

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования_
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО
решением Ученого совета ННГУ
протокол № 15 от 24.12.2025 г.

Рабочая программа дисциплины

Физика металлов, сплавов и керамик

Уровень высшего образования
Бакалавриат

Направление подготовки / специальность
03.03.02 - Физика

Направленность образовательной программы
Физика конденсированного состояния

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2026 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.1.13 Физика металлов, сплавов и керамик относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-3: Способен проводить научные исследования с помощью современной приборной базы, сложного физического оборудования и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта	ИД ПК-3: Демонстрация способности проводить научные исследования с помощью современной приборной базы, сложного физического оборудования и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта	ИД ПК-3: Знать: Знать методы физических исследований, необходимые для получения новых знаний и решения задач в области физики металлов, сплавов и керамик. Знать основные методы (и их классификацию) физических исследований (методы металлографических исследований, измерения электросопротивления, методы исследований физико-механических свойств), необходимые для выполнения практических заданий и лабораторных работ по дисциплине «Физика металлов, сплавов и керамик». Знать требования техники безопасности при проведении практических работ с выбранными методами физических исследований. Знать теоретические основы методов физических исследований, необходимых для выполнения практических заданий и лабораторных работ по дисциплине «Физика металлов, сплавов и керамик». Знать требования к документам, предъявляемым в качестве отчетных за выполненные лабораторные	Допуск к лабораторной работе Собеседование Задачи Тест	Зачёт: Задачи Контрольные вопросы Отчет по лабораторным работам Тест Экзамен: Задачи Контрольные вопросы Отчет по лабораторным работам Тест

		работы (практические задания). Уметь: Уметь использовать возможности современных методов физических исследований для решения сложных экспериментальных и теоретических физических задач в области физики металлов, сплавов и керамик. Уметь интерпретировать полученные экспериментальные результаты с использованием методов анализа экспериментальных данных и методов элементарной обработки результатов эксперимента. Уметь решать практические задачи, связанные с расчетом характеристик материалов (средний размер частиц второй фазы, средний размер зерна, температура начала рекристаллизации, энергия активации рекристаллизации и др.) на основании анализа результатов экспериментальных исследований, полученных в ходе выполнения лабораторных работ. Уметь обосновывать выбор оптимальных условий проведения экспериментальных исследований, направленных на изучение сложных физических явлений (диффузия, рекристаллизация, распад твердого раствора, деформация и разрушение) в области физики металлов, сплавов и керамик. Владеть: Опытом проведения сложных (комплексных) экспериментальных исследований (выполнения лабораторных работ) в		
--	--	--	--	--

		области физики металлов, сплавов и керамик с использованием современных методов физических исследований. Опытном анализа полученных экспериментальных результатов и их интерпретации с учетом профессиональных знаний в области теории и методов физических исследований. Владеть навыками оформления отчетных документов по проведенным лабораторным работам (практическим задания) в соответствии с требованиями, установленными учебно-методическими материалами. Владеть навыками исследования сложных физических процессов (диффузии, рекристаллизации, распада твердого раствора) с использованием ряда взаимно дополняющих методик. Владеть навыками физического анализа результатов экспериментальных исследований и их интерпретации с использованием профессиональных знаний в соответствующих областях физики металлов, сплавов и керамик.		
ПК-4: Способен осуществлять выбор необходимых научных методов исследований для решения задач профессиональной деятельности	ИД ПК-4: Демонстрация способности осуществлять выбор необходимых научных методов исследований для решения задач профессиональной деятельности	ИД ПК-4: Знать: Знать основные разделы физики конденсированного состояния, физического материаловедения и смежных дисциплин, формирующих фундаментальную научно-образовательную базу, необходимую для решения задач в области физики металлов, сплавов и керамик. Знать основные разделы физики металлов, сплавов и керамик, необходимых	Задачи Собеседование Допуск к лабораторной работе Тест	Зачёт: Задачи Контрольные вопросы Тест Отчет по лабораторным работам Экзамен: Задачи Контрольные вопросы

		используемые для решения практических задач, в том числе: - основы теории диффузии и диффузионных процессов в металлах, сплавах и керамиках; - механизмы выделения и роста частиц второй фазы, в том числе знать уравнения для расчета кинетических зависимостей объемной доли и размера выделяющихся частиц второй фазы; - механизмы пластической деформации в области микро- и макропластической деформации, в том числе знать уравнения для расчета основных физико-механических свойств материалов; - основные механизмы ползучести, в том числе знать уравнения для расчета скорости ползучести; - механизмы зарождения и разрушения металлических и керамических материалов, в том числе знать их классификацию с использованием карт механизмов разрушения. Уметь: Уметь соотносить знания различных разделов физики конденсированного состояния с профильными знаниями в области физики металлов, сплавов и керамик, а также со знаниями в смежных областях. Уметь использовать знания различных разделов физики конденсированного состояния и смежных дисциплин для решения типовых (стандартных) задач в области физики металлов, сплавов и керамик. Уметь использовать специализированные знания в области физики		Отчет по лабораторным работам Тест
--	--	---	--	--

		конденсированного состояния, физического материаловедения и смежных дисциплин для обоснования выбора оптимального способа решения поставленных задач. Уметь решать практические задачи, связанные с расчетом оптимальных параметров структуры металлических и керамических материалов, необходимых для обеспечения заданного уровня их физико-механических свойств. Владеть: Владеть методами, теориями и инструментарием дисциплины «Физика металлов, сплавов и керамик», базирующихся на различных разделах физики конденсированного состояния. Владеть опытом использования знаний и методов физики конденсированного состояния для получения новых знаний и решения задач в области физики конденсированного состояния. Владеть навыками решения задач (проведения расчетов) оптимальных параметров структуры металлических материалов в заданных условиях эксплуатации. Владеть навыками физического анализа результатов экспериментальных исследований и их интерпретации с использованием профессиональных знаний в соответствующих областях физики металлов, сплавов и керамик.		
--	--	---	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	7
Часов по учебному плану	252
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	56
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	100
- КСР	4
самостоятельная работа	56
Промежуточная аттестация	36 Экзамен, Зачёт

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/ лабора- торные работы), часы	Всего	
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
Основы диффузионных процессов в твердых телах. Феноменология и теория диффузионных процессов в металлах, сплавах и керамиках	26	16	0	16	10
Процессы возврата и рекристаллизации в деформированных металлах и сплавах. Анализ процессов рекристаллизации с использованием современных методов физических исследований	82	22	50	72	10
Механизмы микро- и макропластической деформации. Определение механизмов микро- и макропластической деформации с использованием традиционных и современных методов исследований механических свойств	14	4	0	4	10
Механизмы распада твердого раствора в металлах и сплавах. Анализ механизмов распада твердого раствора с использованием современных методов физических исследований	68	8	50	58	10
Механизмы деформации и разрушения в условиях ползучести. Анализ механизмов деформации и разрушения с использованием карт механизмов деформации и разрушения	22	6	0	6	16
Аттестация	36				
КСР	4			4	
Итого	252	56	100	160	56

Содержание разделов и тем дисциплины

Тема 1: Основы диффузионных процессов в твердых телах. Феноменология и теория диффузионных процессов в металлах, сплавах и керамиках

Диффузия (определение). Само- и гетеродиффузия. Энергия активации диффузии и ее физический смысл. Физический смысл предэкспоненциального множителя в выражении для коэффициента диффузии. Механизмы объемной диффузии с участием точечных дефектов. Основные закономерности объемной диффузии. Законы Фика. Влияние различных факторов на интенсивность процессов диффузии.

Особенности протекания диффузии при температурах вблизи температуры Дебая. Особенности протекания объемной диффузии в керамиках.

Механизмы зернограницной диффузии. Основные закономерности зернограницной диффузии. Влияние различных факторов на интенсивность процессов зернограницной диффузии. Понятие о свободном объеме границ зерен. Влияние избыточного свободного объема на коэффициент зернограницной диффузии.

Зернограницные сегрегации. Влияние легирующих элементов на коэффициент зернограницной диффузии. Причины немоного влияния концентрации легирующих элементов на величину коэффициента зернограницной диффузии при различных температурах.

