МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, МИНИСТЕРСТВО НАУКИ, ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И ИННОВАЦИЙ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

МОО ВО Кыргызско-Российский Славянский университет
имени первого Президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина

УТВЕРЖДАЮ

Директор
(должность)
Лоцев Г.В
(ФИО)
3 сентября____2026 г.

Конструкционная прочность

рабочая программа дисциплины (модуля)

Закреплена за кафедрой **Высшая школа Природопользования, мехатроники и транспорта**

Учебный план Направление 15.03.03 - РФ, 650500 - КР Прикладная механика
Профиль "Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг"

Квалификация **бакалавр**
Форма обучения **очная**

Общая трудоемкость **4 ЗЕТ**
Часов по учебному плану 144
в том числе:
аудиторные занятия 48
самостоятельная работа 64

Виды контроля в семестрах:
экзамен 7

Распределение часов дисциплины по семестрам

Семестр (<Курс>.<Семестр на курсе>)	**7 (4.1)**		Итого	
Недель	18			
Вид занятий	УП	РП	УП	РП
Лекции	16	16	16	16
Лабораторные	16	16	16	16
Практические	16	16	16	16
Контактная работа в период экзаменационной сессии	0,3	0,3	0,3	0,3
В том числе инт.	2	2	2	2
В том числе в форме практ.подготовки	18	18	18	18
Итого ауд.	48	48	48	48
Контактная работа	48,3	48,3	48,3	48,3
Сам. работа	64	64	64	64
Часы на контроль	31,7	31,7	31,7	31,7
Итого	144	144	144	144

Программу составил(и):
к.ф.-м.н., Герман Константин Анатольевич

к.т.н, Джаманкулов Азамат Кенешбекович

Рецензент(ы):
к.ф.-м.н., Комарцов Никита Михайлович

д.т.н, Муслимов Аннас Поясович

Согласовано РОП:
к.ф.-м.н., Герман Константин Анатольевич

Рабочая программа дисциплины
Конструкционная прочность

разработана в соответствии с ФГОС 3++:

Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования - бакалавриат по направлению подготовки 15.03.03 Прикладная механика (приказ Минобрнауки России от 09.08.2021 г. № 729)

составлена на основании учебного плана:

Направление 15.03.03 - РФ, 650500 - КР Прикладная механика
Профиль "Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг"
утвержденного учёным советом вуза от 26.06.2026 протокол № 11.

Рабочая программа одобрена на заседании **Высшей школы Природопользования, мехатроники и транспорта**

Протокол от 02.09.2026 г. № 1
Срок действия программы: 2026-2032 уч.г.
Руководитель подразделения: Алсеитов Мирлан Тилегенович

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ
к рабочей программе дисциплины (модуля)

Конструкционная прочность

№ п/п	Основание внесения изменения	Раздел/ пункт	Содержание изменения
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	
1.1	Используя понятия механики разрушения, анализа интенсивности напряжений в вершине трещины, изучения макроскопических и микроскопических особенностей поверхности разрушения, механические свойства данного
1.2	материала, исследователь должен суметь обобщить эту информацию при решении конкретных задач. Для этой цели необходимо решать задачи анализа разрушения детали согласно перечню, включающему: геометрию детали,
1.3	напряженное состояние, характеристику дефекта, данные фрактографического анализа, информацию о структуре, включая сведения об изготовлении детали, и другую вспомогательную информацию. Кроме того, для полного анализа следует применять научные догадки. Цель указанного перечня – сведение к минимуму числа догадок и как можно в большей степени использование возможностей для проведения точного количественного анализа.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП	
Цикл (раздел) ООП:	Б1.В.1.ДВ.04
2.1	**Требования к предварительной подготовке обучающегося:**
2.1.1	Б1.О.2.06. Физика
2.1.2	Б1.О.2.01. Введение в высшую математику
2.1.3	Б1.В.1.01. Теория упругости
2.1.4	Б1.О.3.12. Аналитическая механика
2.1.5	Б1.В.1.06. Метод конечных элементов
2.1.6	Б1.О.3.10. Вариационное исчисление
2.1.7	Б1.О.2.03. Линейная алгебра и аналитическая геометрия
2.1.8	Б1.О.2.05. Теория вероятностей и математическая статистика
2.1.9	Б1.О.3.03. Сопротивление материалов
2.1.10	Б1.О.3.05. Материаловедение
2.1.11	Б1.О.3.01. Введение в профессиональную деятельность
2.1.12	Б1.В.1.ДВ.07.01. Сопротивление материалов (продвинутый курс)
2.1.13	Б1.О.2.02. Математический анализ
2.2	**Дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:**
2.2.1	Б3.О.02. Подготовка к сдаче и сдача государственного экзамена
2.2.2	Б2.О.02(Пд). Преддипломная практика
2.2.3	Б3.О.03. Подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы

3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)	
ПК-1: Способностью применять физико-математический аппарат, теоретические, расчетные и экспериментальные методы исследования, методы математического и компьютерного моделирования в процессе профессиональной деятельности	
Знать:	
Уровень 1	Физико-математический аппарат, теоретические, расчетные и экспериментальные методы исследований, методы математического и компьютерного моделирования в процессе профессиональной деятельности;
Уровень 2	
Уровень 3	
Уметь:	
Уровень 1	Применять физико-математический аппарат, теоретические, расчетные и экспериментальные методы исследований, методы математического и компьютерного моделирования в процессе профессиональной деятельности;
Уровень 2	
Уровень 3	
Владеть:	
Уровень 1	физико-математический аппаратом для проведения исследований; навыками использования математического и компьютерного моделирования в процессе профессиональной деятельности
Уровень 2	
Уровень 3	

