контравариантный базисы, основная квадратичная форма.
2. Вычисление коэффициентов основной квадратичной формы в цилиндрической и сферической координатных системах.
3. Скаляры, векторы, тензоры, операции над ними.
4. Метрический и дискриминантный тензоры.
5. Символы Кристоффеля и их вычисление.
6. Ковариантное дифференцирование и его свойства.
7. Тензоры поверхности.
8. Запись основных дифференциальных операторов в криволинейных координатах.
9. Запись интегральных теорем Стокса и Гаусса – Остроградского в криволинейных координатах.
10. Методы Лагранжа и Эйлера описания движения сплошной среды, связь между ними.
11. Тензоры деформаций и скоростей деформаций, выражения их компонент через компоненты вектора перемещений и вектора скоростей.
12. Упрощения этих выражений при малых удлинениях и сдвигах – тензор малых деформаций.
13. Уравнения совместности малых деформаций.
14. Массовые и поверхностные силы. Основная лемма.
15. Уравнения неразрывности и несжимаемости.
16. Тензор напряжений. Механическое истолкование компонент тензора напряжений.
17. Выражение для компонент вектора напряжений на площадке через тензор напряжений и нормаль к площадке.
18. Уравнения движения сплошной среды. Симметрия тензора напряжений.
19. Закон Гука. Классическая модель изотропного упругого тела.
20. Уравнения. Ламе.
21. Постановка основных краевых задач статики упругого тела. Теорема единственности решения. этих краевых задач.
22. Задача Ламе.
23. Кручение упругих стержней. Принцип Сен-Венана.
24. Сведение задачи кручения упругих стержней к задачам Дирихле и Неймана для уравнения Лапласа.
25. Принцип Вольтерра. Применение преобразования Лапласа в задачах о деформировании вязко-упругих тел.
26. Напряженное состояние в окрестности точки тела. Граничные условия. Тензор напряжений. Инварианты тензора напряжений. Дифференциальные уравнения равновесия.

27. Перемещения и деформации. Виды деформации. Однородная деформация. Составляющие малой деформации. Соотношения Коши. Тензор деформации. Линейная деформация элемента произвольного направления.
28. Обобщенный закон Гука. Различные формы записи обобщенного закона Гука. Закон Гука в форме Ляме. Закон Гука для шаровых тензоров и девиаторов.
29. Работа внешних сил и потенциальная энергия деформаций. Энергия изменения объема и энергия изменения формы.
30. Постановка задач теории упругости. Полная система уравнений теории упругости в декартовых координатах.
31. Граничные условия в напряжениях, перемещениях, смешанные и интегральные граничные условия.
32. Постановка задач теории упругости в перемещениях. Уравнения Ляме.
33. Постановка задач теории упругости в напряжениях. Уравнения Бельтрами–Митчелла.
34. Плоская задача теории упругости в декартовых координатах.
35. Плоская деформация. Плоское напряженное состояние. Функция напряжений Эри. Теорема Леви-Митчелла.
36. Уравнения теории упругости в цилиндрических и сферических координатах.
37. Задача для бесконечного клина, нагруженного в вершине сосредоточенной силой.
38. Действие сосредоточенной силы на полуплоскость.
39. Изгиб тонких пластин. Основные гипотезы технической теории изгиба пластин. Перемещения, деформации, напряжения и внутренние усилия в пластинах при изгибе.
40. Дифференциальное уравнение изгиба пластины.
41. Расчет прямоугольных пластин с помощью двойных тригонометрических рядов.
42. Расчет прямоугольных пластин с помощью одинарных тригонометрических рядов.
43. Расчет балок и прямоугольных пластин с помощью метода Ритца.
44. Расчет балок и пластин с помощью метода Бубнова-Галеркина.
45. Пластическое деформирование твердых тел. Предел текучести. Упрочнение. Остаточные деформации. Идеальная пластичность. Физические механизмы пластического течения.
46. Идеальное упруго пластическое тело. Идеальное жестко пластическое тело. Пространство напряжений. Критерий текучести и поверхности текучести.
47. Критерий текучести Треска-Мизеса. Пространство главных напряжений. Геометрическая интерпретация условий текучести.
48. Условие полной пластичности. Влияние среднего напряжения.
49. Упрочняющееся упругопластическое тело. Упрочняющееся жесткопластическое тело.
50. Теория предельного равновесия.
51. Понятие о ползучести и релаксации. Кривые ползучести и релаксации. Простейшие модели линейно вязкоупругих: модель Максвелла, модель Фохта, модель Томсона.
52. Определяющие соотношения теории вязко упругости. Ядра ползучести и релаксации. Непрерывные ядра и ядра со слабой особенностью.

