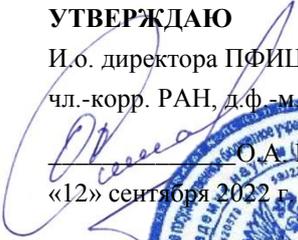


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
**Пермский федеральный исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук  
(ПФИЦ УрО РАН)**

Принято на заседании  
Объединенного ученого совета  
ПФИЦ УрО РАН  
Протокол № 6  
«2» сентября 2022 г.

**УТВЕРЖДАЮ**

И.о. директора ПФИЦ УрО РАН  
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.

  
О.А. Плехов

«12» сентября 2022 г.



ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ПРОГРАММА  
ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ

**«Избранные главы механики разрушения. Технологии поверхностного  
упрочнения»**

ПЕРМЬ, 2022

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОГРАММЫ

### 1.1. Цель реализации программы.

Курс разработан в рамках реализации программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук». Его целью является ознакомление слушателей с современными достижениями механики разрушения и технологий поверхностного упрочнения материалов, в частности, технологии лазерного ударного упрочнения.

Курс затрагивает ряд разделов механики разрушения, посвященных физическим механизмам развития разрушения в твердых телах с учетом многомасштабных закономерностей развития дефектов, континуальным моделям поведения твердых тел, особенностям кинетики усталостного разрушения в результате воздействия полей остаточных напряжений. Курс формирует представление о современных технологиях поверхностного упрочнения материалов с углубленным изучением технологии лазерного ударного упрочнения как наиболее востребованной методики улучшения прочностных характеристик деталей машин и механизмов, их защиты от повреждений, растрескивания, усталости и отказа в авиационно-космической, автомобильной, машиностроительной, энергетической, медицинской и др. отраслей промышленности.

### 1.2. Планируемые результаты обучения.

В результате освоения программы обучающийся качественно изменяет следующие компетенции:

**Трудовая функция.** Самостоятельное решение исследовательских задач в рамках реализации научного (научно-технического, инновационного) проекта, связанного с улучшением прочностных характеристик деталей машин и механизмов.

#### **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:**

- основные современные теории процессов деформирования и разрушения, взаимодействия структуры материала и полей остаточных напряжений, методы описания процессов деформирования;
- методологию, конкретные методы и приемы анализа связи между структурой материалов, характером внешних воздействий и процессами деформирования и разрушения;
- современные методы, приемы планирования эксперимента, обработки и интерпретации экспериментальных данных по изучению деформирования, повреждения и разрушения материалов;
- основные физические процессы лазерных технологий; основные виды лазерных технологий; основные типы лазерного оборудования.

#### **Уметь:**

- применять полученные знания при выполнении практических заданий, расчетов, осваивать вопросы, выносимые на самостоятельное изучение;
- анализировать альтернативные варианты решения исследовательских и практических задач, генерировать новые идеи и оценивать потенциальные риски, связанные с их реализацией;

– подбирать режимы лазерного ударного упрочнения для решения конкретных задач по упрочнению деталей различной геометрии.

### **Владеть:**

- методами формализации задач и анализа имеющейся информации (результатов механических и физических экспериментов);
- практическими навыками и знаниями использования результатов современных исследований в данной области;
- способностью приобретать новые знания, используя современные образовательные и информационные технологии, излагать материал в ясной и доступной форме;
- навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов и формулировки выводов;
- навыками критической оценки эффективности различных методов и технологий научной коммуникации на государственном и иностранном языках;
- навыками оценки результативности процесса лазерной ударной обработки (оценки улучшения прочностных и усталостных свойств материалов).

### **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.

## **2. СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ**

### **2.1. Учебный план.**

**Таблица 2.1. – Учебный план учебной дисциплины.**

№	Наименование разделов	Общая трудоемкость, ч	Всего ауд., ч	Аудиторные занятия, ч		Итоговая аттестация	СР, в т.ч. КСР, ч	Форма контроля
				Лекции	Практические занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Введение.	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	-	-	-	-
1.	Знакомство с современными представлениями о механизмах разрушения.	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	-	-	<b>1</b>	<i>текущий контроль</i>
2.	Дефекты в твердых телах.	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	-	-	<b>2</b>	<i>текущий контроль</i>
3.	Особенности кинетики	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	-	-	<b>2</b>	<i>текущий контроль</i>

