

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования



**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет**

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебной работе

  
\_\_\_\_\_ Н.В.Лобов

« 14 » декабря 20 21 г.

### **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Дисциплина:** \_\_\_\_\_ Критерии прочности и пластичности  
(наименование)

**Форма обучения:** \_\_\_\_\_ очная  
(очная/очно-заочная/заочная)

**Уровень высшего образования:** \_\_\_\_\_ бакалавриат  
(бакалавриат/специалитет/магистратура)

**Общая трудоёмкость:** \_\_\_\_\_ 144 (4)  
(часы (ЗЕ))

**Направление подготовки:** \_\_\_\_\_ 15.03.03 Прикладная механика  
(код и наименование направления)

**Направленность:** \_\_\_\_\_ Прикладная механика (общий профиль, СУОС)  
(наименование образовательной программы)

## 1. Общие положения

### 1.1. Цели и задачи дисциплины

Аналитический обзор классических и современных феноменологических моделей перехода материалов в пластическое или предельное состояние и их закритического поведения с учетом анизотропии, дилатансии, зависимости от вида напряженного состояния, характера воздействий, области применимости, базовых экспериментов, необходимый для выбора моделей в рамках численного решения задач прикладной механики.

### 1.2. Изучаемые объекты дисциплины

Классические и современные модели статической и усталостной прочности, текучести и предельного состояния деформируемых твердых тел (горных пород, грунтов, сыпучих сред, порошков, металлов, керамик, композиционных полимерных и пористых материалов, метаматериалов, выращенных аддитивным производством) с учетом анизотропии, дилатансии и зависимости от вида напряженного состояния, подвергаемых пропорциональному или циклическому нагружению с различными характерными временами воздействий и характеризующихся огромным многообразием сценариев перехода в пластичное состояние или потери несущей способности материала.

### 1.3. Входные требования

Не предусмотрены

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Компетенция	Индекс индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (знать, уметь, владеть)	Индикатор достижения компетенции, с которым соотнесены планируемые результаты обучения	Средства оценки
ПК-1.1	ИД-1ПК-1.1	Знает классификацию моделей критериального поведения твердых тел и особенности их математического описания	Знает основные разделы математики, механики деформируемых тел, теории колебаний; современные методы проведения расчетов напряженно-деформированного состояния конструкций, численные методы моделирования, включая метод конечных элементов;	Экзамен

Компетенция	Индекс индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (знать, уметь, владеть)	Индикатор достижения компетенции, с которым соотнесены планируемые результаты обучения	Средства оценки
ПК-1.1	ИД-2ПК-1.1	Ориентируется в выборе подходящих моделей критериального поведения деформируемых тел в зависимости от задачи с учетом особенностей моделей и натурального поведения среды	Умеет применять специальные методики расчета параметров нагружения; применять специальные методики расчета конструкций на прочность, устойчивость и жесткость; применять современные системы автоматизированного проектирования (САПР), в том числе: пакеты прикладных программ конечно-элементного анализа, пакеты программ для создания электронных геометрических моделей; читать проектную конструкторскую и нормативную документацию	Индивидуальное задание
ПК-1.1	ИД-3ПК-1.1	Владеет навыками аналитических преобразований для экспериментальной аттестации и использования в численных расчетах критериев прочности и пластичности	Владеет навыками разработки статических и динамических моделей; применения современных методов, средств и стандартов, прикладных комплексов программ используемых при проектировании.	Индивидуальное задание

### 3. Объем и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего часов	Распределение по семестрам в часах	
		Номер семестра	
		8	
1. Проведение учебных занятий (включая проведение текущего контроля успеваемости) в форме:	64	64	
1.1. Контактная аудиторная работа, из них:			
- лекции (Л)	30	30	
- лабораторные работы (ЛР)			
- практические занятия, семинары и (или) другие виды занятий семинарского типа (ПЗ)	30	30	
- контроль самостоятельной работы (КСР)	4	4	
- контрольная работа			
1.2. Самостоятельная работа студентов (СРС)	80	80	
2. Промежуточная аттестация			
Экзамен			
Дифференцированный зачет	9	9	
Зачет			
Курсовой проект (КП)			
Курсовая работа (КР)			
Общая трудоемкость дисциплины	144	144	