53. Формулировка краевых задач теории вязко упругости.
54. Методы решения краевых задач теории вязко упругости: применение интегральных преобразований Лапласа, численные методы. Теорема единственности.
55. Понятие о разрушении и прочности. Общие закономерности и основные типы разрушения.
56. Концентраторы напряжений. Коэффициент концентрации напряжений. Феноменологические теории прочности. Критерии разрушения.
57. Растяжение упругой полуплоскости с круговым отверстием.

4.3 Типовые контрольные вопросы для оценивания умений и владений во время промежуточного контроля по дисциплине

1. Стальной цилиндр, внешний диаметр которого 35.2 см и толщина стенок 5 см, подвергнут действию внутреннего давления 2440 атм. На наружной поверхности цилиндр не нагружен. Определить величины наибольших растягивающих и сжимающих напряжений. Цилиндр предполагать достаточно длинным со свободными торцами, т. е. осевые напряжения в цилиндре – отсутствующими. Построить графики распределения напряжений в стенке цилиндра.
2. Внутри толстостенной сферы действует давление P_a . Наружная поверхность сферы жестко закреплена в неподвижном фундаменте. Найти распределение напряжений и перемещений в стенке сферы, построить графики этих зависимостей. Характеристики материала сферы и величины нагрузок выбрать по своему усмотрению.
3. На вал, диаметр которого $d = 10$ см, в горячем состоянии надета рубашка, внутренний диаметр которой до нагревания был на $0.001d$ меньше диаметра вала. Толщина стенок рубашки 10 см. Вал и рубашка – стальные.
4. Найти напряженное и деформированное состояние рубашки. Построить графики распределений напряжений в рубашке (цилиндре).
5. На медный цилиндр с внешним диаметром 40 см и толщиной стенок 10 см плотно надет стальной цилиндр с внутренним диаметром 40 см и внешним 60 см. Точки внутренней поверхности составного цилиндра получают перемещение $+0.01$ мм. Точки наружной поверхности составного цилиндра неподвижны. Найти распределения напряжений в обоих цилиндрах. Построить графики распределения этих напряжений.
6. Рассмотреть напряженное и деформированное состояние составного длинного цилиндра, внутренняя часть которого выполнена из чисто вязкого материала, а наружная – из упругого. Все материальные параметры и параметры нагружения для демонстрационных расчетов выбрать по своему усмотрению. Предположить, что цилиндр подвергается нагружению внезапно возникшим внутренним давлением.
7. Вывести формулу для момента инерции тонкого стержня массой m и длиной l относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно его длине.
8. Когда натянутая стальная струна охлаждается, ее натяжение, а следовательно, и зависящая от него энергия увеличиваются. За счет чего происходит увеличение энергии?
9. Стальная полоска зажата с одного конца и расположена горизонтально. На другом конце полоски закрепляют груз, масса которого значительно больше массы полоски. При наличии груза полоска изгибается и ее незажатый конец опускается на 4 см. а) С какой частотой будет колебаться груз, если его толкнуть в вертикальном направлении? б) С каким

ускорением будет двигаться колеблющийся груз в тот момент, когда полоска полностью распрямится?

