

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

Принято на заседании
Объединенного ученого совета
ПФИЦ УрО РАН
Протокол № 7
«24» сентября 2019 г.

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

«24» сентября 2019 г.



**ФОНД
ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

«Нелинейные аспекты разрушения»

Направление 01.06.01 Математика и механика
(код и наименование)

Профиль программы аспирантуры Механика деформируемого твердого тела (01.02.04)

Квалификация выпускника: Исследователь. Преподаватель-исследователь

Форма обучения: Очная

Курс: 1 Семестр(ы): 1, 2

Трудоёмкость:

Кредитов по рабочему учебному плану: 3 ЗЕ

Часов по рабочему учебному плану: 108 ч

Виды контроля:

Экзамен: - **нет** Зачёт: **2** Курсовой проект: - **нет** Курсовая работа: - **нет**

Фонд оценочных средств (ФОС) для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине «Нелинейные аспекты разрушения» разработан на основании:

- федерального государственного образовательного стандарта высшего образования, утверждённого приказом Министерства образования и науки Российской Федерации «30» июля 2014 г. номер приказа «866» по направлению подготовки 01.06.01 Математика и механика (уровень подготовки кадров высшей квалификации);
- компетентностной модели выпускника ООП по направлению подготовки 01.06.01 Математика и механика (уровень подготовки кадров высшей квалификации), программы аспирантуры Механика деформируемого твердого тела (01.02.04), утверждённой «24» сентября 2019 г.;
- базового учебного плана очной формы обучения по направлению подготовки 01.06.01 Математика и механика (уровень подготовки кадров высшей квалификации), программы аспирантуры Механика деформируемого твердого тела (01.02.04), утверждённой «24» сентября 2019 г.;
- примерной программы кандидатского экзамена, утвержденного Министерством образования и науки Российской Федерации;
- положением о формировании фонда оценочных средств, принятого на заседании Объединенного ученого совета ПФИЦ УрО РАН, протокол № 4 от 11.05.2018, утверждено распоряжением директора ПФИЦ УрО РАН №21 от 14.05.2018.

Разработчик д.ф.-м.н., профессор Наймарк Наймарк О.Б.
(учёная степень, звание) (подпись) (инициалы, фамилия)

Рецензент: д.ф.-м.н., профессор А.А. Роговой А.А.
(учёная степень, звание) (подпись) (инициалы, фамилия)

Согласовано: д.ф.-м.н., профессор Плехов Плехов О.А.
Зам. директора (учёная степень, звание) (подпись) (инициалы, фамилия)
ИМСС УрО РАН
по науке

1. Перечень формируемых частей компетенций, этапы их формирования и контролируемые результаты обучения

1.1 Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы

Согласно профессиональной образовательной программе аспирантуры по направлению подготовки: 01.06.01 – Математика и механика, направленность Механика деформируемого твердого тела (01.02.04) учебная дисциплина Б1.В.ДВ1.2 «Нелинейные аспекты разрушения» предназначена для формирования системы знаний и современных представлений о физических механизмах развития разрушения в твердых телах (металлах, керамиках, стеклах, композитах) с учетом многомасштабных закономерностей развития дефектов, отражения последних в континуальных моделях поведения твердых тел. Отличительной особенностью настоящего курса является его междисциплинарность. Основу курса составляют разделы физики твердого тела, отражающие современные результаты теории дефектов, экспериментальные методы исследования дефектной структуры, теории критических явлений, механики разрушения, статистические подходы в оценке надежности и разрушения.

В процессе изучения дисциплины «Нелинейные аспекты разрушения» аспирант формирует части следующих компетенций:

- ПК-1 (способность проводить научные исследования в области механики деформируемого твёрдого тела);

- ПК-2 (способность получать численные и аналитические решения краевых задач для прогноза поведения деформируемых твердых тел различной природы при разнообразных воздействиях);

- ПК-3 (способность анализировать и формулировать связи между структурой материалов, характером внешних воздействий и процессами деформирования и разрушения);

- ПК-5 (способность планировать, проводить и интерпретировать экспериментальные данные по изучению деформирования, повреждения и разрушения материалов).

