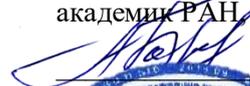


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
**Пермский федеральный исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук  
(ПФИЦ УрО РАН)**

Принято на заседании  
Объединенного ученого совета  
ПФИЦ УрО РАН

Протокол № 7  
«10» сентября 2021 г.

**УТВЕРЖДАЮ**  
Директор ПФИЦ УрО РАН  
академик РАН, д.т.н.

  
А.А. Барях  
«01» октября 2021 г.



**ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ПРОГРАММА  
ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ**

**«Современные экспериментальные методы в механике»**

ПЕРМЬ, 2021

# 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 ознакомление слушателей с современными достижениями экспериментальной механики усталостного разрушения и технологиями повышения усталостного ресурса металлических материалов и металлокомпозитов. Обучение современным методам дизайна остаточных напряжений и методам их мониторинга.

Основу программы составляют разделы механики сплошной среды, механики разрушения и физики твердого тела, отражающие современные достижения теории дефектов, экспериментальные методы исследования дефектной структуры, теории критических явлений, механики разрушения, статистические подходы в оценке надежности и разрушения. Программа включает в себя основы физики ударных волн и механики пластического деформирования металлов.

## 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 оценкой и оптимизацией усталостных свойств конструкций из металлических материалов.

### **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.

### **Знать:**

- методы и способы решения исследовательских задач в области экспериментальной механики усталостного разрушения;
- современные достижения в области решения исследовательских задач по теории механики разрушения;
- нормативные и технические требования к использованию информационных ресурсов, объектов научной, опытно-экспериментальной и приборной базы по теории механики разрушения.

### **Уметь:**

- анализировать методы исследования и способы решения задач механики разрушения;
- формулировать задачи исследования;
- использовать информационные ресурсы, научную, опытно-экспериментальную и приборную базы в анализе работоспособности элементов конструкций с трещинами;
- формулировать результаты, полученные в ходе решения краевых задач механики разрушения.

## Владеть:

-способностью к самостоятельному решению проблем в области механики разрушения, механики дисперсного накопления повреждений, механики трещин, механики коррозионного и усталостного разрушения;

-практическими навыками и знаниями использования результатов современных исследований в области связи между структурой материалов, характером внешних воздействий и процессами деформирования и разрушения.

### 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

№	Наименование разделов, дисциплин	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.	1	1	1	-	-	-	-
1.	Знакомство с современными экспериментальными методами механики разрушения.	2	1	1	-	-	1	текущий контроль
2.	Дефекты в твердых телах. Остаточные напряжения.	3	1	1	-	-	2	текущий контроль
3.	Статистические подходы при описании закономерностей накопления повреждений.	3	1	1	-	-	2	текущий контроль

	Методы измерения остаточных напряжений.							
4.	Особенности взаимодействия лазерного излучения с поверхностью твёрдых тел. Деформирования поверхности, накопление повреждений в квази-хрупких, пластичных материалах.	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
5.	Особенности кинетики разрушения.	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
6.	Закономерности разрушения композиционных материалов.	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
7.	Стадийность динамического распространения трещин.	4	2	2	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
8.	Экспериментальные методы исследования кинетики поврежденности.	4	2	2	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
9.	Методы создания остаточных сжимающих напряжений в металлах. Метод лазерной ударной проковки.	4	2	2	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
10.	Современные методы структурного анализа поврежденности	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

№	Наименование разделов, дисциплин, тем	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 экспериментальными методами механики разрушения</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	-		<b>1</b>	<i>текущий контроль</i>
1.1	Знакомство с современными экспериментальными методами механики разрушения, роли дефектов, микро- и мезоскопическими механизмами развития поврежденности.	1	0,5	0,5	-	-	0,5	<i>текущий контроль</i>
1.2	Роль дефектов с микро- и макроскопическими моделями накопления повреждений, зарождения и распространения трещин.	1	0,5	0,5	-	-	0,5	<i>текущий контроль</i>
<b>2.</b>	<b>Дефекты в твердых телах. Остаточные напряжения.</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>Статистические подходы при описании закономерностей накопления повреждений. Методы измерения остаточных напряжений</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	-	-	<b>2</b>	<i>текущий контроль</i>
3.1	Схемы усреднения, эффективные свойства материалов с дефектами.	1,5	0,5	0,5	-	-	1	<i>текущий контроль</i>
3.2	Методы измерения остаточных напряжений.	1,5	0,5	0,5	-	-	1	<i>текущий контроль</i>

4.	<b>Особенности взаимодействия лазерного излучения с поверхностью твёрдых тел. Деформирования поверхности, накопление повреждений в квази-хрупких, пластичных материалах.</b>	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
4.1	Особенности накопления повреждений в квази-хрупких, пластичных материалах.	1,5	0,5	0,5	-	-	1	<i>текущий контроль</i>
4.2	Особенности взаимодействия лазерного излучения с поверхностью твёрдых тел.	1,5	0,5	0,5	-	-	1	<i>текущий контроль</i>
5.	<b>Особенности кинетики разрушения.</b>	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
5.1	Особенности кинетики разрушения при квазистатическом, усталостном (малоцикловом, многоцикловом и гигацикловом), динамическом и ударно-волновом нагружении.	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
6.	<b>Закономерности разрушения композиционных материалов.</b>	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
6.1	Закономерности разрушения композиционных материалов.	3	1	1	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
7.	<b>Стадийность динамического распространения трещин (устойчивое, динамика с ветвлением, множественное разрушение).</b>	4	2	2	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
7.1	Стадийность динамического распространения трещин (устойчивое, динамика с ветвлением, множественное разрушение).	4	2	2	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
8.	<b>Экспериментальные методы исследования кинетики поврежденности.</b>	4	2	2	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
8.1	Экспериментальные методы исследования кинетики поврежденности	4	2	2	-	-	2	<i>текущий контроль</i>