Эффекты Киркендалла и Френкеля. Феноменология и основные закономерности эффектов Киркендалла и Френкеля. Влияние диффузионных свойств материалов на интенсивность эффектов Киркендалла и Френкеля.

Решение задач по различным разделам темы №1.

Тема 2: Процессы возврата и рекристаллизации в деформированных металлах и сплавах. Анализ процессов рекристаллизации с использованием современных методов физических исследований

Понятие о возврата и рекристаллизации металлов и сплавов. Отличие возврата от рекристаллизации.

Движущие силы процесса возврата. Полигонизация как один из механизмов возврата. Кинетика возврата. Влияние возврата на механические свойства сильно деформированных металлов и сплавов.

Классификация видов рекристаллизации по С.С. Горелику. Принципы построения диаграмм рекристаллизации.

Понятие о «зародыше» рекристаллизации. Миграционная подвижность границ зерен зародыша рекристаллизации. Влияние диффузионных свойств границ зерен на миграционную подвижность границ зародыша рекристаллизации.

Первичная рекристаллизация. Отличие первичной рекристаллизации от остальных видов рекристаллизации. Основные закономерности и движущая сила первичной рекристаллизации.

Уравнение Зинера для случая первичной рекристаллизации. Влияние первичной рекристаллизации на механические свойства металлов.

Основные закономерности и движущая сила собирательной рекристаллизации (нормального роста зерен). Основные закономерности и движущая сила вторичной рекристаллизации (аномального роста зерен). Уравнение Зинера для случая собирательной рекристаллизации. Влияние собирательной рекристаллизации на механические свойства металлов.

Понятие о температуре начала рекристаллизации и времени инкубационного периода процесса рекристаллизации. Проблема формулы Бочвара для определения температуры начала рекристаллизации. Влияние различных факторов на температуру начала рекристаллизации и время инкубационного периода рекристаллизации.

Решение задач по различным разделам темы №2.

Лабораторная работа по теме №2.

Тема 3: Механизмы микро- и макропластической деформации. Определение механизмов микро- и макропластической деформации с использованием традиционных и современных методов исследований

механических свойств

Общая классификация видов механических испытаний металлов и сплавов (испытания на растяжение,

твердость, усталость, ползучесть). Физические процессы, лежащие в основе методов механических испытаний.

Особые точки на зависимости «деформация – разрушение». Особенности развития процессов пластической деформации в области микро- и макропластической деформации. Предел макроупругости. Предел текучести. Предел прочности. Твердость. Корреляция между этими величинами. Физический смысл основных параметров прочности.

Расчет прочностных характеристик металлов и сплавов. Вклад Пайерлса-Набарро.

Твердорастворное упрочнение. Механизмы твердорастворного упрочнения. Атмосферы. Причины образования атмосфер и их виды. Атмосфера Коттрелла. Атмосфера Судзуки. Атмосфера Снука. Зуб текучести на диаграмме «напряжение-деформация».

Вклад дислокационного упрочнения. Вклад субструктурного упрочнения. Причины различного влияния хаотического распределения дислокаций и малоугловых субграниц на прочность металлов.

Виды частиц второй фазы. Дисперсное и дисперсионное упрочнение. Вклад частиц второй фазы (когерентных, некогерентных) в упрочнение материала.

Вклад размера зерна и состояния границ зерен в предел текучести. Соотношение Холла-Петча.

Физический смысл коэффициента зернограницного упрочнения в соотношении Холла-Петча.

Решение задач по различным разделам темы №3.

Тема 4: Механизмы распада твердого раствора в металлах и сплавах. Анализ механизмов распада твердого раствора с использованием современных методов физических исследований

Основные методы исследований твердых растворов и закономерностей их распада при отжиге.

Измерение удельного электросопротивления как основной метод исследования распада твердого раствора. Правило Матиссена. Физический смысл правила Матиссена. Причины повышения электросопротивления при увеличении плотности дефектов в кристаллической решетке. Влияние различных дефектов на электросопротивление металлов и сплавов.

Распад твердого раствора. Понятие о критическом (устойчивом) размере зародыша. Виды выделений частиц второй фазы (гомогенный, гетерогенный).

Механизм и кинетика выделения частиц второй фазы. Основные уравнения, описывающие кинетику выделения частиц второй фазы в случае гомогенного и гетерогенного распада твердого раствора.

Уравнение Джонсона-Мела-Аврами-Колмогорова для кинетики распада твердого раствора. Расчет параметров уравнения Джонсона-Мела-Аврами-Колмогорова в случае выделения частиц в объеме кристаллической решетки, на границах зерен и на ядрах решеточных дислокаций.

Механизм и кинетика роста частиц второй фазы. Основные уравнения, описывающие кинетику роста частиц второй фазы в случае гомогенного и гетерогенного распада твердого раствора. Расчет параметров уравнения роста частиц в случае их преимущественного расположения (роста) в объеме кристаллической решетки, на границах зерен и на решеточных дислокациях.

Коалесценция частиц второй фазы. Физический смысл эффекта коалесценции. Уравнение Вагнера-Лившица-Слезова.

Решение задач по различным разделам темы №4.

Лабораторная работа по теме №4.

Тема 5: Механизмы деформации и разрушения в условиях ползучести. Анализ механизмов деформации и разрушения с использованием карт механизмов деформации и разрушения

Классификация видов разрушения. Факторы, влияющие на характер разрушения. Связь характера разрушения и деформационных процессов. Влияние дефектов структуры на характер разрушения. Скол (раскалывание). Вязкое разрушение при средних температурах. Межзеренное разрушение при ползучести. Пластический разрыв.

Условия зарождения трещин. Модели зарождения и роста трещин: материалы с исходными трещинами и материалы без исходных трещин. Зарождение дефектов при различных температурно-силовых условиях. Основные уравнения, описывающие взаимосвязь разрушения с параметрами микроструктуры

металлов, сплавов и керамик. Уравнения, описывающие рост трещин и пор при ползучести. Карты механизмов разрушения материалов: ОЦК-, ГЦК- и ГПУ-металлы. Карты разрушения керамических материалов.

Прогнозирование долговечности и ресурса металлоконструкций на основании совместного анализа карт механизмов деформации и разрушения.

Подходы к учету нестабильности микроструктуры на картах механизмов деформации и разрушения металлов, сплавов и керамик.

Фрактография. Классификация видов изломов: скол, квазискол, ямочный рельеф (ямки сдвига и ямки отрыва), сочетание ямок с межзеренным разрушением, гребни отрыва, фасетки межзеренного разрушения, высокотемпературный межзеренный рельеф, усталостные бороздки, смешанный рельеф разрушения. Идентификация механизмов деформации и разрушения с использованием фрактографии. Решение задач по различным разделам темы №5.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Для обеспечения самостоятельной работы обучающихся используются:

Электронные курсы, созданные в системе электронного обучения ННГУ:

Физика металлов, сплавов и керамик, <https://e-learning.unn.ru/course/view.php?id=4960>.