10. Верхний конец стальной проволоки диаметром 0,5 мм и длиной 80 см зашпелен. К нижнему концу проволоки прикреплен шар массой 2 кг и диаметром 10 см. Если шар повернуть вокруг вертикальной оси на небольшой угол и отпустить, он будет совершать вращательные колебания. Определите период колебаний шара.

4.4 Перечень контрольных вопросов для сдачи кандидатского экзамена по специальности 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела

1. 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 к Лагранжу и обратно.
2. 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.
3. Классификация сил в механике сплошных сред: внешние и внутренние силы, массовые и поверхностные силы. Тензоры напряжений Коши, Пиолы и Кирхгофа.
4. Законы сохранения механики сплошных сред: уравнения баланса массы, импульса, момента импульса, кинетической, потенциальной и полной энергии.
5. 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.
6. Физическая размерность. Анализ размерностей и П-теорема. Автомодельные решения. Примеры.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Действие сосредоточенной силы в неограниченной упругой среде. Тензор Грина. Граничные интегральные представления напряжений и перемещений. Формула Сомильяны. 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).

11. 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.

12. 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.

13. Задача о действии штампа с плоским основанием на полуплоскость. Контактная задача Герца.

14. 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 загруженной пластине.

15. 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.

16. Температурные задачи теории упругости. Уравнения термоупругости.

17. Пластическое деформирование твердых тел. Предел текучести. Упрочнение. Остаточные деформации. Идеальная пластичность. Физические механизмы пластического течения. Понятие о дислокациях. Локализация пластических деформаций. Линии Людерса-Чернова.

18. 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.

19. Упрочняющееся упругопластическое тело. Упрочняющееся жесткопластическое тело. Функция нагружения, поверхность нагружения. Параметры упрочнения.

20. 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.

21. Теория предельного равновесия. Статическая и кинематическая теоремы теории предельного равновесия. Верхние и нижние оценки. Примеры.

22. 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.

23. 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.

24. Плоские упругопластические задачи теории идеальной пластичности. Двухосное растяжение толстой и тонкой пластин с круговым отверстием.

25. 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.

26. Упругопластические волны в стержне. Ударное нагружение. Волна разгрузки. Остаточные деформации. Критическая скорость удара.

27. Понятие о ползучести и релаксации. Кривые ползучести и релаксации. Простейшие модели линейно вязкоупругих сред: модель Максвелла, модель Фохта, модель Томсона. Время релаксации. Время запаздывания.

28. Определяющие соотношения теории вязкоупругости. Ядра ползучести и релаксации. Непрерывные ядра и ядра со слабой особенностью. Термодинамические ограничения на выбор ядер ползучести и релаксации.

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

30. Вариационные принципы в линейной вязкоупругости. Применение вариационного метода к задачам изгиба.

31. Плоская задача о вдавливании жесткого штампа в вязкоупругую полуплоскость. Контакт вязкоупругих тел: аналог задачи Герца.

32. Определяющие соотношения нелинейной теории вязкоупругости. Разложение Вольтерры-Фреше. Упрощенные одномерные модели.

33. Теории старения, течения, упрочнения и наследственности. Ползучесть при сложном напряженном состоянии. Определяющие соотношения.

34. 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.

35. 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.

36. 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.

37. Феноменологические теории прочности. Критерии разрушения: деформационный, энергетический, энтропийный. Критерии длительной и усталостной прочности. Расчет прочности по допускаемым напряжениям. Коэффициент запаса прочности.

38. 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.

39. 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.

40. J-интеграл Эшелби-Черепанова-Райса и его инвариантность. Вычисление потока энергии в вершину трещины. JR-кривая.

41. Динамическое распространение трещин. Динамический коэффициент интенсивности напряжений. Предельная скорость трещины хрупкого разрушения (теоретическая оценка и экспериментальные данные).

42. 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.

43. Кинетическая концепция прочности твердых тел. Формула Журкова. Кинетическая теория трещин. Рост трещин в условиях ползучести.

44. Понятие об усталостном разрушении. Малоцикловая и многоцикловая усталость. Основные законы роста усталостных трещин.