В результате освоения дисциплины обучающийся должен

3.1	**Знать:**
3.1.1	характерные особенности явления концентрации напряжений; соотношение между теоретической и реальной прочностью твердых тел; перечень данных, необходимых для полного анализа разрушения.
3.2	**Уметь:**
3.2.1	устанавливать области концентрации расчетных напряжений; определять природу критического дефекта, приведшего к разрушению; рассчитывать коэффициенты концентрации напряжений; выявлять характер напряженного состояния при различных видах разрушения; определять параметры диаграмм усталости.
3.3	**Владеть:**
3.3.1	теорией концентрации напряжений; основами кристаллографии; методами оценки конструкционной прочности.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Код занятия	Наименование разделов и тем /вид занятия/	Семестр / Курс	Часов	Компетен-ции	Литература	Инте ракт.	Пр. подг.	Примечание
	Раздел 1. Физические предпосылки прочности и локальные напряжения. Механика разрушения и сопротивление росту трещин							
1.1	Конструкционная прочность и механизмы разрушения Прочность образца и прочность детали: влияние геометрии, масштаба, технологии изготовления и условий эксплуатации. Теоретическая прочность кристалла и реальная прочность металла; роль дислокаций, включений, пор и микротрещин. Кристаллическая решётка, системы скольжения и ориентация зёрен как предпосылки пластической деформации и разрушения. Вязкое и хрупкое разрушение: зарождение микропустот, их слияние, скол и межзеренное разрушение. Исходные данные для анализа разрушения вала или кронштейна: нагрузки, материал, термообработка, дефекты и история эксплуатации. /Лек/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
1.2	Анализ факторов конструкционной прочности детали Составление перечня исходных данных для вала с выточкой; разграничение свойств материала, конструктивных и эксплуатационных факторов. /Пр/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			

1.3	Концентрация напряжений в элементах машин Номинальные и локальные напряжения; выбор сечения и определение теоретического коэффициента концентрации Kt. Отверстия, галтели, выточки и резьба: влияние радиуса и отношений геометрических размеров на Kt. Плоское напряжённое состояние, плоская деформация и стеснение пластических деформаций в зоне концентратора. Различие концентратора конечного радиуса и идеализированной трещины; почему Kt не заменяет коэффициент интенсивности напряжений K. Расчёт Kt методом конечных элементов: граничные условия, сгущение сетки, проверка по решению для круглого отверстия. /Лек/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
1.4	Расчёт локальных напряжений у концентратора Определение номинального напряжения и Kt; сопоставление с пределом текучести; выбор геометрического способа снижения концентрации. /Пр/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
1.5	Линейная механика разрушения и критерий по K Три моды раскрытия трещины; геометрия центральной, краевой и поверхностной трещины. Асимптотическое поле у вершины и коэффициенты KI, KII, KIII; размерность МПа·√м и роль геометрической функции Y. Энергетический подход Гриффитса и связь $G = K_I^2/E'$ для моды I в изотропном линейно-упругом теле. Критерий KI = Kc, характеристика KIc при плоской деформации; влияние толщины, температуры и условий испытания. Расчёт критического размера трещины и остаточной прочности; оценка маломасштабной текучести и границ применимости. /Лек/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			

1.6	Оценка критического размера трещины Вычисление KI, критической длины и допустимого напряжения; проверка принятой схемы и маломасштабной текучести. /Пр/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
1.7	Упругопластическое разрушение и экспериментальная трещиностойкость Пластическая зона у вершины: влияние предела текучести и стеснения деформаций на применимость линейной модели. J-интеграл и раскрытие вершины трещины CTOD как параметры упругопластического разрушения; ограничения их применения. Кривая сопротивления росту трещины: инициирование, устойчивое подрастание и потеря устойчивости. Принцип испытаний образцов с предварительной усталостной трещиной; измерение нагрузки, перемещения и подрастания. Различие KQ и подтверждённого KIc; проверка размеров образца и условий испытания без автоматического переноса результата на деталь. /Лек/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
1.8	Обработка данных испытания на трещиностойкость Вычисление условного KQ по выданной геометрической функции; проверка размерного условия и решение о возможности обозначения KIc. /Пр/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1	2	2	
1.9	Сопоставление теоретической и реальной прочности; схема влияния дефектов и технологии на прочность выбранной детали. Подбор решения для отверстия или галтели; сопоставление номинальных напряжений и геометрических параметров в разных источниках. Параметрическое исследование зависимости KI и критического размера трещины от нагрузки и трещиностойкости. Разбор протокола испытания на трещиностойкость; перечень условий, препятствующих признанию KQ характеристикой KIc. /Ср/	7	32	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			