### 4. Содержание дисциплины

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
8-й семестр				
Критериальное поведение материалов и особенности его описания. Классические теории прочности.	4	0	4	10
1.1. Предмет дисциплины. Критерии пластичности. Критерии хрупкого и вязкого разрушения. Статическая и усталостная прочность материалов. Анизотропия и зависимость от вида напряженно-деформированного состояния и дилатансия. 1.2. Теории максимальных напряжений и деформаций. Энергетические теории. Условия максимальных приведенных напряжений и полной пластичности.				
Анизотропные критерии текучести и прочности	4	0	6	12
2.1. Экспериментально определяемые параметры анизотропии пластических сред. Аномалии анизотропии пластических сред. 2.2. Квадратичный критерий Хилла. Степенные обобщения критерия Хилла. 2.3. Степенные критерии Барлата.				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
Критерии текучести и прочности с зависимостью от среднего напряжения	6	0	6	10
3.1. Ранние теории, обобщающие теорию Кулона. Неплотно связанных и уплотняющихся сред. Дилатансия. 3.2. Кэп-модели дилатирующих сред. 3.3. Обзор многоконстантных моделей дилатирующих сред.				
Критерии вязкого разрушения	2	0	2	8
4.1. Критерии вязкого разрушения. Зависимость от вида напряженного состояния, скорости деформаций и температуры. Связанные и несвязанные критерии.				
Введение в усталостное разрушение	2	0	0	4
5.1. Типы нагружения, приводящие к усталостному разрушению. 5.2. Физические основы усталостного разрушения. 5.3. Факторы влияющие на усталостную прочность деталей.				
Оценка усталостной прочности при одноосном нагружении.	6	0	6	20
6.1. Диаграмма Вёлера и диаграмма Хейга. 6.2. Гипотеза о линейном суммировании поврежденности (гипотеза Пальмгрена-Майнера). 6.3. Сведение к отнулевому циклу, формула Одинга. 6.4. Методы схематизации истории нагружения. 6.5. Оценка усталостной прочности при наличии концентраторов напряжений. Метод локальной истории деформаций.				
Статистическая обработка результатов экспериментов на усталостное разрушение.	2	0	2	6
7.1. Статистическая обработка результатов экспериментов на усталостное разрушение.				
Оценка усталостной прочности при многоосном нагружении.	4	0	4	10
8.1. Оценка усталостной прочности при пропорциональном нагружении. 8.2. Оценка усталостной прочности при пропорциональном нагружении. Метод критической плоскости.				
ИТОГО по 8-му семестру	30	0	30	80
ИТОГО по дисциплине	30	0	30	80

#### Тематика примерных практических занятий

№ п.п.	Наименование темы практического (семинарского) занятия
--------	--

№ п.п.	Наименование темы практического (семинарского) занятия
1	Девиаторная плоскость, векторный базис в девиаторной плоскости и запись критериев в терминах компонент разложения по данному базису.
2	Представление классических критериев кривыми на девиаторной плоскости.
3	Выражение констант квадратичного критерия Хилла через экспериментально определяемые параметры.
4	Выражение экспериментально определяемых параметров степенного критерия Хилла 1979 г. и описание им аномалий анизотропии.
5	Выражение экспериментально определяемых параметров степенного критерия Хилла 1990 г. и описание им аномалий анизотропии.
6	Вывод критерия Кулона - Мора.
7	Связь объемных и сдвиговых пластических деформаций при течении на конической и эллиптической части критерия Димаджо - Сэндлера при свободном растяжении/сжатии
8	Связь объемных и сдвиговых пластических деформаций при течении на конической и эллиптической части критерия Димаджо - Сэндлера при стесненном деформировании
9	Связь зависимости предельной деформации от параметра трехосности с кривой предельных деформаций
10	Диграмма Вёлера и диаграмма Хейга, их применение при оценке усталостной прочности.
11	Гипотеза Пальмгрена-Майнера. Сведение к отнулевому циклу.
12	Оценка времени жизни при блочном нагружении.
13	Оценка времени жизни на произвольном немонотонном нагружении.
14	Статистическая обработка диаграмм Вёлера и Хейга, оценка вероятности разрушения детали.
15	Метод локальной истории деформаций. Оценка времени жизни при наличии концентраторов нагружений.
16	Оценка времени жизни на многоосном нагружении.