1.2 Этапы формирования компетенций.

Учебный материал дисциплины осваивается за 1-й и 2-й семестр, в которых предусмотрены аудиторские занятия и самостоятельная работа аспирантов. При изучении дисциплины формируются компоненты компетенций знать, уметь, владеть, указанные в дисциплинарных картах соответствующих компетенций в РПД. Уровень освоения дисциплины проверяется по результатам приобретения указанных компонент компетенций.

Перечень контролируемых результатов обучения по дисциплине (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)

Контролируемые результаты обучения дисциплине (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Вид контроля			
	1 семестр		2 семестр	
	Текущий	Зачёт	Текущий	Зачёт
Усвоенные знания				
3 ПК-1 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	УО	ТВ		

структурно-кинетических переходов в материале)				
З ПК-2 Знать методологию, конкретные методы и приемы решения краевых задач, встречающихся при исследовании проблем механики деформируемого твёрдого тела			УО	ТВ
З ПК-3 Знать методологию, конкретные методы и приемы анализа связи между структурой материалов, характером внешних воздействий и процессами деформирования и разрушения	УО	ТВ		
З ПК-5 Знать современные методы, приемы планирования эксперимента, обработки и интерпретации экспериментальных данных по изучению деформирования, повреждения и разрушения материалов			УО	ТВ
Освоенные умения				
У ПК-1 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		
У1 ПК-2 Уметь ставить задачу и проводить численные и аналитические исследования краевых задач для прогноза поведения деформируемых твердых тел различной природы при разнообразных воздействиях	ОТЗ			ПЗ
У2 ПК-2 Уметь применять теоретические знания по методам сбора, хранения, обработки и передачи информации	ОТЗ	ПЗ		
У ПК-3 Уметь ставить и решать задачу о связи между изменением структуры материала и особенностями процесса деформирования и разрушения	ОТЗ			ПЗ
У ПК-5 Уметь планировать проведение экспериментов, анализировать и интерпретировать экспериментальные данные по изучению деформирования, повреждения и разрушения материалов	ОТЗ	ПЗ		
Приобретенные владения				
В ПК-1 Владеть - методами решения задач и анализа проблем механики деформируемого твёрдого тела	ОТЗ	ПЗ		
В ПК-2 Владеть методами самостоятельного анализа краевых задач для различных классов уравнений, практическими навыками и знаниями использования современных исследовательских и проектных технологий	ОТЗ			ПЗ
В ПК-3 Владеть методами самостоятельного анализа имеющейся информации (данных оптической, атомно-силовой и электронной микроскопии, результатов механических и	ОТЗ	ПЗ		

физических экспериментов); практическими навыками и знаниями использования результатов современных исследований в области связи между структурой материалов, характером внешних воздействий и процессами деформирования и разрушения				
В ПК-5 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; ТЗ - творческое задание с учетом темы научно-исследовательской деятельности; ОТЗ - отчет по творческому заданию; 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 - частично регламентированное задание, имеющее нестандартное решение и позволяющее диагностировать умения, интегрировать знания различных областей, аргументировать собственную точку зрения.

Итоговой оценкой освоения дисциплинарных частей компетенций (результатов обучения по дисциплине) является аттестация в виде зачета, проводимая с учетом результатов текущего контроля.

2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания.

В процессе формирования заявленных компетенций используются различные формы оценочных средств текущего и промежуточного контроля. Компоненты дисциплинарных компетенций, указанные в дисциплинарных картах компетенций в рабочей программе дисциплины, выступают в качестве контролируемых результатов обучения в рамках освоения учебного материала дисциплины: знать, уметь, владеть.

2.1 Текущий контроль

Текущий контроль для комплексного оценивания показателей **знаний, умений и владений** дисциплинарных частей компетенций проводится в форме устного опроса и защиты отчета по творческому заданию.

Шкала оценивания уровня знаний, умений и владений при устном опросе

Уровень освоения	Критерии оценивания уровня освоения учебного материала
<i>Зачтено</i>	Аспирант достаточно свободно использует фактический материал по заданному вопросу, умеет определять причинно-следственные связи событий, логично и грамотно с использованием профессиональной терминологии обосновывает свою точку зрения.
<i>Не зачтено</i>	Аспирант демонстрирует полное незнание материала или наличие бессистемных, отрывочных знаний, связанных с поставленным перед ним вопросом, при этом не ориентируется в профессиональной терминологии.

