

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
**«Пермский федеральный исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук»  
(ПФИЦ УрО РАН)**

Принято на заседании  
Объединенного ученого совета  
ПФИЦ УрО РАН  
Протокол № 6  
«11» сентября 2024 г.



**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ПФИЦ УрО РАН  
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.

О.А. Плехов

«11» сентября 2024 г.

**ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ПРОГРАММА  
ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ**

**«Современные модели деформирования и разрушения  
структурно-неоднородных сред»**

ПЕРМЬ, 2024

# 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОГРАММЫ

## 1.1. Цель реализации программы.

Программа разработана в рамках реализации программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук». Целью программы является приобретение слушателями знаний об основных закономерностях и особенностях развития поврежденности конструкционных материалов, методах математического моделирования процессов накопления повреждений и развития дефектов в процессе неупругого деформирования и разрушения конструкционных материалов и конструкций из них, умений и навыков математического моделирования процессов накопления повреждений, их анализа и диагностики, необходимых при проектировании и создании современных материалов, а также эксплуатации изделий из них.

В рамках курса изучаются основные методы и подходы к изучению поведения современных материалов с учетом процессов накопления повреждений; формируются навыки исследования качественных и количественных характеристик процессов накопления повреждений современных материалов, навыки практической реализации решений задач деформирования и разрушения с учетом поврежденности материалов, навыки анализа результатов решений задач деформирования и разрушения с учетом поврежденности материалов; формируются умения постановки и решения задач деформирования и разрушения материалов с учетом их повреждаемости с целью прогнозирования поведения и безопасности эксплуатации ответственных элементов конструкций, умения планирования эксперимента для изучения процессов накопления повреждений современных структурно-неоднородных материалов.

## 1.2. Планируемые результаты обучения

В результате освоения программы обучающиеся качественно изменяют следующие компетенции:

**Трудовая функция.** Самостоятельное решение исследовательских задач в рамках реализации научного (научно-технического, инновационного) проекта, описания процессов неупругого деформирования и разрушения структурно-неоднородных материалов в элементах конструкций.

**Трудовое действие.** Проведение исследований, направленных на решение отдельных исследовательских задач, в том числе:

- формализация, постановка и поиск пути решения исследовательских задач.
- определение информационных ресурсов, научной, опытно-экспериментальной и приборной базы, необходимых для решения исследовательских задач.
- интерпретация научных (научно-технических) результатов, полученных в ходе решения исследовательских задач.

В результате освоения программы слушатель должен:

### **Знать:**

- особенности проведения расчётов конструкций и расчетно-экспериментального изучения закономерностей накопления повреждений современных материалов;

- физико-механические характеристики современных композиционных материалов основные теории прочности, закономерности процессов разрушения материалов, причины и условия разрушения материала, основные подходы к описанию процессов накопления повреждений современных материалов;

- навыки экспериментального исследования процессов разрушения структурно-неоднородных материалов;

- основные подходы к описанию процессов накопления повреждений современных материалов.

#### **Уметь:**

- проводить расчёты элементов конструкций с учетом накопления повреждений материалов вычислительными методами прикладной механики, а также с помощью программных систем компьютерного инжиниринга;

- осуществлять теоретическое обобщение научных данных, результатов экспериментов и наблюдений, выбирать методы и средства проведения исследований и разработок, осуществлять планирование эксперимента оценивать и интерпретировать полученные знания, расширять их и приобретать новые знания путем проведения физико-химических процессов и материалов

- проводить анализ и прогнозировать протекание процессов накопления повреждений в современных конструкционных материалов в конструкциях.

#### **Владеть:**

- навыками экспериментального изучения деформационных свойств материалов и закономерностей накопления повреждений;

- навыками анализа научных данных, результатов экспериментов и наблюдений, методами анализа напряженно-деформированных состояний, техникой контроля основных свойств материалов и определения параметров дефектов;

- навыками расчётов численными методами механики материалов и элементов конструкций с учетом повреждаемости.