	Раздел 2. Усталость и долговечность деталей с дефектами. Диагностика разрушения и компьютерное обоснование прочности.							
2.1	Усталостная прочность и накопление повреждений Параметры цикла σmax, σmin, σa, σm и R; постоянная и переменная амплитуда нагружения. Кривая Велера: построение в логарифмических координатах, ограниченная долговечность и условный предел выносливости. Влияние среднего напряжения, поверхности, размеров и остаточных напряжений на усталость детали. Чувствительность к надрезу q и эффективный коэффициент концентрации Kf; различие Kf и Kt. Гипотеза Пальмгрена–Майнера для блочного нагружения: вычисление повреждённости и ограничения при изменении последовательности нагрузок. /Лек/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
2.2	Расчёт усталостной долговечности Определение параметров цикла, Kf и повреждённости по Майнеру для заданных блоков нагрузки. /Пр/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
2.3	Рост усталостных трещин и оценка остаточного ресурса Диаграмма da/dN–ΔK: пороговая область, участок Пэриса и ускоренное разрушение при приближении Kmax к Kc. Закон Пэриса, параметры C и m, их размерности и экспериментальная идентификация при заданном R. Вычисление ΔK и Kmax для принятой геометрии; влияние закрытия трещины, R и истории нагрузки. Интегрирование da/dN от начального до конечного размера трещины; проверка применимости закона на всём интервале. Связь обнаруживаемого дефекта, критического размера и периодичности контроля; влияние среды и коррозионного растрескивания на переносимость модели. /Лек/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			

2.4	Расчёт ресурса по росту трещины Интегрирование закона Пэриса и анализ влияния начального дефекта; сопоставление с критическим размером. /Пр/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
2.5	Фрактографический анализ разрушенных деталей Осмотр детали, сохранение поверхности излома и сбор эксплуатационных данных; различие наблюдения и гипотезы. Макропризнаки излома: очаг, направление распространения, зона стабильного роста, долом и губы среза. Микропризнаки: ямки, фасетки скола, межзеренные участки и усталостные бороздки; ограничения выводов по отдельному признаку. Сопоставление фрактографии, микроструктуры, твёрдости и сведений о технологии изготовления. Проверка альтернативных причин разрушения вала: перегрузка, усталость, дефект материала и воздействие среды; необходимые подтверждающие исследования. /Лек/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
2.6	Установление вероятного механизма разрушения Анализ описания излома и истории эксплуатации; составление доказательной цепочки и перечня недостающих исследований. /Пр/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			

2.7	Конечноэлементная оценка прочности детали с трещиной Постановка расчёта: геометрия дефекта, модель материала, нагрузки, закрепления и выбор плоской либо пространственной модели. Построение сетки у фронта трещины и определение K или J доступными в решателе методами; роль специальных элементов. Верификация по аналитическому решению и исследование сеточной сходимости параметра трещины; отличие от сходимости максимального напряжения. Согласование расчёта с испытаниями и фрактографией; чувствительность результата к размеру дефекта, нагрузке и свойствам. Инженерное заключение о допустимости дефекта, ограничении нагрузки или дополнительном обследовании с явным указанием границ модели. /Лек/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
2.8	Проверка качества компьютерного расчёта Сопоставление K для нескольких сеток с аналитическим решением; анализ погрешности и формулирование инженерного вывода. /Пр/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
2.9	Построение кривой усталости по выданной выборке; оценка разброса и расчёт повреждения при блочном нагружении. Программная реализация интегрирования закона Пэриса с проверкой единиц и сравнением с аналитическим частным случаем. Подготовка аналитической записки о разрушении детали с разделением фактов, гипотез и необходимых проверок. Подготовка отчёта о верификации модели с трещиной и чувствительности результата к сетке и исходным данным. /Ср/	7	32	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
2.10	Консультации и проведение экзамена /КрЭк/	7	0,3	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
	Раздел 3. Лабораторный практикум							
3.1	• Лабораторная работа 1. Численное исследование концентрации напряжений в пластине с отверстием. /Лаб/	7	4	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1		4	

3.2	• Лабораторная работа 2. Определение условной трещиностойкости по экспериментальной диаграмме нагружения образца с трещиной. /Лаб/	7	4	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1		4	
3.3	• Лабораторная работа 3. Определение параметров усталостного роста трещины по экспериментальным данным. /Лаб/	7	4	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1		4	
3.4	• Лабораторная работа 4. Фрактографическое исследование изломов по макроснимкам и микрофотографиям. /Лаб/	7	4	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1		4	

5. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

5.1. Контрольные вопросы и задания

Вопросы для текущего контроля и аттестации

1. Почему прочность детали не определяется только пределом прочности материала?
2. Как дефекты решётки и микроструктура объясняют различие теоретической и реальной прочности?
3. Какие данные необходимы для количественного анализа разрушения детали?
4. Как определяется Kt и почему необходимо указывать способ вычисления номинального напряжения?
5. Как радиус галтели и геометрия отверстия влияют на локальное напряжённое состояние?
6. Чем различаются Kt, Kf и коэффициент интенсивности напряжений KI?
7. Как различаются моды I, II и III и какие нагрузки вызывают каждую из них?
8. Как рассчитывают KI и критический размер трещины при постоянном Y?
9. При каких условиях связаны G и KI и как выбирают E′?
10. Чем KQ отличается от KIc и какие проверки необходимы при интерпретации испытания?
11. Когда линейная механика разрушения перестаёт быть достаточной?
12. Что характеризуют J-интеграл, CTOD и кривая сопротивления росту трещины?
13. Как вычисляют амплитуду, среднее напряжение и коэффициент асимметрии цикла?
14. Как строят кривую Велера и учитывают отсутствие выраженного предела выносливости?
15. Как поверхность, остаточные напряжения и среднее напряжение влияют на усталость?
16. Как рассчитывают повреждённость по Майнеру и почему результат зависит от ограничений модели?
17. В какой части диаграммы da/dN–ΔK применим закон Пэриса?
18. Какие данные нужны для расчёта остаточного ресурса детали с трещиной?
19. Почему ΔK, Kmax, R и условия среды следует рассматривать совместно?
20. Какие макро- и микропризнаки позволяют предположить механизм разрушения?
21. Почему усталостные бороздки и макроскопические полосы не следует отождествлять?
22. Как проверить причинную гипотезу, основанную на наблюдении излома?
23. Почему максимальное напряжение у идеальной трещины не является критерием сеточной сходимости?
24. Чем верификация расчёта отличается от валидации и какие неопределённости следует отразить в заключении?

Тестовые задания

Выберите один правильный ответ. Каждый правильный ответ — 1 балл. Время — 15 минут; максимум — 10 баллов.

1. Коэффициент Kt равен:
А. σmax/σnom; Б. KI/KIc; В. σa/σm.
2. Единица измерения KI:
А. МПа; Б. МПа·√м; В. МПа/м.
3. Мода I соответствует:
А. антиплоскому сдвигу; Б. плоскому сдвигу; В. нормальному раскрытию.
4. Для центральной трещины общей длиной 2a в широкой пластине параметр a — это:
А. половина длины; Б. полная длина; В. толщина пластины.
5. Для плоской деформации изотропного материала в связи $G = KI^2/E'$:
А. $E' = E$; Б. $E' = E/(1-\nu^2)$; В. $E' = E(1-\nu^2)$.
6. Закон Пэриса описывает:
А. всю диаграмму от порога до долома; Б. только статическую прочность; В. средний участок устойчивого усталостного роста.
7. Если σmax = 180 МПа, σmin = 20 МПа, амплитуда равна:
А. 100 МПа; Б. 80 МПа; В. 160 МПа.
8. Для D = Σni/Ni при постоянных Ni перестановка блоков в модели Майнера:
А. не меняет D; Б. всегда удваивает D; В. делает D равным нулю.
9. При сгущении сетки у идеальной трещины в линейной упругости максимальное напряжение:
А. обязано стремиться к нулю; Б. всегда остаётся постоянным; В. может возрастать без достижения конечного предела.

10. Наблюдение ямочного рельефа позволяет прежде всего предположить:
А. механизм слияния микропустот; Б. гарантированную усталость; В. отсутствие пластической деформации.

Интерпретация
9–10: уверенное владение базовыми понятиями; 7–8: отдельные пробелы; 5–6: требуется разбор ошибок; 0–4: базовые понятия нуждаются в повторении. Тест не заменяет оценку расчётных и исследовательских действий.

Ситуационный анализ и экзаменационные билеты
Кейс Разрушение ступенчатого вала
Учебные данные: вал разрушился в зоне галтели после длительной работы при переменном изгибе. На макроснимке очаг расположен у поверхности; от него распространяется относительно гладкая зона с дугообразными границами. Оставшаяся часть сечения имеет более грубый рельеф. На микрофотографиях гладкой зоны видны участки с бороздчатым рельефом, в зоне долома — ямки. Известны номинальная марка стали и чертёж; спектр нагрузки, состояние поверхности до разрушения и фактическая термообработка не установлены.
Задание: предложить основной и альтернативные механизмы; разграничить наблюдения и интерпретации; назвать необходимые исследования; объяснить, почему нельзя численно установить ресурс по одному изображению излома; предложить проверяемые меры повышения прочности.
Ориентир ответа: совокупность признаков согласуется с усталостным ростом от поверхности и последующим вязким доломом. Проверяются локальная перегрузка, дефект обработки и влияние среды. Нужны масштабированные снимки, материалография, твёрдость, состояние поверхности, спектр нагрузок, остаточные напряжения и расчёт напряжений. Дугообразные макрополосы не приравниваются к одному циклу; количественный ресурс без дополнительных данных не устанавливается. Меры: увеличение радиуса галтели, улучшение поверхности и контроль дефектов — после проверки причин.
Промежуточная аттестация
Предлагаемый экзамен: два теоретических вопроса и одна задача. Подготовка — 40 минут; ответ и обсуждение — до 15 минут. Разрешены непрограммируемый калькулятор и выданный лист формул; для задачи 6 достаточно табличных результатов.
Билет Вопросы из перечня Задача
1 1 и 8 1
2 4 и 10 2
3 7 и 12 3
4 13 и 16 4
5 14 и 17 5
6 18 и 23 6
7 20 и 24 2
8 3 и 22 5

Вопросы, не включённые в восемь билетов, используются для текущего контроля и как уточняющие при обсуждении. Задачи выдаются в полном виде с указанными допущениями; ответы и критерии остаются у преподавателя

5.2. Темы курсовых работ (проектов)