45. Понятие о поврежденности. Типы поврежденности. Математическое представление поврежденности. Параметр поврежденности Качанова-Работнова.

46. Кинетические уравнения накопления поврежденности. Принцип линейного суммирования повреждений. Накопление повреждений в условиях ползучести.

47. Метод конечных разностей. Типичные разностные схемы для параболических, эллиптических и гиперболических уравнений. Метод конечных разностей для дифференциальных уравнений теории упругости.

48. Вариационный принцип минимума полной потенциальной энергии упругого тела. Методы Релея-Ритца, Бубнова-Галеркина и градиентного спуска в задачах минимизации функционала полной потенциальной энергии.

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

50. Формула Сомияяны и метод граничных интегральных уравнений (метод граничных элементов).

51. Метод характеристик в двумерных задачах теории пластичности. Область определенности и область зависимости решения гиперболической краевой задачи.

52. Метод лучевых разложений для решения гиперболических задач теории пластичности и волновой динамики.

53. Понятие о вычислительном эксперименте. Использование вычислительного эксперимента для решения задач механики деформируемого твердого тела.

54. 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.

55. Понятие единичного, обратного, симметричного, антисимметричного (кососимметричного), ортогонального, собственно ортогонального (поворота), положительно определенного и индифферентного тензоров.
56. След тензора. Собственные векторы и собственные числа тензора. Инварианты тензора. Отсчетная и актуальная конфигурации. Градиенты вектора в отсчетной и актуальной конфигурациях.
57. Дивергенция вектора и тензора в отсчетной и актуальной конфигурациях.
58. Деформационный градиент. Полярное разложение деформационного градиента. Правый и левый тензоры растяжения. Правый и левый тензоры Коши-Грина. Кратности удлинения.
59. Тензорные функции. Мера Генки. Тензор скоростей растяжения.
60. Спин. Объективные производные тензоров. Контравариантные, ковариантные и смешанные компоненты тензоров. Физические компоненты. Символы Кристоффеля. Компонентная запись уравнений механики сплошной среды в криволинейной системе координат.
61. Определяющие соотношения механики деформируемого твердого тела. Принцип детерминизма. Принцип локального действия. Принцип материальной независимости от системы отсчета. Дополнительные неравенства в теории упругости.
62. 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.
63. Внутренняя энергия, свободная энергия и энтропия деформируемой сплошной среды. Дифференциальные модели деформируемого твердого тела. Интегральные модели. Материалы с наложенными связями. Несжимаемые среды.
64. 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.
65. Концепция устойчивости упругих и вязкопластических систем. Устойчивость упругих и упругопластических сжатых стержней. Решений Эйлера, Энгессера, Кармана. Концепция устойчивости Шенли.
66. 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.
67. 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.
68. 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.

69. 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.

70. 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.

71. Модели упруговязкопластических 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.

72. 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. Соппротивление преграды динамическому внедрению ударника при проколе.

73. 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.

74. 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.

Пример типовой формы экзаменационного билета



«Институт механики сплошных сред УрО
РАН» - филиал ФГБУН Пермского
федерального исследовательского центра УрО
РАН

Специальность:
«Механика деформируемого твердого
тела»

Дисциплина «Механика деформируемого твердого тела»

БИЛЕТ №1

1. Криволинейные системы координат – ковариантный и контравариантный базисы, основная квадратичная форма.
(контроль знаний)
2. Стальной цилиндр, внешний диаметр которого 35.2 см и толщина стенок 5 см, подвергнут действию внутреннего давления 2440 атм. На наружной поверхности цилиндр не нагружен. Определить величины наибольших растягивающих и сжимающих напряжений. Цилиндр предполагать достаточно длинным со свободными торцами, т. е. осевые напряжения в цилиндре – отсутствующими. Построить графики распределения напряжений в стенке цилиндра.
(контроль умений и навыков)

Преподаватель

(подпись)

(ФИО)

« ____ » _____ 20__г.

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

[illegible]