### **1.3. Категория слушателей**

К освоению дополнительной профессиональной программы повышения квалификации допускаются лица, имеющие высшее образование – специалитет, магистратура, а также высшее образование – подготовка кадров высшей квалификации (аспирантура и докторантура). Приоритет при реализации программы отдаётся специалистам, участвующим в создании и развитии научного центра мирового уровня «Сверхзвук».

### **1.4. Трудоемкость обучения**

Срок освоения программы повышения квалификации составляет 36 ч.

### **1.5. Форма обучения**

Форма обучения – очная и дистанционная (онлайн).

## 2. СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ

### 2.1. Учебный план

№	Наименование разделов, дисциплин	Общая трудоемкость, час	Всего ауд., час	Аудиторные занятия, час		Итоговая аттестация	СР, в т.ч. КСР, час	Форма контроля
				Лекции	Практические занятия			
	Введение	1	1	1	—	—	—	—
1.	Теоретические представления о поврежденности сплошных сред	15	7	7	—	—	8	текущий контроль
2.	Численное и экспериментальное изучение процессов накопления повреждений	16	8	8	—	—	8	текущий контроль
	Итоговая аттестация	4	—	—	—	4	—	зачет
	<b>Итого:</b>	<b>36</b>	<b>20</b>	<b>16</b>	<b>—</b>	<b>4</b>	<b>16</b>	

## Учебно-тематический план

№	Наименование разделов, дисциплин, тем	Общая трудоемкость, час	Всего ауд., ч	Аудиторные занятия, час		Итоговая аттестация	СР, ч, в т.ч. КСР, час	Форма контроля
				Лекции	Практические занятия			
	<b>Введение</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	—	—	—	—
	Основы поврежденности сплошных сред. Разрушение и поврежденность. Дефекты в структурно-неоднородных средах. Стадии процессов накопления повреждений. Многоуровневый характер накопления повреждений. Экспериментальные данные о механизмах и закономерностях накопления повреждений композиционных материалов. Классификация видов разрушения	1	1	1	—	—	—	—
<b>1.</b>	<b>Теоретические представления о поврежденности сплошных сред</b>	<b>15</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	—	—	<b>8</b>	текущий контроль
1.1	Теоретическое описание процессов накопления повреждений. Структурный и феноменологический подходы, различные концепции построения моделей накопления повреждений. Правила суммирования повреждений. Автомодельность процесса накопления повреждений. Схемы расчета конструкций из композиционных материалов с оценкой поврежденности в	3	1	1	—	—	2	текущий контроль

	рамках структурно-феноменологического подхода							
1.2	Введение параметров поврежденности. Параметр поврежденности Качанова-Работнова. Определяющие соотношения и материальные функции деформационной теории поврежденных сред. Континуальные модели накопления повреждений. Скалярная функция поврежденности. Тензор поврежденности второго ранга. Тензор поврежденности четвертого ранга. Определяющие соотношения для повреждаемых сред. Определяющие соотношения для изотропных, трансверсально-изотропных и ортотропных повреждаемых сред. Экспериментальное построение и теоретическое прогнозирование материальных функций поврежденности	8	4	4	—	—	4	текущий контроль
1.3	Критериальная оценка прочности при сложном напряженном состоянии. Модели многостадийных процессов структурного разрушения. Оценка разрушения по совокупности критериев изотропных, трансверсально-изотропных и ортотропных материалов	4	2	2	—	—	2	текущий контроль
2.	<b>Численное и экспериментальное изучение процессов накопления повреждений</b>	<b>16</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	—	—	<b>8</b>	текущий контроль