курсовая работа не предусмотрена

5.3. Фонд оценочных средств

Фонд оценочных средств
Объект оценки — применение физических, расчётных, экспериментальных и компьютерных методов при исследовании прочности детали. Основание — ПК-1 из аннотации: «Способностью применять физико-математический аппарат, теоретические, расчетные и экспериментальные методы исследования, методы математического и компьютерного моделирования в процессе профессиональной деятельности».
Проверяемое действие Материал ФОС Свидетельство результата
Выбор механизма и модели Вопросы 1–8, тест, кейс Обоснованная модель и её ограничения
Выполнение расчёта Задачи 1–5 Формулы, единицы и проверяемый результат
Обработка эксперимента ЛР 2 и 3, вопросы 10–18 Параметры, графики и оценка пригодности данных
Компьютерное моделирование ЛР 1, задача 6 Сопоставление с решением и сходимость
Анализ разрушения ЛР 4, кейс Связь наблюдений, расчёта и выводов

Комплект ФОС включает 24 контрольных вопроса, 10 тестовых заданий с ключом, 6 расчётных задач с ответами, ситуационный кейс, 8 экзаменационных билетов и критерии оценивания. Практические работы и темы самостоятельной работы приведены выше.

Вопросы для текущего контроля и аттестации
1. Почему прочность детали не определяется только пределом прочности материала?
2. Как дефекты решётки и микроструктура объясняют различие теоретической и реальной прочности?
3. Какие данные необходимы для количественного анализа разрушения детали?
4. Как определяется Kt и почему необходимо указывать способ вычисления номинального напряжения?
5. Как радиус галтели и геометрия отверстия влияют на локальное напряжённое состояние?
6. Чем различаются Kt, Kf и коэффициент интенсивности напряжений KI?
7. Как различаются моды I, II и III и какие нагрузки вызывают каждую из них?

8. Как рассчитывают KI и критический размер трещины при постоянном Y?
9. При каких условиях связаны G и KI и как выбирают E′?
10. Чем KQ отличается от KIc и какие проверки необходимы при интерпретации испытания?
11. Когда линейная механика разрушения перестаёт быть достаточной?
12. Что характеризуют J-интеграл, CTOD и кривая сопротивления росту трещины?
13. Как вычисляют амплитуду, среднее напряжение и коэффициент асимметрии цикла?
14. Как строят кривую Велера и учитывают отсутствие выраженного предела выносливости?
15. Как поверхность, остаточные напряжения и среднее напряжение влияют на усталость?
16. Как рассчитывают повреждённость по Майнеру и почему результат зависит от ограничений модели?
17. В какой части диаграммы da/dN–ΔK применим закон Пэриса?
18. Какие данные нужны для расчёта остаточного ресурса детали с трещиной?
19. Почему ΔK, Kmax, R и условия среды следует рассматривать совместно?
20. Какие макро- и микропризнаки позволяют предположить механизм разрушения?
21. Почему усталостные бороздки и макроскопические полосы не следует отождествлять?
22. Как проверить причинную гипотезу, основанную на наблюдении излома?
23. Почему максимальное напряжение у идеальной трещины не является критерием сеточной сходимости?
24. Чем верификация расчёта отличается от валидации и какие неопределённости следует отразить в заключении?
Текущий контроль: вопросы 1–6 после лекций 1–2; 7–12 после лекций 3–4; 13–19 после лекций 5–6; 20–24 после лекций 7–8. Для аттестации используется весь перечень.

Тестовые задания
Выберите один правильный ответ. Каждый правильный ответ — 1 балл. Время — 15 минут; максимум — 10 баллов.
1. Коэффициент Kt равен:
А. σmax/σnom; Б. KI/KIc; В. σa/σm.
2. Единица измерения KI:
А. МПа; Б. МПа·√м; В. МПа/м.
3. Мода I соответствует:
А. антиплоскому сдвигу; Б. плоскому сдвигу; В. нормальному раскрытию.
4. Для центральной трещины общей длиной 2a в широкой пластине параметр a — это:
А. половина длины; Б. полная длина; В. толщина пластины.
5. Для плоской деформации изотропного материала в связи G = KI²/E′:
А. E′ = E; Б. E′ = E/(1−ν²); В. E′ = E(1−ν²).
6. Закон Пэриса описывает:
А. всю диаграмму от порога до долома; Б. только статическую прочность; В. средний участок устойчивого усталостного роста.
7. Если σmax = 180 МПа, σmin = 20 МПа, амплитуда равна:
А. 100 МПа; Б. 80 МПа; В. 160 МПа.
8. Для D = Σni/Ni при постоянных Ni перестановка блоков в модели Майнера:
А. не меняет D; Б. всегда удваивает D; В. делает D равным нулю.
9. При сгущении сетки у идеальной трещины в линейной упругости максимальное напряжение:
А. обязано стремиться к нулю; Б. всегда остаётся постоянным; В. может возрастать без достижения конечного предела.
10. Наблюдение ямочного рельефа позволяет прежде всего предположить:
А. механизм слияния микропустот; Б. гарантированную усталость; В. отсутствие пластической деформации.
Интерпретация
9–10: уверенное владение базовыми понятиями; 7–8: отдельные пробелы; 5–6: требуется разбор ошибок; 0–4: базовые понятия нуждаются в повторении. Тест не заменяет оценку расчётных и исследовательских действий.