Иные учебно-методические материалы:

1. Чувильдеев В.Н., Нохрин А.В., Пирожникова О.Э., Грязнов М.Ю., Лопатин Ю.Г., Смирнова Е.С. Физика новых материалов – Н.Новгород, изд-во ННГУ, 2010, 105 с.
2. Перевезенцев В.Н., Сарафанов Г.Ф. Фрагментация при пластической деформации металлов. Учебное пособие – Н.Новгород, ННГУ, 2007, 127 с.
3. Перевезенцев В.Н., Щербань М.Ю. Рекристаллизация металлов и сплавов. Учебное пособие – Н.Новгород, ННГУ, 2000, 62 с.
4. Нохрин А.В., Лопатин Ю.Г., Пискунов А.В., Чувильдеев В.Н., Смирнова Е.С. Изучение процессов рекристаллизации при отжиге сильнодеформированных металлов. Практикум - Н.Новгород: ННГУ, 2016, 31 с.
5. Сидорова А.И., Сысоев А.Н. Определение механических свойств металлов. в кн. Физика твердого тела. Лаб. практ. Н.Новгород, 2000, с. 28-50.
6. Чувильдеев В.Н., Дейч И.С., Макаров И.М. Определение электросопротивления металлов и сплавов. в кн. Физика твердого тела. Лаб. практ. Часть 1, Н.Новгород, 2000, с. 67-94.
7. Нохрин А.В., Пискунов А.В., Лопатин Ю.Г., Чувильдеев В.Н., Смирнова Е.С., Перевезенцев В.Н. Изучение процессов рекристаллизации при отжиге сильнодеформированных мелкозернистых металлов – Н.Новгород: ННГУ, 2020, 38 с.
8. Перевезенцев В.Н., Огородников А.Е., Нохрин А.В. Исследование ползучести субмикроструктурных металлов и сплавов методом микроиндентирования – Н.Новгород, ННГУ, 2020, 43 с.
9. Шадрин Я. С., Нохрин А. В., Чувильдеев В. Н., Смирнова Е. С. Изучение процессов распада твердого раствора при отжиге алюминиевых и медных сплавов. Практикум – Н.Новгород, ННГУ, 2022, 42 с.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Допуск к лабораторной работе) для оценки сформированности компетенции ПК-3:

1. Студент демонстрирует понимание целей и задач работы.
2. Имеется соответствие объема выполненной работы минимальным требованиям, установленным в учебном или учебно-методическом пособии).
3. Приемлемое (удовлетворительное) качество и достоверность полученных экспериментальных результатов.
4. Высокий уровень обоснованности полученных выводов (приемлемое качество анализа полученных экспериментальных результатов).
5. Студент демонстрирует умение объяснить полученные результаты с использованием базовых и дополнительных источников, а также знаний, полученных при изучении профильных дисциплин;
6. Студент умеет представить полученные результаты (оформить отчет в соответствии с требованиями, изложенными в учебном или учебно-методическом пособии).

5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Допуск к лабораторной работе) для оценки сформированности компетенции ПК-4:

1. Студент демонстрирует понимание целей и задач работы, а также понимание физических процессов, лежащих в основе рассматриваемых (изучаемых) явлений.
2. Студент демонстрирует высокий уровень обоснованности полученных выводов (приемлемое качество анализа полученных экспериментальных результатов) с использованием знаний, полученных в рамках дисциплины "Физика металлов, сплавов и керамик" (основ теории рекристаллизации, фазовых превращений, теории дефектов и др.).
3. Студент демонстрирует умение объяснить полученные результаты с использованием базовых и дополнительных источников.

Критерии оценивания (оценочное средство - Допуск к лабораторной работе)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	При ответах на контрольные вопросы (при сдаче допуска к лабораторной работе) студент демонстрирует минимальное знание основного материала, наличие минимально необходимого множества навыков, незначительное понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, а также отвечает более чем на половину поставленных вопросов.

Оценка	Критерии оценивания
	Студент демонстрирует минимально необходимое понимание физических принципов работы оборудования, может описать процедуру выполнения лабораторной работы, а также процедуру анализа экспериментальных результатов. Прошел аттестацию по технике безопасности.
не зачтено	При ответах на контрольные вопросы (при сдаче допуска к лабораторной работе) студент демонстрирует незнание большей части основного материала, непонимание смысла большинства решаемых проблем, не демонстрирует достаточно полное владение терминологией, а также отсутствуют один или несколько навыков, предусмотренных данной компетенцией. Студент не демонстрирует минимально необходимого понимания физических принципов работы оборудования, не может описать процедуру выполнения лабораторной работы, а также процедуру анализа экспериментальных результатов. Не прошел аттестацию по технике безопасности.

5.1.3 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-3:

1. Что такое прочность? Какие характеристики прочности Вы знаете? С какими прочностными характеристиками коррелирует микротвердость и почему? Между какими физическими величинами допускается строить корреляции?
2. Как определить характер процесса рекристаллизации (первичная, собирательная) на основании результатов металлографического исследования?
3. Как рассчитать микротвердость металла на основании измерения диагонали отпечатка?
4. Каковы границы применимости метода микротвердости? В чем состоят физические основы этого метода?
5. В чем состоят физические основы метода металлографического исследования дефектной структуры металлов с использованием оптического (интерференционного) микроскопа?
6. Как сосчитать средний размер зерна с использованием правила секущих? Какие еще методы определения среднего размера зерна существуют? Почему в ГОСТах для классификации зеренной структуры введена «балльная» шкала?
7. Опишите процедуру расчета погрешностей при определении объемной доли рекристаллизованной структуры металлографическим методом.
8. Опишите процедуру расчета погрешностей при определении энергии активации первичной рекристаллизации.
9. Опишите процедуру расчета погрешностей при измерении микротвердости.
10. Опишите процедуру расчета погрешностей при измерении удельного электросопротивления вихретоковым методом.
11. Опишите процедуру теоретического расчета максимальной объемной доли выделившихся частиц на основании данных о химическом составе сплава (в вес.%) и данных о стехиометрическом составе выделяющихся частиц.
12. Опишите процедуру расчета объемной доли выделившихся частиц на основании данных измерения удельного электросопротивления.
13. Опишите процедуру определения механизма выделения частиц второй фазы на основании анализа данных измерения удельного электросопротивления.

14. Опишите процедуру расчета зависимости среднего размера выделяющихся частиц второй фазы от температуры и времени отжига на основании совместного анализа данных по измерению электропроводности и микротвердости.
15. Опишите процедуру определения механизма роста частиц второй фазы на основании совместного анализа данных по измерению электропроводности и микротвердости.
16. Опишите процедуру определения среднего размера выделившихся частиц второй фазы на основании результатов измерения удельного электросопротивления и результатов металлографического исследования.
17. Опишите процедуру анализа экспериментальных данных по измерению удельного электросопротивления и микротвердости в том случае, если в процессе отжига имеет место выделение (или рост) частиц второй фазы контролируемый одновременно двумя различными механизмами.

5.1.4 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-4:

1. Дайте определение терминам «Эвтектика», «Эвтектоид» и «Перитектика».
2. Почему энергия активации не зависит от температуры нагрева? Обоснуйте свой ответ с точки зрения физики металлов.
3. Объясните физический смысл уравнения Аррениуса для характерного времени диффузионного массопереноса.
4. В чем состоит принципиальное отличие диффузии в металлах и в керамиках?
5. Как дефекты влияют на интенсивность диффузионных процессов и почему? Обоснуйте свой ответ с точки зрения физики конденсированного состояния.
6. Какие основные факторы влияют на интенсивность диффузионного массопереноса?
7. Как гидростатическое и одноосное давление влияют на коэффициент зернограничной и объемной диффузии?
8. Чем объясняются высокие электро- и теплопроводность металлов? Почему в металлах коррелируют электро- и теплопроводность?
9. Почему при нагреве электропроводность металлов уменьшается, а керамик – увеличивается?
10. Почему электропроводность металлов уменьшается при внесении дефектов? Объясните физический смысл правила Матиссена.
11. Почему частицы второй фазы дают ничтожно малый вклад в повышение электросопротивления по сравнению с вкладом твердого раствора?
12. От чего зависит масштаб повышения удельного электросопротивления сплава при его легировании?
13. С чем связана высокая пластичность металлов по сравнению с керамиками?
14. Объясните причину проявления полиморфизма в металлах при нагревании.
15. Обоснуйте с точки зрения физики, почему при нагреве плотность дефектов должна уменьшаться.
16. Дайте определение «когерентной» и «некогерентной» частицы второй фазы. Как можно отличить одни частицы от других с использованием современных методов структурных исследований? Что такое дисперсное и дисперсионное упрочнение?
17. Объясните, с чем, с точки зрения физики конденсированного состояния связано наличие минимального критического (устойчивого) размера частиц второй фазы? Объясните, почему размер частицы второй фазы не может быть равен объему элементарной ячейки.
18. Запишите уравнение коалесценции частиц второй фазы. С точки зрения физики металлов обоснуйте почему более крупные частицы второй фазы растут за счет «поглощения» более мелких. Что является движущей силой процесса коалесценции?