	разрушения. Модели разрушения.							
4.	Остаточные напряжения. Их влияние на усталостные свойства металлов и сплавов. Экспериментальные методы измерения.	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
5.	Виды упрочнения материалов.	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
6.	Физический принцип технологии лазерного ударного упрочнения.	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
7.	Общая схема установки для лазерного ударного упрочнения на базе ИМСС УрО РАН. Техника безопасности при работе на установке по лазерному ударному упрочнению.	4	2	2	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
8.	Структурные изменения металлов после лазерного ударного упрочнения.	4	2	2	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
9.	Усталостные свойства металлов после лазерного ударного упрочнения.	4	2	2	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
10.	Особенности исследования ударных волн с помощью лазерного ударного воздействия.	2	1	1	-	-	1	<i>текущий контроль</i>
	Итоговая аттестация	4	-	-	-	4	-	<i>зачет</i>
	<b>Итого:</b>	<b>36</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>-</b>	<b>4</b>	<b>18</b>	

## Учебно-тематический план.

Таблица 2.2. – Учебно-тематический план учебной дисциплины.

Номер раздела	Наименование разделов	Общая трудоемкость, ч	Всего ауд., ч	Аудиторные занятия, ч		Итоговая аттестация	СР, ч, в т.ч. КСР, ч	Форма контроля
				Лекции	Практические занятия			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	<b>Введение.</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	-		-	-
<b>1.</b>	<b>Знакомство с современными представлениями о механизмах разрушения.</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	-		<b>1</b>	<i>текущий контроль</i>
1.1	Знакомство с современными представлениями о механизмах разрушения, микро- и мезоскопическими механизмах развития поврежденности.	1	0,5	0,5	-	-	0,5	<i>текущий контроль</i>
1.2	Роль дефектов с микро- и мезоскопическими механизмами развития поврежденности.	1	0,5	0,5	-	-	0,5	<i>текущий контроль</i>
<b>2.</b>	<b>Дефекты в твердых телах.</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	-	-	<b>2</b>	<i>текущий контроль</i>
2.1	Дефекты в твердых телах (вакансии, поры, дислокации, микротрещины).	1,5	0,5	0,5	-	-	1	<i>текущий контроль</i>
2.2	Макроскопические трещины. Устойчивость и рост трещин (модели Гриффитса, Ирвина, Дагдейла).	1,5	0,5	0,5	-	-	1	<i>текущий контроль</i>
<b>3.</b>	<b>Особенности кинетики разрушения. Модели разрушения.</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	-	-	<b>2</b>	<i>текущий контроль</i>
3.1	Особенности кинетики разрушения при усталостном (малоцикловом, многоцикловом и гигацкловом) и ударно-волновом нагружении.	1,5	0,5	0,5	-	-	1	<i>текущий контроль</i>

3.2	Нелинейные континуальные модели разрушения. Модель Джонсона-Кука. Модель Пэриса многоциклового усталостного разрушения.	1,5	0,5	0,5	-	-	1	<i>текущий контроль</i>
4.	<b>Остаточные напряжения. Их влияние на усталостные свойства металлов и сплавов. Экспериментальные методы измерения.</b>	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
4.1	Влияние остаточных напряжений на усталостные свойства металлов и сплавов. Экспериментальные методы измерения остаточных напряжений.	1,5	0,5	0,5	-	-	1	<i>текущий контроль</i>
4.2	Экспериментальные методы измерения остаточных напряжений.	1,5	0,5	0,5	-	-	1	<i>текущий контроль</i>
5.	<b>Виды упрочнения материалов.</b>	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
5.1	Виды упрочнения материалов (прокатка, дробеструйная обработка, пластическое выглаживание, ультразвуковое упрочнение, лазерное ударное упрочнение).	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
6.	<b>Физический принцип технологии лазерного ударного упрочнения.</b>	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
6.1	Обзор и классификация установок для лазерного ударного упрочнения. Основные составляющие различных модификаций установок по лазерному ударному упрочнению. Сферы применения	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>

	технологии лазерного ударного упрочнения.							
7.	<b>Общая схема установки для лазерного ударного упрочнения на базе ИМСС УрО РАН. Техника безопасности при работе на установке по лазерному ударному упрочнению.</b>	6	4	4	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
7.1	Общая схема установки для лазерного ударного упрочнения на базе ИМСС УрО РАН (лазер, объективы, шестиосевой робот, программно-аппаратный комплекс, установка по измерению остаточных напряжений). Особенности оптики, используемой в установке для лазерного ударного упрочнения.	3	2	2	-	-	1	<i>текущий контроль</i>
7.2	Техника безопасности при работе на установке по лазерному ударному упрочнению.	3	2	2	-	-	1	
8.	<b>Структурные изменения металлов после лазерного ударного упрочнения.</b>	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
8.1	Современные экспериментальные методы исследования структуры металлов после лазерного ударного упрочнения (EBSD анализ).	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
9.	<b>Усталостные свойства металлов после лазерного ударного упрочнения.</b>	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
9.1	Исследование усталостных свойств металлов после	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>