2.1	<p>Стохастические модели разрушения. Представление о статистическом характере прочностных характеристик материалов.</p> <p>Стохастические модели разрушения и масштабный эффект прочности.</p> <p>Стохастические модели разрушения однонаправленных волокнистых композитов</p>	3	1	1	—	—	2	текущий контроль
2.2	<p>Прогнозирование эффективных деформационных и прочностных свойств. Приближенная оценка констант материала с повреждениями. Анализ механизмов разрушения, прогнозирование эффективных деформационных и прочностных свойств структурно-неоднородных материалов. Расчеты на прочность с учетом микроструктуры. Особенности процессов разрушения неоднородных материалов. Структурные модели накопления повреждений. Распределение напряжений около краев разорванного волокна. Неэффективная длина волокна</p>	5	3	3	—	—	2	текущий контроль
2.3	<p>Деформационное разупрочнение материалов. Деформационное разупрочнение материалов. Элементы теории устойчивой закритической деформации. Разрушение как потеря</p>	8	4	4	—	—	4	текущий контроль

устойчивости процесса накопления повреждений. Учет свойств нагружающей системы. Модели механического поведения и устойчивость деформационного разупрочнения элементов структуры композитов								
Итоговая аттестация	4	—	—	—	4	—	зачет	
<b>Итого:</b>	<b>36</b>	<b>20</b>	<b>16</b>	—	<b>4</b>	<b>16</b>		

## 2.2. Календарный учебный график

№ п/п	День проведения занятия	Форма занятия	Кол-во часов	Тема занятия	Форма контроля
1.	1	Очно и дистанционно (онлайн)	2	Введение, Тема 1	Текущий контроль
2.	2	Очно и дистанционно (онлайн)	4	Тема 2	Текущий контроль
3.	3	Очно и дистанционно (онлайн)	3	Тема 3 и 4	Текущий контроль
4.	4	Очно и дистанционно (онлайн)	3	Тема 5	Текущий контроль
5.	5	Очно и дистанционно (онлайн)	4	Тема 6	Текущий контроль

## 2.3. Рабочая учебная программа дисциплины «Современные модели деформирования и разрушения структурно-неоднородных сред»

**Введение.** Л – 1 ч.

Основы поврежденности сплошных сред. Разрушение и поврежденность. Дефекты в структурно-неоднородных средах. Стадии процессов накопления повреждений. Многоуровневый характер накопления повреждений. Экспериментальные данные о

механизмах и закономерностях накопления повреждений композиционных материалов. Классификация видов разрушения

**Раздел 1.** Л – 7 час., СР – 8 час.

**Тема 1.** Теоретическое описание процессов накопления повреждений. Структурный и феноменологический подходы, различные концепции построения моделей накопления повреждений. Автомодельность процесса накопления повреждений. Схемы расчета конструкций из композиционных материалов с оценкой поврежденности в рамках структурно-феноменологического подхода.

**Тема 2.** Введение параметров поврежденности. Параметр поврежденности Качанова-Работнова. Определяющие соотношения и материальные функции деформационной теории поврежденных сред. Континуальные модели накопления повреждений. Скалярная функция поврежденности. Тензор поврежденности второго ранга. Тензор поврежденности четвертого ранга. Определяющие соотношения для повреждаемых сред. Определяющие соотношения для изотропных, трансверсально-изотропных и ортотропных повреждаемых сред. Экспериментальное построение и теоретическое прогнозирование материальных функций поврежденности.

**Тема 3.** Критериальная оценка прочности при сложном напряженном состоянии. Модели многостадийных процессов структурного разрушения. Оценка разрушения по совокупности критериев изотропных, трансверсально-изотропных и ортотропных материалов.

**Раздел 2.** Л – 8 час., СР – 8 час.

**Тема 4.** Стохастические модели разрушения. Представление о статистическом характере прочностных характеристик материалов. Стохастические модели разрушения и масштабный эффект прочности. Стохастические модели разрушения однонаправленных волокнистых композитов.

**Тема 5.** Прогнозирование эффективных деформационных и прочностных свойств. Приближенная оценка констант материала с повреждениями. Анализ механизмов разрушения, прогнозирование эффективных деформационных и прочностных свойств структурно-неоднородных материалов. Расчеты на прочность с учетом микроструктуры. Особенности процессов разрушения неоднородных материалов. Структурные модели накопления повреждений. Распределение напряжений около краев разорванного волокна. Неэффективная длина волокна.