Расчётные задания 1–3
Числа в заданиях являются учебными данными, а не справочными свойствами конкретной марки материала. На экзамене выдаётся задача без ответа. Допустимое отличие численного результата из-за округления — до 2%.
Задача 1 Концентратор и параметры цикла
Полоса имеет ширину b = 50 мм и толщину t = 5 мм. Сила изменяется от 5 до 25 кН. Для заданной геометрии Kt = 2,4 относительно полного сечения bt, чувствительность к надрезу q = 0,75, предел текучести σy = 300 МПа. Определить номинальные σmax, σmin, σa, σm, R; упругий локальный максимум; Kf = 1 + q(Kt−1). Объяснить роль Kf.
Ответ: A = 250 мм²; σmax = 100 МПа; σmin = 20 МПа; σa = 40 МПа; σm = 60 МПа; R = 0,2. Локальный упругий максимум 240 МПа < 300 МПа. Kf = 2,05. Kf характеризует усталостное влияние надреза и не заменяет Kt при вычислении упругого пикового напряжения. Проверка одного максимума не доказывает усталостную долговечность.
Задача 2 Остаточная прочность
В широкой пластине центральная сквозная трещина имеет полную длину 2a = 10 мм. Принять Y = 1; σ = 150 МПа; KIc = 50 МПа·√м; σy = 600 МПа; толщина B = 25 мм. Использовать KI = σ√(πa) и оценку rp = (KI/σy)²/(6π) для плоской деформации. Найти KI, запас KIc/KI, критическую полудлину ac и rp/a. Обсудить применимость.
Ответ: a = 0,005 м; KI = 18,80 МПа·√м; запас 2,66; ac = (50/150)²/π = 0,03537 м. rp = 0,0521 мм; rp/a = 0,0104. Размерный ориентир 2,5(KIc/σy)² = 17,36 мм меньше B. Малая пластическая зона поддерживает линейную модель; реальная ширина и остаточная связка должны быть проверены отдельно. ac — полудлина, полная критическая длина равна 70,74 мм. Y = 1 допустим только при достаточной ширине.
Задача 3 Энергетический параметр
Для изотропного линейно-упругого тела заданы KI = 30 МПа·√м, E = 210 ГПа, ν = 0,3. Найти G при плоском напряжённом состоянии и плоской деформации. Использовать G = KI²/E′.

Ответ: при плоском напряжённом состоянии $E' = E$, $G = 4286$ Дж/м²; при плоской деформации $E' = E/(1-\nu^2)$, $G = 3900$ Дж/м². Расчёт выполняется в согласованных единицах; 1 МПа·м = 10^6 Дж/м². Сравниваются состояния при одном и том же заданном KI.

Расчётные задания 4–6

Задача 4 Блочное усталостное нагружение

Для одной и той же детали при двух режимах с одинаковой асимметрией цикла по её усталостной кривой установлены $N1 = 200\,000$ и $N2 = 1\,000\,000$ циклов. Повторяемый блок содержит $n1 = 10\,000$ и $n2 = 50\,000$ циклов. В рамках модели Майнера определить повреждение за блок и число полных блоков до $D = 1$. Предполагается, что начальное повреждение равно нулю.

Ответ: $D_{бл} = 10\,000/200\,000 + 50\,000/1\,000\,000 = 0{,}10$. До $D = 1$ — 10 блоков, или 600 000 циклов. Это модельная оценка, не гарантированный ресурс; последовательность нагрузок, разброс и влияние среды в ней не учитываются.

Задача 5 Рост усталостной трещины

Для центральной трещины принять $Y = 1$, $\sigma_{min} = 0$, $\sigma_{max} = 100$ МПа, $a_0 = 0{,}002$ м, $a_f = 0{,}008$ м. На всём интервале действует $da/dN = C(\Delta K)^3$, $C = 2\cdot10^{-12}$ м/(цикл·(МПа·√м)³). Для проверки заданы $\Delta K_{th} = 5$ МПа·√м, $K_c = 50$ МПа·√м; пластическая зона считается малой. Найти N и оценить область применимости.

Решение: $\Delta K = 100\sqrt{(\pi a)}$. $N = 2(a_0^{(-1/2)} - a_f^{(-1/2)})/[C\cdot100^3\cdot\pi^{3/2}] \approx 2{,}008\cdot10^6$ циклов. На концах интервала $\Delta K = K_{max} = 7{,}93$ и 15,85 МПа·√м: выше заданного порога и ниже K_c. Условная критическая полудлина $a_c = 0{,}07958$ м больше a_f. Рассчитан ресурс только до a_f, а не до разрушения; пригодность участка Пэриса принята в условии, сравнение с порогом само по себе её не доказывает.

Задача 6 Верификация компьютерного расчёта

Аналитическое значение KI = 20,0 МПа·√м. При характерных размерах сетки у вершины h = 1; 0,5; 0,25 мм получены KI = 18,0; 19,4; 19,8 МПа·√м. Требуется относительное расхождение с аналитическим решением не более 2% и изменение между двумя последними сетками относительно последнего результата не более 3%. Проверить условия и сформулировать вывод.

Ответ: ошибки 10%; 3%; 1%. Изменение между двумя последними сетками: $|19{,}8-19{,}4|/19{,}8\cdot100\% = 2{,}02\%$. Последняя сетка удовлетворяет обоим учебным требованиям. Это верификация для данной постановки; она не доказывает правильность исходных нагрузок, геометрии дефекта и свойств реальной детали.