Критерии оценивания защиты отчета творческого задания

Уровень освоения	Критерии оценивания уровня освоения учебного материала
<i>Зачтено</i>	Аспирант выполнил творческое задание успешно, показав в

	целом систематическое или сопровождающееся отдельными ошибками применение полученных знаний и умений , аспирант ориентируется в предложенном решении, может его модифицировать при изменении условия задачи. Аспирант может объяснить полностью или частично полученные результаты.
<i>Не зачтено</i>	Аспирант демонстрирует полное незнание материала или наличие бессистемных, отрывочных знаний, связанных с поставленным перед ним вопросом, при этом не ориентируется в профессиональной терминологии.

2.2 Итоговая аттестация

Допуск к итоговой аттестации осуществляется по результатам текущего контроля. Аттестация проводится в виде зачета по дисциплине в устно-письменной форме по билетам. Билет содержит теоретический вопрос (ТВ) для проверки знаний и практическое задание (ПЗ) для проверки умений и владений заявленных дисциплинарных частей компетенций.

Билет формируется таким образом, чтобы в него попали вопросы и практические задания, контролирующие уровень сформированности всех заявленных дисциплинарных компетенций (Приложение 1).

Оценка результатов обучения дисциплине в форме уровня сформированности компонентов знать, уметь, владеть заявленных дисциплинарных компетенций проводится по шкале оценивания «зачтено», «не зачтено» путем выборочного контроля во время зачета.

Шкала оценивания уровня знаний, умений и владений на зачете

Оценка	Критерии оценивания
<i>Зачтено</i>	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.

При оценке уровня сформированности дисциплинарных частей компетенций в рамках выборочного контроля при сдаче зачета считается, что полученная оценка проверяемой в билете дисциплинарной части компетенции обобщается на все дисциплинарные части компетенций, формируемых в рамках данной учебной

дисциплины. Общая оценка уровня сформированности всех дисциплинарных частей компетенций проводится с учетом результатов текущего контроля в виде интегральной оценки по системе оценивания «зачтено» и «не зачтено».

Оценочный лист уровня сформированности дисциплинарных частей компетенций на зачете

Итоговая оценка уровня сформированности дисциплинарных частей компетенций	Критерии оценивания
<i>Зачтено</i>	Аспирант получил по дисциплине оценку «зачтено»
<i>Не зачтено</i>	Аспирант получил по дисциплине оценку «не зачтено»

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 и формировать закрепление осваиваемых компетенций.

4. Типовые контрольные вопросы и задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы

4.1 Типовые вопросы для текущего контроля по дисциплине:

1. Перечислите дефекты кристаллической решетки.
2. Какой из дефектов: вакансия, дислокация или пора, является точечным?
3. Какой из дефектов: вакансия, дислокация или пора, является линейным?
4. Чем определяются механические свойства реальных кристаллических тел?
5. Назовите правильный тип дислокации (прямая, косая, краевая).
6. Как направлен вектор Бюргерса по отношению к краевой дислокации?
7. Как направлен вектор Бюргерса по отношению к винтовой дислокации?
8. Какая величина вносит основной вклад в изменение энтропии и свободной энергии?
9. Назовите связь равновесной концентрации вакансий с температурой.

10. Что такое ядро дислокации, дислокационная стенка и дислокационный диполь?
11. Дайте определение дислокационного барьера.
12. Что является геометрическим образом дислокации?
13. Чему равна теоретическая оценка сопротивления отрыву межатомных связей?
14. Как меняется энергия при возникновении и росте трещины согласно критерию Гриффитса?
15. Назовите зародыши нарушений сплошности, которые при необходимых условиях могут превратиться в растущие трещины.