**Тема 6.** Деформационное разупрочнение материалов. Деформационное разупрочнение материалов. Элементы теории устойчивой закритической деформации. Разрушение как потеря устойчивости процесса накопления повреждений. Учет свойств нагружающей системы. Модели механического поведения и устойчивость деформационного разупрочнения элементов структуры композитов.

### **Перечень лабораторных работ и практических (семинарских) занятий**

Не предусмотрено.

## **3. ОРГАНИЗАЦИОННО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММЫ**

**3.1. Образовательные технологии, используемые для формирования компетенций по образовательной программе**

В процессе изучения тем по данной образовательной программе используются современные образовательные технологии (критическое мышление, проблемное обучение и др.) и информационно-коммуникационные технологии как в проведении лекционных занятий, так и в самостоятельной работе слушателей. Применение технологий и их сочетание определяется преподавателями, ведущими обучение по темам программы, самостоятельно.

### 3.1. Учебно-методическое обеспечение программы

В учебном процессе используются

- **электронные ресурсы:**

- каталог ГОСТ <http://www.internet-law.ru/gosts/>

- электронная библиотека диссертаций РГБ <http://diss.rsl.ru>

- научная электронная библиотека РИНЦ (Elibrary) <http://elibrary.ru>

- научная электронная библиотека ScienceDirect <https://www.sciencedirect.com/>

- научная электронная библиотека Elsevier <https://www.elsevier.com>

- университетская информационная система Россия <https://uisrussia.msu.ru/>

- университетские библиотеки г. Перми:

- <http://biblioclub.ru/>

- <http://pspu.ru/university/biblioteka/jelektronnye-resursy-biblioteki>

- <https://perm.hse.ru/library/>

- <http://biblioteki.perm.ru/main/index.html?id=34>

- наукометрическая и реферативная база данных Scopus <https://www.scopus.com>

- национальная электронная библиотека <https://нэб.рф>

- **учебные издания:**

- Механика материалов. Методы и средства экспериментальных исследований / В. Э. Вильдеман [и др.]. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2011.

- Развитие дефектов при конечных деформациях. Компьютерное и физическое моделирование / В. А. Левин [и др.]. – М.: Физматлит, 2007.

- Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях : коллективная монография / В. Э. Вильдеман [и др.]. – М.: Физматлит, 2012.

- Вильдеман В. Э. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / В. Э. Вильдеман, Ю. В. Соколкин, А. А. Ташкинов. – М.: Наука, Физматлит, 1997.

- Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций / В. В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1990.

– Гучкин И. С. Диагностика повреждений и восстановление эксплуатационных качеств конструкций : учебное пособие для вузов / И. С. Гучкин. – Москва: АСВ, 2000.

– Гучкин И. С. Диагностика повреждений и восстановление эксплуатационных качеств конструкций : учебное пособие для вузов / И. С. Гучкин. – Москва: Изд-во АСВ, 2001.

– Коллинз Дж. А. Повреждение материалов в конструкциях: анализ , предсказание, предотвращение / Дж. А. Коллинз. – М.: Мир, 1984.

- **периодические издания**

– журнал «Вычислительная механика сплошных сред»

<http://www2.icmm.ru/journal/cont.htm>

– журнал «Известия РАН. Механика твердого тела», <http://mtt.ipmnet.ru/ru>

– журнал «Вестник ПНИПУ. Механика» <http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>

### 3.2. Материально-технические условия

Наименование специализированных аудиторий, кабинетов, лабораторий	Вид занятий	Наименование оборудования, программного обеспечения
Лекционная мультимедийная аудитория	лекция	компьютер, мультимедийный проектор, экран, меловая (или маркерная) доска, набор маркеров

### 3.3. Кадровое обеспечение

Кадровое обеспечение ДПП повышения квалификации реализуется сотрудниками НЦМУ «Сверхзвук» ПФИЦ УрО РАН.