Для задач 1–6 требуется представить схему, исходные данные с единицами, модель, формулы, вычисления, проверку применимости и вывод. Численный ответ без хода решения не считается полным выполнением.

Ситуационный анализ и экзаменационные билеты

Кейс Разрушение ступенчатого вала

Учебные данные: вал разрушился в зоне галтели после длительной работы при переменном изгибе. На макроснимке очаг расположен у поверхности; от него распространяется относительно гладкая зона с дугообразными границами. Оставшаяся часть сечения имеет более грубый рельеф. На микрофотографиях гладкой зоны видны участки с бороздчатым рельефом, в зоне долома — ямки. Известны номинальная марка стали и чертёж; спектр нагрузки, состояние поверхности до разрушения и фактическая термообработка не установлены.

Задание: предложить основной и альтернативные механизмы; разграничить наблюдения и интерпретации; назвать необходимые исследования; объяснить, почему нельзя численно установить ресурс по одному изображению излома; предложить проверяемые меры повышения прочности.

Ориентир ответа: совокупность признаков согласуется с усталостным ростом от поверхности и последующим вязким доломом. Проверяются локальная перегрузка, дефект обработки и влияние среды. Нужны масштабированные снимки, материалография, твёрдость, состояние поверхности, спектр нагрузок, остаточные напряжения и расчёт напряжений. Дугообразные макрополосы не приравниваются к одному циклу; количественный ресурс без дополнительных данных не устанавливается. Меры: увеличение радиуса галтели, улучшение поверхности и контроль дефектов — после проверки причин.

Промежуточная аттестация

Предлагаемый экзамен: два теоретических вопроса и одна задача. Подготовка — 40 минут; ответ и обсуждение — до 15 минут. Разрешены непрограммируемый калькулятор и выданный лист формул; для задачи 6 достаточно табличных результатов.

Билет	Вопросы из перечня	Задача
1	1 и 8	1
2	4 и 10	2
3	7 и 12	3
4	13 и 16	4
5	14 и 17	5
6	18 и 23	6
7	20 и 24	2
8	3 и 22	5

Вопросы, не включённые в восемь билетов, используются для текущего контроля и как уточняющие при обсуждении. Задачи выдаются в полном виде с указанными допущениями; ответы и критерии остаются у преподавателя.

Критерии оценивания

Текущий контроль

Компонент	Максимум	Порядок начисления
Тест	10	По 1 баллу за правильный ответ
Практические работы 1–8	24	До 3 баллов за каждую работу

Лабораторные работы 1–4 16 До 4 баллов за каждую работу
Самостоятельная работа 1–8 8 До 1 балла за каждую тему
Защита ситуационного кейса 2 До 2 баллов за аргументацию
Всего за текущую работу 60 Результаты фиксируются раздельно

Практическая работа, 3 балла: 1 — модель и схема; 1 — корректные вычисления и единицы; 1 — проверка и обоснованный вывод. Для работы 7: по 1 баллу за гипотезу, подтверждающие данные и план проверки. Для работы 8: по 1 баллу за эталон, оценку погрешности и вывод о качестве модели.
Лабораторная работа, 4 балла: по 1 баллу за воспроизводимое описание данных/модели, корректную обработку, проверку качества результата и индивидуальную защиту. Для фрактографии проверка качества означает сопоставление нескольких признаков и альтернативных гипотез.
Самостоятельная работа, 1 балл: 0,5 — полный результат по теме; 0,5 — проверяемые источники, расчёт или аргументация.
Кейс, 2 балла: по 0,5 за разделение фактов и гипотез, основную гипотезу, альтернативы и план проверки. Баллы кейса начисляются за отдельную защиту, не повторяют оценку практической работы 7.
Экзамен и итоговая оценка
Экзамен — 40 баллов: каждый теоретический вопрос до 10 баллов, задача до 20 баллов. За вопрос: полнота — 4, физическая корректность — 3, ограничения и инженерный пример — 3. За задачу: схема и данные — 3, выбор модели — 5, вычисления и единицы — 6, проверка применимости и вывод — 6.
Предлагаемый минимум экзамена — 20 из 40, включая не менее 10 из 20 за задачу. Итог складывается из текущих и экзаменационных баллов: 85–100 — «отлично»; 70–84 — «хорошо»; 60–69 — «удовлетворительно»; менее 60 либо невыполнение минимума экзамена — «неудовлетворительно».
Ошибки, меняющие физический смысл (полная длина вместо полудлины, несогласованные единицы, применение закона вне его области), снижают баллы соответствующего критерия. Преподаватель фиксирует ошибку и её влияние; одна ошибка не штрафуется повторно в нескольких критериях за один и тот же дефект решения.

5.4. Перечень видов оценочных средств

- Устный опрос и письменные краткие ответы по физическим механизмам прочности и разрушения.
- Тест по базовым понятиям, размерностям и границам применимости моделей.
- Индивидуальные расчётные задания по концентрации напряжений, трещиностойкости и долговечности.
- Отчёты по лабораторным работам и их индивидуальная защита.
- Компьютерный расчёт с аналитической проверкой и анализом сеточной сходимости.
- Ситуационный анализ разрушения детали по данным эксплуатации и фрактографии.
- Экзаменационный билет с теоретическими вопросами и расчётной задачей.