	лазерного ударного упрочнения.							
<b>10.</b>	<b>Особенности исследования ударных волн с помощью лазерного ударного воздействия.</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>			<b>1</b>	<i>текущий контроль</i>
10.1	Особенности исследования ударных волн с помощью лазерного ударного воздействия.	2	1	1			1	<i>текущий контроль</i>
	Итоговая аттестация	<b>4</b>				4		<i>зачет</i>
	<b>Итого:</b>	<b>36</b>	<b>14</b>	<b>14</b>		<b>4</b>	<b>18</b>	

## 2.2. Календарный учебный график.

Таблица 2.3. – Календарный учебный график.

№ п/п	День проведения занятия	Форма занятия	Кол-во часов	Тема занятия	Форма контроля
1.	1	очно	3	Введение. Тема 1,2	Текущий контроль
2.	2	очно	3	Тема 3,4,5	Текущий контроль
3.	3	очно	3	Тема 6,7	Текущий контроль
4.	4	очно	3	Тема 7,8	Текущий контроль
5.	5	очно	2	Тема 9,10	Текущий контроль
6.	6	очно	4	итоговая аттестация	Зачет

## 2.3. Рабочая учебная программа дисциплины «Избранные главы механики разрушения. Технологии поверхностного упрочнения».

### Введение.

Л – 1 ч.

Организация учебного процесса. Основные понятия, термины и определения. Предмет и задачи дисциплины. Основные этапы становления механики разрушения. История развитие способов упрочнения материалов. Первые лазерные системы.

### Раздел 1.

Л – 13 ч., СР – 22 ч.

**Тема 1.** Знакомство с современными представлениями о механизмах разрушения, роли дефектов, микро- и мезоскопическими механизмами развития поврежденности.

**Тема 2.** Дефекты в твердых телах (вакансии, поры, дислокации, микротрещины). Макроскопические трещины. Устойчивость и рост трещин (модели Гриффитса, Ирвина, Дагдейла).

**Тема 3.** Особенности кинетики разрушения при усталостном (малоцикловом, многоцикловом и гигаацикловом) и ударно-волновом нагружении. Нелинейные континуальные модели разрушения. Модель Джонсона-Кука. Модель Пэриса многоциклового усталостного разрушения.

**Тема 4.** Влияние остаточных напряжений на усталостные свойства металлов и сплавов. Экспериментальные методы измерения остаточных напряжений.

**Тема 5.** Виды упрочнения материалов (прокатка, дробеструйная обработка, пластическое выглаживание, ультразвуковое упрочнение, лазерное ударное упрочнение).

**Тема 6.** Физический принцип технологии лазерного ударного упрочнения. Обзор и классификация установок для лазерного ударного упрочнения. Основные составляющие различных модификаций установок по лазерному ударному упрочнению. Сферы применения технологии лазерного ударного упрочнения.

**Тема 7.** Общая схема установки для лазерного ударного упрочнения на базе ИМСС УрО РАН (лазер, объективы, шестиосевой робот, программно-аппаратный комплекс, установка по измерению остаточных напряжений). Особенности оптики, используемой в установке для лазерного ударного упрочнения. Техника безопасности при работе на установке по лазерному ударному упрочнению.

**Тема 8.** Структурные изменения металлов после лазерного ударного упрочнения. Исследование структуры современными экспериментальными методами (EBSD анализ).

**Тема 9.** Усталостные свойства металлов после лазерного ударного упрочнения.

**Тема 10.** Особенности исследования ударных волн с помощью лазерного ударного воздействия.

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

Не предусмотрено.

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

**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:
  - 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:

- Орлов А.Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах. М. Высшая школа, 1983 с. 144

- Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия, 1984, 280 с.  
[http://stanok-online.ru/uploads/files/1348459818\\_physprirrazrush.zip](http://stanok-online.ru/uploads/files/1348459818_physprirrazrush.zip)

- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учеб.пособ.: Для вузов. В 10 т. Т VII. Теория упругости. – 5-е изд., стереот. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2001, 264 с.

- Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения твердых тел: курс лекций. СПб.: Профессия, 2002, 320 с.

- Харанжевский Е.В., Кривилёв М.Д. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество. Учебное пособие. Под общей редакцией П.К. Галенко. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2011. 187 с.  
<https://core.ac.uk/download/pdf/235140077.pdf>

- Г.И. Канель, С.В. Разоренов, А.В. Уткин, В.Е. Фортов. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. Москва, изд-во «Янус-К», 1996, 407 с.