19. Как сосчитать плотность дислокаций в случае хаотического распределения? Как сосчитать плотность дислокаций в случае образования субструктуры?
20. Опишите процедуру теоретического расчета максимальной объемной доли выделившихся частиц на основании данных о химическом составе сплава (в вес.%) и данных о стехиометрическом составе выделяющихся частиц.

Критерии оценивания (оценочное средство - Собеседование)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	При ответах на контрольные вопросы (при собеседовании) студент демонстрирует минимальное знание основного материала, наличие минимально необходимого множества навыков, незначительное понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, а также отвечает более чем на половину поставленных вопросов.
не зачтено	При ответах на контрольные вопросы (при собеседовании) студент демонстрирует незнание большей части основного материала, непонимание смысла большинства решаемых проблем, не демонстрирует достаточно полное владение терминологией, а также отсутствуют один или несколько навыков, предусмотренных данной компетенцией.

5.1.5 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-3:

1. Выведите формулу для расчета величины предэкспоненциального множителя в выражении для коэффициента диффузии по кристаллической решетке.
2. Дайте определение и опишите физический смысл энергии активации в уравнении для коэффициента диффузии по кристаллической решетке.
3. Выведите формулу для расчета критического (устойчивого) размера частицы (зародыша), выделяющегося при распаде твердого раствора.
4. Дайте определение модуля сдвига и опишите его физический смысл.
5. Дайте определение модуля нормальной упругости (модуля Юнга) и опишите его физический смысл.
6. Выведите формулу для скорости пластической деформации в случае скольжения решеточной дислокации в поле равномерно расположенных точечных препятствий.
7. Запишите второй закон Фика и дайте его физическое объяснение.
8. Запишите правило Матиссена и дайте его физическое объяснение.
9. Опишите принципы классификации дефектов кристаллической решетки.
10. Дайте классификацию дефектов кристаллической решетки с точки зрения их геометрии, энергии, полей внутренних напряжений и подвижности.
11. Опишите основные физические эффекты (явления, процессы), возникающие при взаимодействии точечных (нульмерных) дефектов друг с другом, или эффекты (явления, процессы) особенности которых зависят от характера этого взаимодействия.
12. Опишите основные физические эффекты (явления, процессы), возникающие при взаимодействии точечных дефектов (нульмерных) с линейными дефектами (винтовыми и краевыми дислокациями), или эффекты (явления, процессы) особенности которых зависят от характера этого взаимодействия.

13. Опишите основные физические эффекты (явления, процессы), возникающие при взаимодействии точечных дефектов в двумерными (плоскими) дефектами (границы зерен), или эффекты (явления, процессы) особенности которых зависят от характера этого взаимодействия.
14. Опишите основные физические эффекты (явления, процессы), возникающие при взаимодействии точечных дефектов в объемными дефектами (поры, трещины), или эффекты (явления, процессы) особенности которых зависят от характера этого взаимодействия.
15. Опишите основные физические эффекты (явления, процессы), возникающие при взаимодействии линейных дефектов (дислокаций) друг с другом, или эффекты (явления, процессы) особенности которых зависят от характера этого взаимодействия.
16. Опишите основные физические эффекты (явления, процессы), возникающие при взаимодействии линейных дефектов (дислокации) с двумерными (плоскими) дефектами (границы зерен), или эффекты (явления, процессы) особенности которых зависят от характера этого взаимодействия.
17. Опишите основные физические эффекты (явления, процессы), возникающие при взаимодействии линейных дефектов (дислокации) с объемными дефектами (поры, трещины) или эффекты (явления, процессы) особенности которых зависят от характера этого взаимодействия.
18. Опишите основные физические эффекты (явления, процессы), возникающие при взаимодействии объемных дефектов (поры, трещины) друг с другом, или эффекты (явления, процессы) особенности которых зависят от характера этого взаимодействия.

5.1.6 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-4:

1. Рассчитайте плотность упаковки ОЦК и ГЦК-фаз железа. На основании расчетов объясните причины различной растворимости углерода в ОЦК и ГЦК-фазах железа.
2. Химический состав сплава Al-4.2 вес.%Cu. Определите содержание меди в атомных процентах.
3. Сколько необходимо использовать меди и алюминия, чтобы изготовить 100 г сплава Al-3ат.%Cu?
4. Считая, что выделения частиц Fe₃C в железе имеют идеальную сферическую форму радиусом 10 нм, определите число частиц цементита в единице объема сплава Fe-0.4 вес. %.
5. Рассчитайте величину коэффициента зернограницной диффузии в меди, если известно, что характерный масштаб диффузионного массопереноса сопоставим с размером зерна в меди (10 мкм), а характерное время диффузионного массопереноса составило $t_{dif}=10$ с, а также определить температуру, при которой происходило измерение величины коэффициента зернограницной диффузии (при расчетах принять величину предэкспоненциального множителя равной $D_0=5 \times 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$, температура плавления $T_m=1356 \text{ К}$, вектор Бюргера $b=0.256 \text{ нм}$).
6. На поверхность чистого железа был напылён слой графита, после чего полученный образец подвергли отжигу при температуре 500 °С в течение 1 ч. После энергодисперсионного анализа было установлено, что углерод продиффундировал по границам зерен на глубину 150 мкм, а по объему кристаллической решетки – на 20 мкм.

Определите величину коэффициента объемной и зернограницной диффузии углерода в железе. Определите энергию активации объемной и зернограницной диффузии углерода в железе. (при расчетах принять: температура плавления $T_m=1810$ К, предэкспоненциальный множитель для коэффициента объемной диффузии $D_v0 = 2 \times 10^{-4}$ м²/с, предэкспоненциальный множитель для коэффициента зернограницной диффузии $dD_b0 = 1.1 \times 10^{-12}$ м³/с, вектор Бюргерса $b=0.248$ нм).

7. Образец сплава Fe-C толщиной 2 мм, содержащий 2.14 вес.% углерода, подвергали отжигу при фиксированной температуре в течение 40 ч, после чего с использованием методов анализа химического состава было обнаружено, что концентрация углерода уменьшилась до 1.5 вес.%. Вычислите коэффициент диффузии углерода и температуру при которой происходил процесс.
8. Образец сплава Fe-C, содержащий 1.4 вес.% углерода (сталь У14), подвергали отжигу при фиксированной температуре в течение 20 ч, в результате чего он потерял 0.4 вес.%. Вычислите коэффициент диффузии углерода и его концентрацию на глубине 50 мкм от поверхности, если диффузия происходит перпендикулярно поверхности (100 мм³), а концентрация углерода на поверхности образца равна нулю. (При расчетах принять плотность чистого железа равной 7.8 г/см³).
9. Образец сплава «железо – углерод» с начальным содержанием углерода 0.8 вес.% (сталь У8), имеющего форму квадрата и площадь каждой из сторон 20 см³, подвергают отжигу. Рассчитайте количество (в граммах) испарившего с поверхности образца углерода, если его коэффициент диффузии в железе составляет $D_v=10^{-7}$ см²/с, а плотность железа равна 7.8 г/см³).
10. Был проведен отжиг в течение 16 ч диффузионной пары, состоящей из чистого гамма-железа и твердого раствора углерода в железе с постоянной начальной концентрацией $C_0=1.2$ вес.% (сталь У12) при нескольких температурах, после чего было измерено расстояние x от поверхности раздела (Fe – сталь У12), на котором концентрация углерода составляла 30% от первоначального значения C_0 . Это расстояние составило 0.125 мм при температуре 800 °С, 0.156 мм при температуре 850 °С и 0.321 мм при температуре 1000 °С. Полагая, что коэффициент диффузии не зависит от концентрации, найдите значения коэффициентов диффузии для всех температур, вычислите значения предэкспоненциального множителя D_0 и энергии активации диффузии углерода Q .
11. Образец стали 20 (Fe-0.2 вес.%C) подвергали науглероживанию при температуре 950 °С, после чего с использованием метода энергодисперсионного микроанализа определили, что концентрация углерода после отжига (науглероживания) в течение времени t_1 составляет 0.45% на глубине 0.05 см. Концентрация углерода на поверхности образца в процессе отжига (науглероживания) поддерживалась постоянной и составляла 1 вес.% при всех временах отжига. Рассчитайте время науглероживания t_1 и время, в течение которого средняя концентрация углерода в образце толщиной 1 см при той же температуре увеличится в 3 раза по сравнению с исходной. (При расчетах коэффициент диффузии углерода в стали принять равным $D_0 = 0.15$ [см²/с], энергия активации $Q=6$ кТм, температура плавления $T_m=1810$ К).