4.2 Перечень тем творческих заданий:

1. 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.
2. Феноменологические теории прочности. Критерии разрушения: деформационный, энергетический, энтропийный. Критерии длительной и усталостной прочности. Расчет прочности по допускаемым напряжениям. Коэффициент запаса прочности.
3. 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.
4. 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.
5. J-интеграл Эшелби–Черепанова–Райса и его инвариантность. Вычисление потока энергии в вершину трещины. JR–кривая.
6. Динамическое распространение трещин. Динамический коэффициент интенсивности напряжений. Предельная скорость трещины хрупкого разрушения (теоретическая оценка и экспериментальные данные).
7. 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.
8. Кинетическая концепция прочности твердых тел. Формула Журкова. Кинетическая теория трещин. Рост трещин в условиях ползучести.
9. Понятие об усталостном разрушении. Малоцикловая и многоцикловая усталость. Основные законы роста усталостных трещин.
10. Понятие о поврежденности. Типы поврежденности. Математическое представление поврежденности. Параметр поврежденности Качанова–Работнова.
11. Кинетические уравнения накопления поврежденности. Принцип линейного суммирования повреждений. Накопление повреждений в условиях ползучести.

4.3 Типовые контрольные вопросы для оценивания знаний на зачете по дисциплине:

1. Современные представления о механизмах разрушения, роль дефектов, микро- и мезоскопическими механизмами развития поврежденности; с микро- и макроскопическими моделями накопления повреждений, зарождения и распространения трещин.
2. Дефекты в твердых телах (вакансии, поры, дислокации, микротрещины). Макроскопические трещины. Устойчивость и рост трещин (модели Гриффитса, Ирвина, Дагдейла).

3. Статистические подходы при описании закономерностей накопления повреждений, схемы усреднения, эффективные свойства материалов с дефектами; феноменологические модели накопления повреждений.

4. Особенности накопления повреждений в квази-хрупких, пластичных материалах. Приложения к стеклам, керамикам, металлам и сплавам, в том числе с субмикроструктурной структурой, композитам.

5. Особенности кинетики разрушения при квазистатическом, усталостном (малоцикловом, многоцикловом и гигацикловом), динамическом и ударно-волновом нагружении. Нелинейные континуальные модели разрушения. Модель Качанова-Работнова. Модель Джонсона-Кука. Модель Армстронга-Зерилини. Модель Пэриса многоциклового усталостного разрушения. Модель Мэнсона-Коффина малоциклового разрушения.

6. Закономерности разрушения композиционных материалов.

7. Стадийность динамического распространения трещин (устойчивое, динамика с ветвлением, множественное разрушение).

8. Статистические закономерности фрагментации. Теория Колмогорова. Теория Мотта. Теория Грэди.

9. Экспериментальные методы исследования кинетики поврежденности (микротрещин), стадийности разрушения.

10. Экспериментальные методы исследования разрушения при квазистатическом, усталостном (мало-, много-, гигацикловом), динамическом и ударно-волновом нагружениях).

11. Современные методы структурного анализа поврежденности (морфология и профилометрия поверхности разрушения, атомно-силовая микроскопия).

4.4 Типовые контрольные вопросы для оценивания умений и владений на зачете по дисциплине:

1. Бесконечно большой лист подвергнут воздействию растягивающего напряжения величиной 350 МПа. В листе обнаружена центральная трещина длиной 17 мм. Предел текучести материала составляет 500 МПа. Рассчитать величину КИН и размер зоны пластической деформации у вершины трещины.

2. В металлической панели шириной $W = 250$ мм обнаружена сквозная поперечная трещина длиной $2a = 22$ мм. Панель нагружена растягивающей силой $P = 18$ кН. Вязкость разрушения материала равна $K_{IC} = 60$ МПа \cdot м^{0.5}, а КИН определяется формулой

$$K = \frac{P}{Wt} \sqrt{a} \cdot Y$$

$$Y = 1,77 + 0,227 \left(\frac{2a}{W} \right)$$

Определить для какой ширины панели обнаруженная трещина является безопасной.

3. Консольный образец длиной 120 мм и диаметром 5,0 мм испытывается на усталостную прочность по схеме вращения с изгибом. Частота вращения образца $n = 750$ об/мин, изгибающее усилие 350 Н. Определить длительность испытания до разрушения,

если известно уравнение циклической долговечности $N = \left(\frac{1250}{\sigma} \right)^{6.5}$, где: σ - амплитудное

значение циклического напряжения в МПа.