- Косевич А.М. Основы механики кристаллической решетки. Изд-во «Наука», М., 1972. 280с.

- Либенсон М.Н. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Часть I. Поглощение лазерного излучения в твердых телах [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. — Электрон. текстовые данные. — СПб.: Университет ИТМО, 2015.— 130 с. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/65819.html>. — ЭБС «IPRbooks».

- Гостев, В. А. Лазерные технологии : учебное пособие / В. А. Гостев, А. А. Тихомиров ; Федер. агентство по образованию, Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования Петрозав. гос. ун-т. - Петрозаводск : Издательство ПетрГУ, 2010. - 100 с.

- 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 «Известия РАН. Механика жидкости и газа», <http://mzg.ipmnet.ru/ru>

- вестник ПНИПУ. «Механика» журнал / Пермский национальный исследовательский политехнический университет; Под ред. А. А. Ташкинова. - Пермь: Изд-во ПНИПУ, с 2012 г., <http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>

- вестник ПГНИУ. «Физика» журнал / Пермский государственный национальный исследовательский университет; Под ред. В. А. Дёмина. - Пермь: Изд-во ПГНИУ, с 2016 г., <http://press.psu.ru/index.php/phys/index>

### 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 фломастеров-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 «Избранные главы механики разрушения. Технологии поверхностного упрочнения». 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. Современные представления о механизмах разрушения, роли дефектов, микро- и мезоскопическими механизмами развития поврежденности.
2. Дефекты в твердых телах (вакансии, поры, дислокации, микротрещины). Макроскопические трещины. Устойчивость и рост трещин (модели Гриффитса, Ирвина, Дагдейла).
3. Особенности кинетики разрушения при усталостном (малоцикловом, многоцикловом и гигаацикловом) и ударно-волновом нагружении. Нелинейные континуальные модели разрушения. Модель Джонсона-Кука. Модель Пэриса многоциклового усталостного разрушения.
4. Влияние остаточных напряжений на усталостные свойства металлов и сплавов. Экспериментальные методы измерения остаточных напряжений.
5. Виды упрочнения материалов (прокатка, дробеструйная обработка, пластическое выглаживание, ультразвуковое упрочнение, лазерное ударное упрочнение).
6. Физический принцип технологии лазерного ударного упрочнения. Обзор и классификация установок для лазерного ударного упрочнения. Основные составляющие различных модификаций установок по лазерному ударному упрочнению. Сферы применения технологии лазерного ударного упрочнения.
7. Общая схема установки для лазерного ударного упрочнения на базе ИМСС УрО РАН (лазер, объективы, шестиосевой робот, программно-аппаратный комплекс, установка по измерению остаточных напряжений). Особенности оптики, используемой в установке для лазерного ударного упрочнения.
8. Техника безопасности при работе на установке по лазерному ударному упрочнению.
9. Структурные изменения металлов после лазерного ударного упрочнения. Исследование структуры современными экспериментальными методами (EBSD анализ).
10. Усталостные свойства металлов после лазерного ударного упрочнения.
11. Особенности исследования ударных волн с помощью лазерного ударного воздействия.

##### **Типовые контрольные вопросы для оценивания умений и владений на итоговом зачете по программе:**

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  $K_{1C} = 60$  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:  $\sigma$  - 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

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

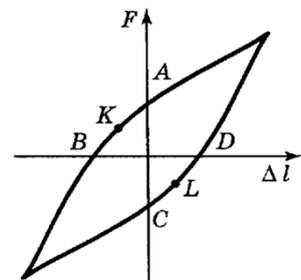
Образец разрушился после  $N = 10^6$  циклов нагружения. Определить вязкость разрушения материала. Формулу для расчета КИН принять как для бесконечной пластины  $K = \sigma \sqrt{\pi a}$ .

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  $\Delta l$  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  $\Delta l$ , 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.

**Методические материалы и фонды оценочных средств представлены в приложении к дополнительной профессиональной программе повышения квалификации «Избранные главы механики разрушения. Технологии поверхностного упрочнения».**

## **5. СОСТАВИТЕЛИ ПРОГРАММЫ**

### **Составители программы:**

м. н. с. «ИМСС УрО РАН»,

к. ф.-м. н.

\_\_\_\_\_

подпись

А.Ю. Изюмова

### **Руководитель структурного подразделения:**

Директор «ИМСС УрО РАН»

Руководитель лаборатории «Прочность и

интеллектуальные конструкции» ИЦМУ

«Сверхзвук»

академик РАН, д.т.н.

\_\_\_\_\_

подпись

В. П. Матвеевко