12. На поверхность пластинки меди толщиной 0.2 мм нанесли слой серебра и подвергли получившуюся диффузионную пару отжигу при температуре 700 °С (20 ч). Полагая, что коэффициент диффузии не зависит от концентрации, $D_v = 2 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $Q_v = 197 \text{ кДж/моль}$, рассчитайте, какая должна быть толщина слоя серебра, чтобы концентрация этого металла составляла 1.5 вес.% на расстоянии 50 мкм от первоначальной поверхности контакта.
13. Сто шариков, расположенных вдоль одной линии, могут перескакивать только в перпендикулярном к ней направлении. Длина каждого скачка составляет 0.25 см. Через 12 часов измерено расстояние каждого шарика от линии. Сумма квадратов расстояний, деленная на 100, составила 90 см². Вычислите частоту скачков и коэффициент диффузии шариков.
14. Вычислите температуру, при которой атомы меди при самодиффузии совершают один скачок в секунду. При расчетах параметр решетки меди принять равным 0.36 нм. Сделайте такой же расчет для атомов ОЦК молибдена (период решетки 0.315 нм) и для атомов углерода, диффундирующего по октаэдрическим пустотам в ОЦК решетке железа (период решетки 0.29 нм). Укажите параметры, которые Вам необходимы для расчета.
15. Чистое железо науглероживают из газовой фазы при температуре 1000 °С. В газовой фазе происходит реакция $\text{CH}_4 = 2\text{H}_2 + \text{C}$. Рассмотрите два случая: константа скорости реакции составляет $k = 10^{-6} \text{ см/с}$ и 10^{-4} см/с . При расчетах примите, что коэффициент диффузии не зависит от концентрации и составляет $D = 4 \times 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$. Растворимость углерода в гамма-железе при температуре 1000 °С принять равной 1.4 вес.%. Рассчитайте количество углерода, проникшего в образец железа через 1 мин, 20 мин, 1 час и 100 часов после начала процесса науглероживания. (Примечание: второе уравнение Фика надо решать при начальном условии $C(x, 0) = C_0$, граничном ($x=0$): $dC/dx = -h \times (C_1 - C)$, где $h = k/D$).
16. При изучении эффект Киркендалла в сплаве «медь – серебро» в процессе отжига 900 °С (100 ч) сдвиг фронта диффузии в обе стороны составил 50 мкм. Коэффициент взаимной диффузии составляет $5 \times 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$. Рассчитайте собственные коэффициенты диффузии меди и серебра.
17. Найдите зависимость свободной поверхностной энергии межфазных границ от радиуса сферических частиц второй фазы, объемная доля которых составляет 5%. При расчетах удельную поверхностную энергию межфазной границы принять равной 0.5 Дж/м².
18. Определите энергию активации образования зародыша для гомогенного зарождения при температуре 500 °С, считая, что скорость зародышеобразования при данной температуре составляет $10^7 \text{ м}^3/\text{с}$.
19. Через $t_1 = 10$ мин после нагрева металла объемная доля выделившихся частиц второй фазы составляет 20%. Сколько времени потребуется для фазового превращения при постоянной скорости зародышеобразования, чтобы объемная доля новой фазы составила 80%? Сколько времени потребуется для завершения фазового превращения? Насколько изменится результат, если в металле все имеющиеся зародыши новой фазы начнут расти

с момента начала фазового превращения? (При расчетах скорость роста принять постоянной).

20. Рассчитайте за сколько времени полностью прогреются образцы железа и меди, изготовленные в форме плоской пластины 5'10'100 мм при температуре 500 °C? Какие данные Вам необходимы для расчета?

21. Во сколько раз концентрация вакансий в алюминии при 600 оC больше, чем при 300 °C?

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	При ответах на контрольные вопросы (при собеседовании) студент демонстрирует минимальное знание используемой приборной базы, физического оборудования и применяемых информационных технологий, наличие минимально необходимых практических навыков работы с оборудованием, минимально необходимое понимание сущности процессов и явлений, лежащих в основе используемых приборов, а также отвечает более чем на половину поставленных вопросов.
не зачтено	При ответах на контрольные вопросы (при собеседовании) студент не демонстрирует минимальное знание используемой приборной базы, физического оборудования и применяемых информационных технологий, отсутствует минимально необходимые практические навыки работы с оборудованием, отсутствует минимально необходимое понимание сущности процессов и явлений, лежащих в основе используемых приборов. Студент не отвечает более чем на половину поставленных вопросов.

5.1.7 Типовые задания (оценочное средство - Тест) для оценки сформированности компетенции ПК-3:

Типовые вопросы для теста по данной компетенции:

1. Выберите правильный вариант построения графика для определения величины энергии активации (Q) процесса диффузии по углу его наклона
2. Выберите правильное определение термина "Предел макроупругости"
3. Выберите правильное определение термина "Условный предел текучести"
4. Выберите правильное определение термина "Предел прочности"
5. Что характеризует величина предела макроупругости?
6. Что характеризует величина предела текучести?
7. В каком интервале напряжений происходит процесс микропластической деформации?
8. Как определить критическую степень деформации ϵ_1 при первичной рекристаллизации?
9. Дайте правильное определение термину "Температура рекристаллизации"
10. Как изменяется средний размер рекристаллизованного зерна (в условиях первичной рекристаллизации) при увеличении степени предварительной деформации?
11. Как изменяется объемная доля рекристаллизованного материала (в условиях первичной рекристаллизации) в при увеличении степени предварительной деформации?
12. Как изменяется температура рекристаллизации с увеличением степени предварительной деформации?

13. Выберите правильный вариант записи формулы Зинера для расчета влияния частиц второй фазы на стабильный размер рекристаллизованного зерна.
14. Выберите правильный вариант записи формулы для расчета вклада дислокаций в предел текучести
15. Выберите правильный вариант записи формулы для расчета вклада когерентных частиц второй фазы в предел текучести
16. Выберите правильный вариант записи формулы для расчета вклада некогерентных частиц второй фазы в предел текучести (формула Орована)
17. Выберите правильный вариант записи формулы для расчета вклада легирующих элементов в предел текучести (в случае равномерного распределения легирующих элементов).
18. Выберите правильный вариант записи уравнения Холла-Петча
19. Выберите правильный вариант записи уравнения, описывающее зависимость размера зерна в чистых металлах от времени отжига в условиях собирательной рекристаллизации.