## 5. Организационно-педагогические условия

### 5.1. Образовательные технологии, используемые для формирования компетенций

Проведение лекционных занятий по дисциплине основывается на активном методе обучения, при котором учащиеся не пассивные слушатели, а активные участники занятия, отвечающие на вопросы преподавателя. Вопросы преподавателя нацелены на активизацию процессов усвоения материала, а также на развитие логического мышления. Преподаватель заранее намечает список вопросов, стимулирующих ассоциативное мышление и установление связей с ранее освоенным материалом.

Практические занятия проводятся на основе реализации метода обучения действием: определяются проблемные области, формируются группы. При проведении практических занятий преследуются следующие цели: применение знаний отдельных дисциплин и креативных методов для решения проблем и принятия решений; отработка у обучающихся навыков командной работы, межличностных коммуникаций и развитие лидерских качеств; закрепление основ теоретических знаний.

Проведение лабораторных занятий основывается на интерактивном методе обучения, при котором обучающиеся взаимодействуют не только с преподавателем, но и друг с другом. При этом доминирует активность учащихся в процессе обучения. Место преподавателя в интерактивных занятиях сводится к направлению деятельности обучающихся на достижение целей занятия.

При проведении учебных занятий используются интерактивные лекции, групповые дискуссии, ролевые игры, тренинги и анализ ситуаций и имитационных моделей.

### 5.2. Методические указания для обучающихся по изучению дисциплины

При изучении дисциплины обучающимся целесообразно выполнять следующие рекомендации:

1. Изучение учебной дисциплины должно вестись систематически.
2. После изучения какого-либо раздела по учебнику или конспектным материалам рекомендуется по памяти воспроизвести основные термины, определения, понятия раздела.
3. Особое внимание следует уделить выполнению отчетов по практическим занятиям, лабораторным работам и индивидуальным комплексным заданиям на самостоятельную работу.
4. Вся тематика вопросов, изучаемых самостоятельно, задается на лекциях преподавателем. Им же даются источники (в первую очередь вновь изданные в периодической научной литературе) для более детального понимания вопросов, озвученных на лекции.

## 6. Перечень учебно-методического и информационного обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

### 6.1. Печатная учебно-методическая литература

№ п/п	Библиографическое описание (автор, заглавие, вид издания, место, издательство, год издания, количество страниц)	Количество экземпляров в библиотеке
<b>1. Основная литература</b>		
1	Гольденблат И. И., Копнов В. А. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов. Москва : Машиностроение, 1968. 191 с.	6
2	Келлер И. Э., Петухов Д. С. Критерии прочности и пластичности : учебное пособие. Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2020. 156 с. 10,0 усл. печ. л.	5

3	Критерии прочности и расчет механической надежности конструкций / Аликин В. Н., Анохин П. В., Колмогоров Г. Л., Литвин И. Е. Пермь : Изд-во ПГТУ, 1999. 159 с.	25
<b>2. Дополнительная литература</b>		
<b>2.1. Учебные и научные издания</b>		
1	Критерии прочности и надежность конструкций / Аликин В. Н., Литвин И. Е., Сесюнин С. Г., Соколовский М. И., Ушин Н. В. Москва : Недра, 2005. 164 с.	7
<b>2.2. Периодические издания</b>		
1	Вестник ПНИПУ. Механика : журнал. Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2012 - .	
2	Известия Российской академии наук. Механика твердого тела : научный журнал. Москва : Наука, 1966 - .	
<b>2.3. Нормативно-технические издания</b>		
	Не используется	
<b>3. Методические указания для студентов по освоению дисциплины</b>		
	Не используется	
<b>4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студента</b>		
	Не используется	