Состав итоговой аттестационной комиссии (ИАК) по программе формируется из числа педагогических и научных работников Центра, ведущих специалистов и практиков предприятия, а также лиц, приглашаемых из сторонних организаций: специалистов предприятий, учреждений и организаций по профилю осваиваемой слушателями программы.

## 4. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ОСВОЕНИЯ ПРОГРАММЫ

### 4.1. Формы аттестации

Контроль успеваемости обучающихся включает в себя целенаправленный систематический мониторинг освоения слушателями программы повышения квалификации в целях:

– получения необходимой информации о выполнении слушателями дополнительной профессиональной программы повышения квалификации,

– оценки уровня знаний, умений и приобретенных (усовершенствованных) слушателями компетенций;

– стимулирования самостоятельной работы слушателей.

**Текущий контроль** – устный опрос и защита отчета по творческому заданию. Примерные вопросы **итоговой аттестации** приводятся в разделе «Оценочные материалы».

Итоговая аттестация для слушателей проводится итоговой аттестационной комиссией (ИАК) в соответствии с «Порядком проведения текущей, промежуточной и итоговой аттестации при освоении ДПП».

Освоение дополнительной профессиональной программы повышения квалификации завершается итоговым зачетом в форме собеседования и устных ответов на вопросы, согласно перечню контрольных вопросов по программе «Современные модели деформирования и разрушения структурно-неоднородных сред». Оценка качества освоения программы осуществляется ИАК на основе двухбалльной системы оценок (зачтено/незачтено) по основным темам программы.

Лицам, успешно освоившим программу профессиональной переподготовки, получившим на итоговой аттестации оценку «зачтено», выдается документ о повышении квалификации – удостоверение о повышении квалификации. Лицам, не прошедшим итоговую аттестацию или получившим на итоговой аттестации оценку «незачтено», а также лицам, освоившим часть программы профессиональной переподготовки и (или) отчисленным в ходе освоения дополнительной профессиональной программы, выдается справка об обучении.

## 4.2. Оценочные материалы

**Типовые контрольные вопросы для оценивания знаний на итоговом зачете по программе:**

1. Структурный и феноменологический подходы, концепции построения моделей накопления повреждений.
2. Схемы расчета конструкций из композиционных материалов с оценкой поврежденности в рамках структурно-феноменологического подхода.

**Типовой контрольный вопрос для оценивания умений и владений на итоговом зачете по программе:**

1. Покажите, что величины  $\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}$ ,  $\varepsilon_{33}$ ,  $\sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + 4\varepsilon_{12}^2}$  и  $\varepsilon_{13}^2 + \varepsilon_{23}^2$  инвариантны относительно ортогональных преобразований, допустимых для трансверсально-изотропного тела с плоскостью изотропии  $x_1x_2$ .

2. На основе аналитического решения задачи для пучка волокон с равномерным законом распределения прочностных свойств построить диаграмму деформирования.

3. Провести оценку усталостной долговечности элементов конструкций с использованием гипотез нелинейного накопления повреждений.

4. Записать определяющие соотношения для ортотропной среды с повреждениями (тензор поврежденности — ортотропный тензор 4 ранга)

Методические материалы и фонды оценочных средств представлены в приложении к дополнительной профессиональной программе повышения квалификации «Современные модели деформирования и разрушения структурно-неоднородных сред».

## 5. СОСТАВИТЕЛИ ПРОГРАММЫ

Составитель программы:

к. ф.-м. н.

А. В. Зайцев

Руководитель лаборатории «Прочность и интеллектуальные конструкции» НЦМУ «Сверхзвук» академик РАН, д.т.н.

В. П. Матвеевко

Руководитель структурного подразделения:  
Директор «ИМСС УрО РАН»  
д.ф.-м.н.

А.И. Мизёв