5.1.8 Типовые задания (оценочное средство - Тест) для оценки сформированности компетенции ПК-4:

Типовые вопросы для теста по данной компетенции:

1. Выберите правильный вариант определения "Механизм диффузии по Шотки"
2. Выберите правильный вариант представления (записи) физического смысла предэкспоненциального множителя D_0 в уравнении для зависимости коэффициента диффузии от температуры $D = D_0 \exp(-Q/kT)$.
3. Как обычно влияет повышение гидростатического давления на процессы диффузии?
4. Выберите правильный вариант определения "Зернограничная сегрегация"
5. Как с увеличением плотности дефектов в границе зерна изменяется величина коэффициента зернограничной диффузии?
6. Является ли процесс полигонизации одним из вариантов процесса рекристаллизации?
7. Выберите правильный вариант формулы для расчета коэффициента зернограничной диффузии
8. Выберите правильный вариант уравнения, описывающего зависимость скорости внутризеренной деформации от величины приложенного напряжения и температуры.
9. Выберите правильный вариант соотношения между энергией активации самодиффузии в кристаллической решетке (Q_v) и в границе зерна (Q_b) (для металлов)
10. Выберите правильный вариант записи формулы для расчета числа дислокаций в плоском скоплении (в случае отсутствия дальнедействующих полей внутренних напряжений от границ зерен).
11. Выберите правильный вариант формулы для расчета скорости миграции границ зерен V_m (M_b – подвижность границ зерен, P – движущая сила миграции границ зерен)
12. Выберите правильный вариант записи уравнения для расчета миграционной подвижности большеугловых (неспециальных) границ зерен
13. Выберите правильный вариант записи уравнения для расчета движущей силы первичной рекристаллизации (Dg - изменение плотности решеточных дислокаций до и после рекристаллизационного отжига)
14. Выберите правильный вариант записи уравнения для расчета движущей силы собирательной рекристаллизации (g_b – энергия границы зерна, k - коэффициент)
15. Выберите правильный вариант записи уравнения, описывающего зависимость объема рекристаллизованного материала X от степени предварительной деформации e
16. Выберите правильный вариант записи первого закона Фика (J – плотность потока вещества, C – концентрация вещества)
17. Выберите правильный вариант записи второго закона Фика (уравнение диффузии)
18. Выберите правильный вариант записи уравнения Аррениуса (T_m – температура плавления)

19. Выберите правильный вариант уравнения, описывающего связь величины коэффициента зернограницной диффузии и величины избыточного свободного объема D_a (где b - численный коэффициент).
20. Выберите правильный вариант термина "Дислокация ориентационного несоответствия"
21. Выберите правильный вариант термина "Вектор Бюргерса"
22. Выберите правильный вариант определения "Рекристаллизация"
23. Выберите правильный вариант определения "Первичная рекристаллизация"
24. Чем характеризуется собирательная рекристаллизация (нормальный рост зерен)?
25. Укажите основной механизм собирательной рекристаллизации
26. Дайте правильный вариант определения "Относительный свободный объем (границы зерна)"
27. Укажите основной механизм первичной рекристаллизации
28. Дайте правильный вариант термина (определения) "Плоскость легкого скольжения дислокации"
29. Что является отличительной особенностью некогерентной частицы второй фазы (по сравнению с когерентной частицей)?
30. Выберите правильный вариант термина "Атмосфера Коттрелла"
31. Что является причиной образования атмосферы Судзуки?
32. На какой модели теории дислокаций основано уравнение Холла-Петча?
33. Что описывает вклад Пайрелса-Набарро?
34. Как дислокации взаимодействуют с когерентными частицами второй фазы?
35. Выберите правильный вариант термина "Дисперсионное упрочнение"
36. Выберите правильный вариант термина "Специальные границы зерен"

Критерии оценивания (оценочное средство - Тест)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Набрано более 50% правильных ответов
не зачтено	Набрано менее 50% правильных ответов

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.

	обучающегося от ответа			негрубых ошибок	несущественных ошибок		
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-3

Задача 1: В процессе рекристаллизационного отжига сильнодеформированного мелкозернистого сплава Al-0.3вес.%Sc (размер зерна 0.2 мкм) выделяются когерентные частицы – интерметаллиды Al_3Sc со средним размером частиц 15 нм. Объемная доля выделившихся частиц составляет 0.8%.

Рассчитайте средний размер стабильного зерна в сплаве, а также насколько увеличится предел макроупругости сплава в процессе распада твердого раствора.

Задача 2: В процессе распада твердого раствора в сплаве Al-0.15ат.%Zr, сопровождающегося выделением некогерентных частиц Al_3Zr , величина удельного электросопротивления сплава уменьшилась на 0.6 мкОм×см. При этом величина предела макроупругости увеличилась от 20 МПа до 100 МПа.

Рассчитайте объемную долю и средний размер выделившихся частиц Al_3Zr .

(При расчетах принять: модуль сдвига $G=25.4$ ГПа, вектор Бюргерса $b=0.285$ нм, вклад циркония в удельное электросопротивление алюминия – 5.85 мкОм×см/ат.%. Полному распаду твердого раствора циркония в алюминии соответствует выделение 1об.% частиц Al_3Zr . Удельное электросопротивление чистого алюминия составляет 2.7 мкОм×см).

Задача 3. В процессе деформации закаленной стали 10Г2Ф, содержащей 0.1% углерода и 1.5% марганца в твердом растворе, а также некогерентные частицы карбида ванадия (размер частиц 10 нм, объемная доля частиц 0.5%), была сформирована зеренная структура со средним размером зерна 5 мкм. Плотность решеточных дислокаций составила 10^{12} м^{-2} .

Рассчитайте величину предела макроупругости и предела текучести стали.

5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-4

Задача 4. В процессе отжига мелкозернистой (средний размер зерна 5 мкм) закаленной стали 10Г2Ф, содержащей 0.1% углерода и 1.5% марганца в твердом растворе, а также некогерентные частицы карбида ванадия (размер частиц 10 нм, объемная доля частиц 0.5%) величина предела макроупругости уменьшилась на 150 МПа (от 650 МПа до 450 МПа), а величина предела текучести – на 400 МПа (от 1000 МПа до 600 МПа).

Определите насколько уменьшилась концентрация углерода в твердом растворе и насколько увеличился средний размер зерна стали в процессе отжига.

При расчетах принять, что концентрация марганца в твердом растворе остается неизменной.

(модуль сдвига стали $G=64$ ГПа, вектор Бюргерса $b=0.248$ нм, температура плавления $T_m=1810$ К, коэффициент твердорастворного упрочнения феррита углеродом $K_C=4680$ МПа×%, коэффициент твердорастворного упрочнения феррита марганцем $K_{Mn}=33$ МПа×%, коэффициент Холла-Петча $K=0.5$ МПа×м^{1/2}).

Задача 5. В чистом железе при увеличении напряжения от 250 МПа до 350 МПа (при комнатной температуре) скорость пластической деформации увеличивается от $3 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ до $6 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$.

Определить энергию активации пластической деформации (свободную энергию преодоления препятствий) в предположении, что скорость пластической деформации лимитируется скоростью движения решеточной дислокации в поле равномерно расположенных точечных препятствий.

(При расчетах принять: модуль сдвига $G=64 \text{ ГПа}$, температура плавления $T_m=1810 \text{ К}$, предэкспоненциальный множитель в уравнении для скорости деформации 10^6 с^{-1} , пороговое напряжение течения при $T=0\text{К}$ - $s^*=1.7 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$).

Задача 6. Пластическая деформация, сопровождающаяся измельчением зеренной структуры железа, привела к повышению скорости пластической деформации при температуре $600 \text{ }^\circ\text{C}$, соответствующей стадии ползучести по Коблу, от $6 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ до $9 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ при напряжении 500 МПа.

Определите во сколько раз уменьшился средний размер зерна железа (начальный размер зерна железа до пластической деформации составлял 300 мкм).

(При расчетах принять: модуль сдвига $G=64 \text{ ГПа}$, температура плавления $T_m=1810 \text{ К}$, предэкспоненциальный множитель в уравнении для скорости деформации 10^6 с^{-1} , пороговое напряжение течения при $T=0\text{К}$ - $s^*=1.7 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$).

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Задача решена с негрубыми ошибками (правильный ответ может быть получен после подсказки преподавателя)
не зачтено	Задача не решена, студент не может получить правильный ответ даже после подсказки преподавателя

5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-3

Типичные задачи (задания) для промежуточного контроля успеваемости по данной компетенции (на экзамене):

Задача 1. При испытаниях на ползучесть образцов высокочистого мелкозернистого алюминия при температурах, соответствующих интервалу дислокационного скольжения в поле равномерно распределенных точечных препятствий, и напряжении течения $s_s = 250 \text{ МПа}$ было обнаружено, скорость пластического роста поры с начальным размером 0.1 мкм составляет $\sim 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. *Определите температуру при которой осуществлялось испытание на ползучесть.* (При расчетах принять: Свободная энергия преодоления препятствий $DF=0.5 \text{ Гб}^3$, температура плавления $T_m=660 \text{ }^\circ\text{C}$, предэкспоненциальный множитель $=10^6 \text{ с}^{-1}$, напряжение течения при 0 К составляет $t/G=7.2 \times 10^{-3}$, коэффициент однородности пластического течения $f=10^{-3}$).