## 6.2. Электронная учебно-методическая литература

Вид литературы	Наименование разработки	Ссылка на информационный ресурс	Доступность (сеть Интернет / локальная сеть; авторизованный / свободный доступ)
Дополнительная литература	Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев : Наук. думка, 1976. 415 с.	URL: <a href="https://elib.pstu.ru/Record/RUPNRPUelib5958">https://elib.pstu.ru/Record/RUPNRPUelib5958</a>	локальная сеть; свободный доступ

## 6.3. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение, используемое при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Вид ПО	Наименование ПО
Операционные системы	MS Windows XP (подп. Azure Dev Tools for Teaching до 27.02.2022 )
Прикладное программное обеспечение общего назначения	Mathematica Professional Version (лиц. L3263-7820*)

## 6.4. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Наименование	Ссылка на информационный ресурс
База данных Scopus	<a href="https://www.scopus.com/">https://www.scopus.com/</a>

Наименование	Ссылка на информационный ресурс
База данных Web of Science	<a href="http://www.webofscience.com/">http://www.webofscience.com/</a>
Научная библиотека Пермского национального исследовательского политехнического университета	<a href="http://lib.pstu.ru/">http://lib.pstu.ru/</a>
Электронно-библиотечная система Лань	<a href="https://e.lanbook.com/">https://e.lanbook.com/</a>
Электронно-библиотечная система IPRbooks	<a href="http://www.iprbookshop.ru/">http://www.iprbookshop.ru/</a>
Информационные ресурсы Сети КонсультантПлюс	<a href="http://www.consultant.ru/">http://www.consultant.ru/</a>

## 7. Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине

Вид занятий	Наименование необходимого основного оборудования и технических средств обучения	Количество единиц
Лекция	Мультимедийная учебная аудитория 205 корпус Г: Мультимедиа комплекс (Инв.№ 0483179) Доска аудиторная (Инв.№ 0641017) Ноутбук Toshiba Satellite A200-1HV (Инв.№ 0474274)	1
Практическое занятие	Мультимедийный компьютерный класс 212 корпус Г: Программно-аппаратный комплекс для организации удаленного доступа к вычислительным ресурсам и ПО QForm высокопроизводительного вычислительного комплекса ПГТУ для реализации образовательных программ по ПНР НИУ (Инв.№ 0485074) в составе Системный блок Aquarius Elt E50 S67, Intel DQ57TML, Intel Core i7-860, Samsung DDR III SDRAM PC3-10600, HDD 750 Gb SATA-II 300 Western Digital, DVD+/-RW Samsung SH-S223C, PCI-512M ATI Radeon HD5670 GDDR3 VGA+DVI+HDMI, Мышь Aquarius Mouse Optical 2 key Scroll, Клавиатура Aquarius Keyboard 104r/l, Монитор Samsung P2350(KUV) - 11 шт, Проектор Beng Projector BP6210 (Инв.№ 0453251), Киноэкран, Доска аудиторная	1

## 8. Фонд оценочных средств дисциплины

Описан в отдельном документе

В задачах №2-№4, при оценке времени жизни использовать диаграммы Вёлера приведённые в файле «blocks.nb».

### №1

В файле «wohler\_approx.nb» приведены 2 диаграммы Вёлера в виде 2-х наборов экспериментальных точек, один набор соответствует симметричному регулярному циклированию ( $R = -1$ ), а второй – отнулевому ( $R = 0$ ). Аппроксимировать эти данные билинейными функциями (в логарифмических координатах, ниже «lg» означает логарифм по основанию 10) вида

$$f(N) = \begin{cases} k(\lg(N) - \lg(N_0)) + b, & N < N_0 \\ b & , N \geq N_0 \end{cases}$$

То есть так подобрать параметры  $N_0, k, b$  что сумма квадратичных расстояний от экспериментальных точек до линии минимальна.