	(микротрещин), стадийности разрушения.							
<b>9.</b>	Методы создания остаточных сжимающих напряжений в металлах. Метод лазерной ударной проковки..	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	-	-	<b>2</b>	<i>текущий контроль</i>
9.1	Экспериментальные методы исследования разрушения при квазистатическом, усталостном (мало-, много-, гигацикловом), динамическом и ударно-волновом нагружениях.	4	2	2	-	-	2	<i>текущий контроль</i>
<b>10.</b>	<b>Современные методы структурного анализа поврежденности.</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>			<b>1</b>	<i>текущий контроль</i>
10.1	Современные методы структурного анализа поврежденности (морфология и профилометрия поверхности разрушения, атомно-силовая микроскопия).	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

№ 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 8,9	Текущий контроль
5.	5	очно	2	Тема 9,10	Текущий контроль

6.	6	очно	4	итоговая аттестация	Зачет
----	---	------	---	------------------------	-------

### 2.3. Рабочая учебная программа дисциплины «Нелинейные аспекты разрушения».

#### Введение.

Л – 1 ч.

Организация учебного процесса. Основные понятия, термины и определения. Предмет и задачи дисциплины. История развития механики разрушения.

#### Раздел 1.

Л – 13 ч., СР – 22 ч.

**Тема 1.** Знакомство с современными экспериментальными методами механики разрушения, роли дефектов, микро- и мезоскопическими механизмами развития поврежденности; с микро- и макроскопическими моделями накопления повреждений, зарождения и распространения трещин.

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

**Тема 3.** Статистические подходы при описании закономерностей накопления повреждений, схемы усреднения, эффективные свойства материалов с дефектами; феноменологические модели накопления повреждений. Методы измерения остаточных напряжений

**Тема 4.** Особенности взаимодействия лазерного излучения с поверхностью твёрдых тел. Деформирования поверхности, накопление повреждений в квази-хрупких, пластичных материалах. Приложения к стеклам, керамикам, металлам и сплавам, в том числе с субмикроструктурной структурой, композитам.

**Тема 5.** Особенности кинетики разрушения при квазистатическом, усталостном (малоцикловом, многоцикловом и гигацкловом), 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.

**Тема 6.** Закономерности разрушения композиционных материалов.

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

**Тема 8.** Экспериментальные методы исследования кинетики поврежденности (микротрещин), стадийности разрушения.

**Тема 9.** Методы создания остаточных сжимающих напряжений в металлах. Метод лазерной ударной проковки.

**Тема 10.** Современные методы структурного анализа поврежденности (морфология и профилометрия поверхности разрушения, атомно-силовая микроскопия).

#### 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 SpringerLink <https://link.springer.com/>
  - научная электронная библиотека Elsevier <https://www.elsevier.com>
  - полнотекстовая мультидисциплинарная база данных диссертаций ProQuestDissertations&ThesesGlobal <http://proquest.com/pqdtglobal/dissertations>
  - 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>
  - электронная база данных Web of Science <http://apps.webofknowledge.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..
- Канель Г. И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. Москва, изд-во "Янус-К", 1996, 407 с.
- Косевич А.М., Ковалев А.С. Введение в нелинейную физическую механику. Киев.: Наук. Думка, 1989, 304 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 «Современные экспериментальные методы в механике». 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, роль дефектов, микро- и мезоскопическими механизмами развития поврежденности; с микро- и макроскопическими моделями накопления повреждений, зарождения и распространения трещин.
2. Дефекты в твердых телах. Остаточные напряжения. (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).

**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·м<sup>0,5</sup>, 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

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

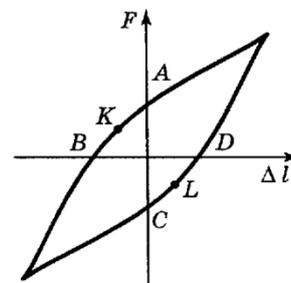
Образец разрушился после  $N = 10^6$  циклов нагружения. Определить вязкость разрушения материала. Формулу для расчета КИН принять как для бесконечной пластины  $K = \sigma\sqrt{\pi a}$ .

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.

12. Определить амплитуду и длительность импульса давления при взаимодействии металла с лазерным импульсом длительностью 10 нс и энергией 10 Дж. Считать размер пятна излучения  $1 \times 1$  мм, образующуюся плазму – одноатомным идеальным газом.

13. Перечислить основные методы измерения остаточных напряжений в металлах. Оценить остаточные напряжения в образце методом сверления отверстий.

## Методические материалы и фонды оценочных средств в приложении.

### 5. СОСТАВИТЕЛИ ПРОГРАММЫ

Составители программы:

Плехов Олег Анатольевич, д.ф.-м.н., профессор РАН



---

Руководитель структурного подразделения  
Директор «ИМСС УрО РАН»  
Руководитель лаборатории  
«Прочность и интеллектуальные конструкции»  
НЦМУ «Сверхзвук»  
Академик РАН



---

В.И. Матвеенко/