Задача 2. В условиях первичной рекристаллизации, в процессе отжига при температуре 150 °С, при увеличении времени отжига от 5 мин до 35 мин, объемная доля рекристаллизованной структуры в сильнодеформированной меди (степень предварительной деформации 80%) увеличилась от 15% до 85%. При температуре отжига 450 °С в аналогичных условиях объемная доля рекристаллизованной структуры увеличилась от 25% до 95%. *Рассчитайте энергию активации первичной рекристаллизации.* (При расчетах принять: температура плавления меди $T_m=1356$ К).

Задача 3. В процессе отжига закаленной стали 30ХГСА, содержащей 0.29 вес.%С, 1.7 вес.% Mn и 0.3вес.%Si в твердом растворе, приводящего к выделению некогерентных частиц карбида Fe_3C (средний размер частиц 50 нм), величина предела макроупругости уменьшилась от 1100 МПа до 850 МПа. *Определите насколько уменьшилась концентрация углерода в твердом растворе и какова была объемная доля выделившихся частиц цементита.* При расчетах принять, что концентрация марганца и кремния в твердом растворе остается неизменной, а предел растворимости углерода в железе составил 0.15вес.% (При расчетах принять: модуль сдвига стали $G=64$ ГПа, вектор Бюргерса $b=0.248$ нм, коэффициент твердорастворного упрочнения феррита углеродом $K_C=4680$ МПа×%).

5.3.4 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-4

Типичные задачи (задания) для промежуточного контроля успеваемости по данной компетенции (на экзамене):

Задача 1. При испытаниях на ползучесть образцов высокочистого мелкозернистого алюминия было обнаружено, что одновременно с развитием ползучести по Коблу имеет место процесс рекристаллизации, приводящий к увеличению среднего размера зерна от 0.5 мкм до 2.4 мкм. Испытания проводились при температуре $0.4T_m$ ($T_m=660$ °С) и напряжении $s_s = 300$ МПа. *Определите насколько уменьшилась скорость ползучести в мелкозернистом алюминии в процессе рекристаллизации.* (При расчетах принять: Модуль сдвига $G=25.4$ ГПа, вектор Бюргерса $b=0.286$ нм, величина предэкспоненциального множителя $dD_{b0}=5 \times 10^{-14}$ м³/с, величина $GW/kT_m=32$).

Задача 2. *Рассчитайте время инкубационного периода начала рекристаллизации* сильнодеформированного мелкозернистого алюминия с начальным размером зерна 1 мкм при температуре отжига 150 °С. (При расчетах принять: величина $GW/kT_m=32$, температура плавления $T_m=933$ К, начальная мощность стыковых дисклинаций $w_0=10^{-2}$, критическая мощность стыковых дисклинаций $w^*=10^{-3}$, константа $A_1=10$, вектор Бюргерса $b=0.286$ нм, предэкспоненциальный множитель коэффициента зернограницной диффузии $dD_{b0}=5 \times 10^{-14}$ м³/с, энергия активации $Q_b=10.8$ кТ_м).

Задача 3. В процессе деформации закаленной стали 10Г2ФБЮ, содержащей 0.08 вес.% углерода, 1.8 вес.% марганца и 0.35вес.% кремния в твердом растворе, а также когерентные частицы карбида ниобия (средний размер частиц 15 нм, объемная доля частиц 0.1%), была сформирована зеренная структура со средним размером зерна 5 мкм. Плотность решеточных дислокаций 10^{12} м⁻². *Рассчитайте величину предела макроупругости и предела текучести стали.* При расчетах принять, что концентрация марганца и кремния в твердом растворе остается неизменной. (При расчетах принять: Модуль сдвига стали $G=64$ ГПа, вектор Бюргерса $b=0.248$ нм, коэффициент твердорастворного упрочнения феррита углеродом $K_C=4680$ МПа/%, коэффициент твердорастворного упрочнения феррита марганцем $K_{Mn}=33$ МПа/%,

коэффициент твердорастворного упрочнения феррита кремнием $K_{Si}=27 \text{ МПа}/\%$, коэффициент Холла-Петча $K=0.3 \text{ МПа}\times\text{м}^{1/2}$).

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Студент самостоятельно решает задачу, отвечает полностью на вопросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу и творческое мышление.
отлично	Студент самостоятельно решает задачу в рамках изученных алгоритмов и подходов, правильный ответ получен.
очень хорошо	Студент самостоятельно решает задачу с небольшими неточностями (присутствуют незначительные ошибки в ходе решения, которые не повлияли на итоговый успешный результат)
хорошо	Студент решает успешно задачу с наводящими вопросами преподавателя (правильный ответ получен только после наводящих вопросов преподавателя)
удовлетворительно	Студент может решить типовую задачу с помощью преподавателя
неудовлетворительно	Задача не решена (правильный ответ не получен).
плохо	Задача не решена или студент отказался решать задачу

5.3.5 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-3

1. Процедура определения энергии активации первичной рекристаллизации с помощью уравнения Авраами (зависимости объемной доли рекристаллизованной структуры от температуры и времени отжига).
2. Процедура определения энергии активации собирательной рекристаллизации на основании анализа экспериментальных результатов (зависимости среднего размера зерна от температуры и времени отжига).
3. Формула для расчета температуры начала рекристаллизации сильнодеформированного металла.
4. Процедура измерения и физический смысл величины микротвердости.
5. Корреляция между величиной микротвердости и пределом текучести сильнодеформированного металла.
6. Влияние частиц второй фазы на миграционную подвижность границ зерен. Уравнение Зинера.
7. Влияние когерентных и некогерентных частиц второй фазы на предел текучести металла. Уравнение Орована
8. Влияние плотности дислокаций (в случае хаотического распределения) на предел текучести металла.
9. Влияние размера зерна на предел текучести сильнодеформированного металла. Уравнение Холла-Петча

10. Влияние дефектов на электросопротивление металлов и сплавов. Правило Матиссенна.
11. Влияние распада твердого раствора на изменение удельного электросопротивления при отжиге.
12. Процедура определения объемной доли выделившихся частиц второй фазы на основании анализа данных по измерению удельного электросопротивления.
13. Процедура определения механизма распада твердого раствора на основании анализа данных по измерению удельного электросопротивления с использованием уравнения Джонсона-Мела-Аврами-Колмогорова.
14. Процедура расчета размера выделяющихся частиц второй фазы на основании совместного анализа данных по изменению микротвердости и удельного электросопротивления при отжиге металла.
15. Определение механизма роста частиц второй фазы на основании анализа кинетики роста частиц.
16. Определение среднего размера выделившихся частиц второй фазы на основании данных по металлографии (росту зерен) с использованием уравнения Зинера.

5.3.6 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-4

1. Диффузия (определение). Само- и гетеродиффузия. Энергия активации диффузии и ее физический смысл.
2. Механизмы объемной диффузии с участием точечных дефектов. Основные закономерности объемной диффузии. Закон Фика. Влияние различных факторов на интенсивность процессов диффузии.
3. Механизмы зернограницной диффузии. Основные закономерности зернограницной диффузии. Влияние различных факторов на интенсивность процессов зернограницной диффузии.
4. Зернограницные сегрегации. Физический смысл коэффициента распределения примесей. Влияние легирующих элементов на коэффициент зернограницной диффузии.
5. Возврат и рекристаллизация. Полигонизация как один из механизмов возврата.
6. Первичная рекристаллизация. Основные закономерности и движущая сила первичной рекристаллизации.
7. Собирательная рекристаллизация. Основные закономерности и движущая сила собирательной рекристаллизации (нормального роста зерен).
8. Влияние легирующих элементов на температуру начала рекристаллизации сильнодеформированного металла.
9. Когерентные и некогерентные частицы второй фазы. Основные отличия.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	При ответах на контрольные вопросы студент демонстрирует минимальное знание используемой приборной базы, физического оборудования и применяемых информационных технологий, наличие минимально необходимых практических навыков работы с оборудованием, минимально необходимое понимание сущности процессов и явлений, лежащих в основе используемых приборов, а также отвечает более чем на половину поставленных вопросов.