### №2

Задача на оценку времени жизни детали на блочной истории нагружения. В файле «blocks.nb» заданы 2 диаграммы Вёлера и история нагружения состоящая из 5ти блоков регулярного нагружения, необходимо оценить сколько таких историй нагружения выдержит деталь используя гипотезу о линейном суммировании повреждённости (гипотезу Пальмгрена - Майнера) и 2 альтернативных метода сведения произвольного цикла к отнулевому: с помощью формулы Одингга и с помощью линейного сведения к отнулевому циклу.

### №3

Задача на схематизацию циклов. В файле «schematization.nb» приведены 2 истории нагружения, необходимо оценить время жизни детали на каждой из их (сколько таких историй нагружения выдержит деталь). Для этого необходимо схематизировать истории нагружения 2мя альтернативными методами: методом дождя и методом полных циклов, а затем, как и в

предыдущей задаче, свести циклы к отнулевым и подсчитать накапливаемую повреждённость.

#### №4

Статистическая обработка диаграммы Вёлера. В файле «wohler\_statistics.nb» приведена диаграмма Вёлера в виде результатов экспериментов на усталостное разрушение чугуна EN-GJV-450. Для нескольких значений амплитуд нагружения проведено по несколько испытаний. Аппроксимировать плотность вероятности разрушения детали для каждого значения амплитуды нагружения используя

- 1) Лог-нормальное распределение
- 2) Распределение Вейбулла.

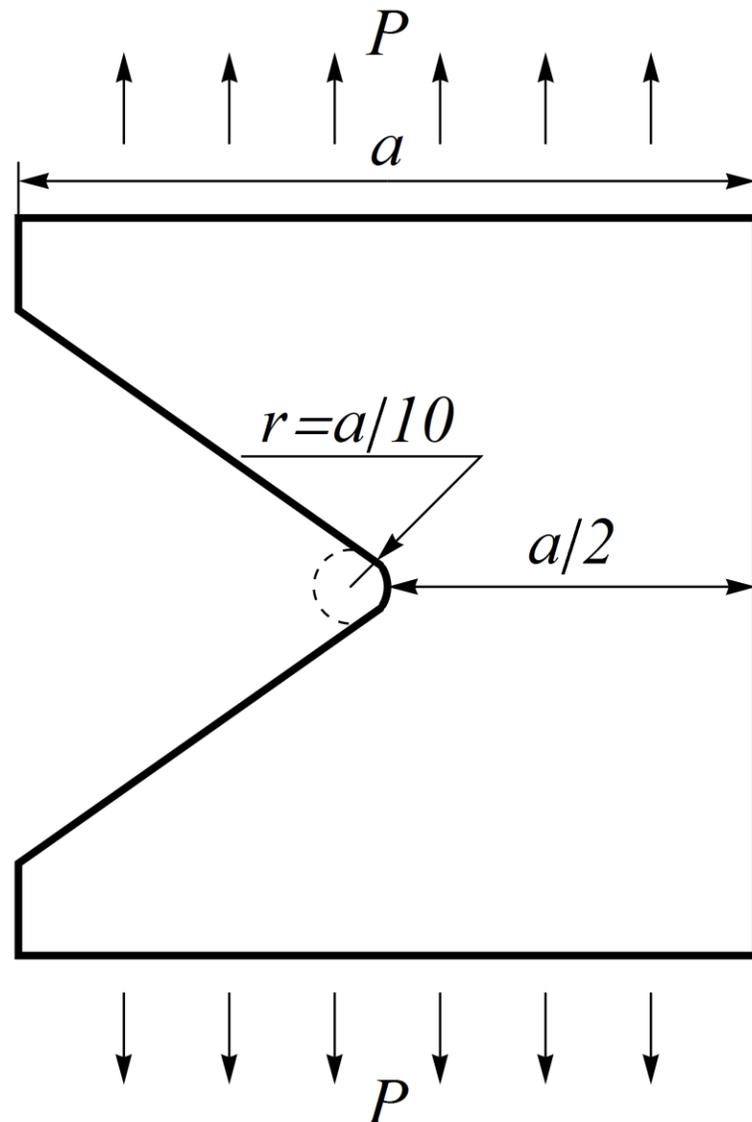
Определить количества циклов до разрушения с вероятностями 50%, 95%, 99%.