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

6.1. Рекомендуемая литература

6.1.1. Основная литература

	Авторы, составители	Заглавие	Издательство, год
Л1.1	Работнов Ю.Н.	Механика деформируемого твердого тела: учебное пособие для вузов	М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1988

6.1.2. Дополнительная литература

	Авторы, составители	Заглавие	Издательство, год
Л2.1	Рычков Б.А.	Экспериментальная механика деформируемого твердого тела: учебник	Бишкек: Изд-во КРСУ 2019

6.1.3. Методические разработки

	Авторы, составители	Заглавие	Издательство, год
Л3.1	Рычков Б.А.	Классификация конструкционных материалов: методическое пособие	Бишкек: Изд-во КРСУ 2000

6.3. Перечень информационных и образовательных технологий

6.3.1 Компетентностно-ориентированные образовательные технологии

6.3.1.1	• Ansys Mechanical — конечноэлементный расчёт напряжений и параметров трещины, исследование сходимости. Используется при наличии доступной лицензии и соответствующих возможностей установленной версии.
6.3.1.2	• CalculiX — свободный конечноэлементный решатель и средства подготовки/анализа моделей; подходит для учебных задач концентрации и верификации. Возможности конкретного расчёта трещины проверяются по документации .
6.3.1.3	• Python с NumPy, SciPy и Matplotlib — обработка испытаний, регрессия параметров закона Пэриса, интегрирование и графики .
6.3.1.4	• Ansys Granta EduPack — учебный подбор и сравнение материалов; использование при наличии лицензии. Данные о трещиностойкости и усталости проверяются для конкретного состояния материала.

6.3.2 Перечень информационных справочных систем и программного обеспечения

6.3.2.1	• MatWeb — поиск справочных свойств материалов и сопоставление доступных карточек. Значения проверяются по состоянию материала, температуре и первоисточнику; наличие нужной характеристики не гарантируется .
6.3.2.2	• ASM Digital Library — профессиональные справочники по материалам, усталости, разрушению и анализу отказов; часть материалов доступна по подписке .
6.3.2.3	• AFGROW DTD Handbook — открытый инженерный справочник по механике разрушения, остаточной прочности и росту трещин. Авиационные примеры адаптируются к задаче; они не являются обязательными нормами для всех деталей машин.
6.3.2.4	• Ansys Help Fracture Analysis Guide — официальная справочная система по параметрам и постановкам расчёта разрушения; описание конкретной версии следует сопоставлять с установленным продуктом.

7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

8. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Работа с лекционным материалом

Перед лекцией повторите необходимые понятия сопротивления материалов, теории упругости, материаловедения и метода конечных элементов. После лекции составьте краткую схему: механизм разрушения, расчётный параметр, исходные данные, критерий и границы применимости. Не переносите условия одной модели на другую без проверки.

Ведите отдельный перечень обозначений. Для каждой трещины рисуйте схему и указывайте, означает ли a полную длину, полудлину или глубину. Различайте Kt, Kf, KI, KQ и KIc. Записывайте единицы рядом с каждым числом; в формулах с $\sqrt{a}$ приводите длину к единицам, согласованным с K.

Решение расчётных задач

Сначала выберите номинальное сечение и схему нагрузки. Затем определите механизм: текучесть, хрупкое разрушение, усталостное зарождение или рост имеющейся трещины. Обоснуйте выбор модели и проверьте доступность исходных характеристик. После расчёта оцените порядок величины, чувствительность к параметрам и ограничения вывода.

Для циклической нагрузки вычислите σa, σm и R. Для закона Пэриса проверьте размерность C, диапазон ΔK, условия R и среды. Не экстраполируйте зависимость к порогу и долому автоматически. Для модели Майнера укажите происхождение Ni и условия, при которых получена усталостная кривая.

Эксперимент и лабораторный отчёт

Сохраняйте исходные таблицы и не заменяйте их только сглаженными графиками. Укажите источник данных, размеры образца, способ измерения трещины и параметры нагружения. Различайте условную характеристику испытания и подтверждённую характеристику материала. Отразите разброс, погрешность измерений и причины возможных отклонений.

Структура отчёта: исходные данные; схема и метод; результаты обработки; проверка; вывод; источники; файлы расчёта. Для фрактографии дополнительно приводите масштаб снимков, описание наблюдений, проверяемые гипотезы и недостающие сведения. Не очищайте реальную поверхность излома без согласованной процедуры.

Компьютерный расчёт

Укажите версию решателя, тип элементов, свойства, закрепления и способ приложения нагрузки. Проверьте равновесие и единицы. Сопоставьте модель с аналитическим эталоном, затем используйте не менее трёх последовательно сгущаемых сеток. Оценивайте сходимость K или J, а для гладкого концентратора — соответствующего локального напряжения.

Сохраняйте входной файл, исходные данные, скрипт обработки и таблицу сходимости. Отделяйте верификацию численного решения от валидации по эксперименту. Не выдавайте высокую точность численного решения за подтверждение реальных нагрузок и свойств.

Подготовка к аттестации

Распределите 64 часа самостоятельной работы по восьми темам. Ответьте на контрольные вопросы и решите шесть задач без подсказок. При защите объясните физический смысл результата и ограничения модели. При исправлении расчёта укажите причину ошибки.