4. Широкая пластина подвергается циклическому растяжению, не выходящих за рамки упругих деформаций. Амплитудное значение абсолютной деформации составляет $\Delta L = 0,35$ мм. В центральной части пластины обнаружена сквозная трещина длиной $2a = 12$ мм. Модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, а уравнение роста усталостной трещины имеет вид

$$\frac{da}{dN} = 4,2 \cdot 10^{-39} (\Delta K)^4$$

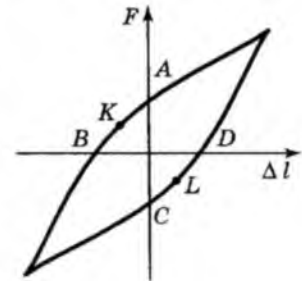
Образец разрушился после $N = 10^6$ циклов нагружения. Определить вязкость разрушения материала. Формулу для расчета КИН принять как для бесконечной пластины $K = \sigma\sqrt{\pi a}$.

5. Подшипник скольжения диаметром 50 мм и длиной 40 мм воспринимает радиальную нагрузку 10 кН. Интенсивность изнашивания вала и втулки описывается единым уравнением вида $I = Kq^m$. Построить кривую вероятности безотказной работы для вала, вкладыша и подшипника в целом.

6. Горизонтальный железный стержень длиной $l = 150$ см вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через его середину. При какой частоте вращения он может разорваться?

7. Длинная железная труба внутренним диаметром $d = 30$ см, длиной 200 м и толщиной стенок $b = 0,5$ см расположена горизонтально. Концы трубы перекрыты. Труба заполнена водой, причем разность давлений воды и наружного воздуха равна $4,9 \cdot 10^6$ Па. Какой объем воды вытечет из трубы, если по верхней линии ее стенки образуется трещина?

8. На рисунке показана зависимость упругой силы F от деформации Δl при циклическом деформировании тела в случае наличия гистерезиса. Потенциальная энергия деформированного тела в состояниях, соответствующих точкам А, В, С и D, равна нулю, а в состояниях, соответствующих точкам К и L, является отрицательной. Объясните эти результаты.



9. Горизонтальный железный стержень длиной $l = 150$ см вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через его середину. При какой частоте вращения он может разорваться?

10. К двум противоположным граням однородного кубика приложены две равные противоположно направленные растягивающие силы. Если эти грани удаляются друг от друга на расстояние Δl , то четыре другие грани сближаются на расстояние $\mu\Delta l$. Предположим, что силы, действующие на две первые грани, исчезли, а на четыре остальные грани действуют попарно равные сжимающие силы, такие, что эти грани остаются на прежнем расстоянии (т. е. сближены на $\mu\Delta l$). Останется ли форма кубика такой, какой она была при наличии двух растягивающих сил?

11. Определите энергию упругой деформации растяжения стальной проволоки длиной $l = 4$ м и диаметром $d = 2$ мм, при действии силы 294 Н.



Институт механики сплошных сред Уральского
отделения Российской академии наук" - филиал
ФГБУН Пермский федеральный
исследовательский центр УрО РАН

Направление подготовки
01.06.01 «Математика и механика»
Профили аспирантуры
«Механика деформируемого твердого тела»

Дисциплина
«Нелинейные аспекты разрушения»

БИЛЕТ №1

1. Современные представления о механизмах разрушения, роль дефектов, микро- и мезоскопическими механизмами развития поврежденности; с микро- и макроскопическими моделями накопления повреждений, зарождения и распространения трещин. (*контроль знаний*).
2. Бесконечно большой лист подвергнут воздействию растягивающего напряжения величиной 350 МПа. В листе обнаружена центральная трещина длиной 17 мм. Предел текучести материала составляет 500 МПа. Рассчитать величину КИН и размер зоны пластической деформации у вершины трещины. (*контроль умений и навыков*).

Преподаватель

_____ (подпись)

_____ О. Б. Наймарк

« _____ » _____ 20__ г.