#### №5

Дана деталь с концентратором напряжений имеющем коэффициент концентрации напряжений  $K_t = 3$ . И дана история нагружения этой детали  $P(t)$  приведённая в файле «concentrator\_history.nb». Необходимо определить сколько таких историй выдержит деталь. Рассмотреть детали разных размеров:

$$a = 10^4, 10^3, 10^2, 10 \text{ мм.}$$

Для выполнения задания необходимо знать зависимость усталостного коэффициента концентрации напряжения  $K_f$  от  $K_t$  и масштабного фактора. Для материала из которого сделана деталь, даны



результаты 3х экспериментов для образцов с  $K_t = 2.43$  :

$$K_f = 2.2 \text{ при } \rho = 12.45\text{мм.},$$

$$K_f = 2.1 \text{ при } \rho = 6.2\text{мм.},$$

$$K_f = 1.85 \text{ при } \rho = 1.53\text{мм.},$$

где  $\rho$  - радиус кривизны концентратора напряжений. Из 3х эмпирических формул для зависимостей  $K_f$  от  $K_t$  и  $\rho$ , выбрать ту, которая наиболее хорошо описывает приведённые экспериментальные данные и использовать её для решения поставленной задачи. Три формулы:

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + a_1/\rho} \text{ - формула Питерсона,}$$

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{a_2/\rho}} \text{ - формула Нейбера,}$$

$$K_f = \frac{K_t}{1 + \sqrt{a_3/\rho}} \text{ - формула Зибеля – Стилера,}$$

$a_i$  есть параметры моделей.

#### №6

Задача на оценку времени жизни детали подверженной многоосному циклическому нагружению. Пусть деталь подвержена комбинации регулярных синфазных одноосного и сдвигового нагружений ( $R = 0$ ) с амплитудами соответственно  $\sigma_a$  и  $\tau_a$  (различные варианты сочетаний амплитуд приведены в таблице ниже). Необходимо определить время жизни детали под таким воздействием (число циклов до разрушения) если известны 2 диаграммы Вёлера: при только одноосном нагружении и только сдвиговом. Эти диаграммы даны в файле «biaxial.nb».

	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
$\sigma_a$ (МПа)	750	0	650	500	300	100	600

$\tau_a$ (МПа)	0	600	200	400	300	550	100
----------------	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----

При оценке времени жизни использовать 2 альтернативные формулы:

$$\text{Gosh: } \left( \frac{\sigma_a}{\sigma_a^*(N)} \right)^2 + \left( \frac{\tau_a}{\tau_a^*(N)} \right)^2 = 1, \text{ где } \sigma_a^*(N) \text{ есть амплитуда одноосного}$$

циклирования соответствующая времени жизни  $N$ , задаваемая соответствующей диаграммой Вёлера,  $\tau_a^*(N)$  есть амплитуда сдвигового циклирования соответствующая времени жизни  $N$  тоже задаваемая соответствующей диаграммой Вёлера.

Sines:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1^a - \sigma_2^a)^2 + (\sigma_2^a - \sigma_3^a)^2 + (\sigma_3^a - \sigma_1^a)^2} + k(\sigma_1^m + \sigma_2^m + \sigma_3^m) = (1+k)\sigma_a^*(N),$$

где  $k = \frac{\sqrt{3}\tau_a^*(N)}{\sigma_a^*(N)} - 1$ ,  $\sigma_i^a$  есть амплитуды главных напряжений,  $\sigma_i^m$  есть средние значения главных напряжений.