Оценка	Критерии оценивания
не зачтено	При ответах на контрольные вопросы студент не демонстрирует минимальное знание используемой приборной базы, физического оборудования и применяемых информационных технологий, отсутствует минимально необходимые практические навыки работы с оборудованием, отсутствует минимально необходимое понимание сущности процессов и явлений, лежащих в основе используемых приборов. Студент не отвечает более чем на половину поставленных вопросов.

5.3.7 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-3

1. Зернограничные сегрегации. Влияние легирующих элементов на коэффициент зернограничной диффузии при комнатной и повышенной температурах. Влияние легирующих элементов на температуру начала рекристаллизации.
2. Первичная рекристаллизация. Механизмы первичной рекристаллизации. Основные закономерности и движущая сила первичной рекристаллизации. Уравнение Аврами для описания кинетики первичной рекристаллизации.
3. Собирательная рекристаллизация. Механизм собирательной рекристаллизации. Основные закономерности и движущая сила собирательной рекристаллизации (нормального роста зерен). Уравнение роста зерен в условиях собирательной рекристаллизации.
4. Влияние частиц второй фазы на миграционную подвижность границ зерен. Уравнение Зинера.
5. Испытаний (испытания на растяжение, твердость, усталость, ползучесть). Физические процессы, лежащие в основе методов механических испытаний.
6. Особые точки на зависимости «деформация – разрушение». Предел макроупругости. Предел текучести. Предел прочности. Твердость. Корреляция между этими величинами.
7. Особенности пластической деформации и разрушения керамик. Карты деформации и разрушения керамик.
8. Влияние размера зерна и структурно-фазового состояния границ зерен на предел текучести металлов и сплавов. Соотношение Холла-Петча.
9. Дисперсное и дисперсионное упрочнение. Вклад частиц второй фазы (когерентных, некогерентных) в упрочнение металлических материалов. Уравнение Орована.

5.3.8 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-4

1. Диффузия (определение). Само- и гетеродиффузия. Энергия активации диффузии и ее физический смысл. Физический смысл предэкспоненциального множителя D_0 в уравнении для коэффициента диффузии.
2. Механизмы объемной диффузии с участием точечных дефектов. Основные закономерности объемной диффузии. Закон Фика. Физический смысл энергии активации объемной диффузии. Влияние различных факторов на интенсивность процессов диффузии.
3. Механизмы зернограничной диффузии. Основные закономерности зернограничной диффузии. Физический смысл энергии активации зернограничной диффузии. Влияние различных факторов на интенсивность процессов зернограничной диффузии.
4. Эффекты Френкеля и Киркендалла. Механизмы и основные закономерности. Основные уравнения, описывающие эффект Киркендалла. Связь эффекта Френкеля с эффектами Киркендалла.

5. Возврат. Основные закономерности и движущие силы возврата. Полигонизация. Причины образования и условия полигонов (дислокационной субструктуры).
6. Особенности процессов диффузии и роста зерен в керамиках.
7. Распад твердого раствора. Понятие о критическом (устойчивом) размере зародыша.
8. Механизм и кинетика выделения частиц второй фазы. Основные уравнения, описывающие кинетику выделения частиц второй фазы в случае гомогенного и гетерогенного распада твердого раствора.
9. Рост частиц второй фазы при распаде твердого раствора. Механизм и кинетика роста частиц второй фазы. Основные уравнения, описывающие кинетику роста частиц второй фазы в случае гомогенного и гетерогенного распада твердого раствора.
10. Скольжение дислокаций. Плоскости легкого скольжения. Скольжение решеточных дислокаций в поле равномерно расположенных точечных препятствий.
11. Вклад дислокационного упрочнения. Вклад субструктурного упрочнения. Причины различного влияния хаотического распределения дислокаций и малоугловых субграниц на прочность металлов.
12. Понятие о ползучести. Основные виды ползучести металлов и сплавов при повышенных температурах (виды ползучести: диффузионная ползучесть, ползучесть по Харперу-Дорну, ползучесть по Коблу). Уравнения, описывающие основные виды ползучести. Принцип построения карт механизмов деформации.
13. Классификация видов разрушения: хрупкое, квазихрупкое и вязкое разрушение. Классификация по виду дефектов: трещины (острые, пластические) и поры. Виды разрушения раскалыванием. Виды вязкого разрушения. Междолинное разрушение при ползучести. Пластический разрыв. Принцип построения карт механизмов разрушения.
14. Твердорастворное упрочнение. Виды твердорастворного упрочнения. Атмосферы. Причины образования атмосфер и их виды. Атмосфера Коттрелла. Атмосфера Судзуки. Атмосфера Снука. Зуб текучести на диаграмме «напряжение-деформация».

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Студент отвечает полностью на вопросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу и творческое мышление.
отлично	Студент отвечает полностью на вопросы билета. При ответе на вопросы допускаются незначительные неточности.
очень хорошо	Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и успешно отвечает на вопросы (задания) преподавателя с небольшими неточностями.
хорошо	Студент показывает средний уровень знания вопросов билета и успешно отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).
удовлетворительно	Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий. При ответах на дополнительные вопросы студент демонстрирует минимальное знание основного материала, наличие минимально необходимого множества навыков, незначительное понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, а также отвечает более чем

Оценка	Критерии оценивания
	на половину поставленных вопросов.
неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. При ответах на дополнительные вопросы студент демонстрирует непонимание смысла проблем, присутствуют грубые ошибки в основном материале, студент не демонстрирует достаточно полное владение терминологией, а также отсутствуют один или несколько навыков, предусмотренных проверяемой компетенцией.
плохо	Подготовка совершенно недостаточна или экзаменуемый отказывается отвечать на поставленные вопросы

5.3.9 Типовые задания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам) для оценки сформированности компетенции ПК-3

Типовые задания к зачету приведены в учебных пособиях:

1. Нохрин А.В., Пискунов А.В., Лопатин Ю.Г., Чувильдеев В.Н., Смирнова Е.С., Перевезенцев В.Н. Изучение процессов рекристаллизации при отжиге сильнодеформированных мелкозернистых металлов – Н.Новгород: ННГУ, 2020, 38 с.
2. Шадрин Я. С., Нохрин А. В., Чувильдеев В. Н., Смирнова Е. С. Изучение процессов распада твердого раствора при отжиге алюминиевых и медных сплавов. Практикум – Н.Новгород, ННГУ, 2022, 42 с.

5.3.10 Типовые задания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам) для оценки сформированности компетенции ПК-4

Типовые задания к зачету приведены в учебных пособиях:

1. Сидорова А.И., Сысоев А.Н. Определение механических свойств металлов. в кн. Физика твердого тела. Лаб. практ. Н.Новгород, 2000, с. 28-50.
2. Чувильдеев В.Н., Дейч И.С., Макаров И.М. Определение электросопротивления металлов и сплавов. в кн. Физика твердого тела. Лаб. практ. Часть 1, Н.Новгород, 2000, с. 67-94.
3. Перевезенцев В.Н., Огородников А.Е., Нохрин А.В. Исследование ползучести субмикроструктурных металлов и сплавов методом микроиндентирования – Н.Новгород, ННГУ, 2020, 43 с.

Критерии оценивания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	1. Студент демонстрирует понимание целей и задач работы. 2. Имеется соответствие объема выполненной работы минимальным требованиям, установленным в учебном или учебно-методическом пособии). 3. Приемлемое (удовлетворительное) качество и достоверность полученных экспериментальных результатов. 4. Высокий уровень обоснованности полученных выводов (приемлемое качество анализа полученных экспериментальных результатов). 5. Студент демонстрирует умение объяснить полученные результаты с использованием базовых и дополнительных источников, а также знаний, полученных при

Оценка	Критерии оценивания
	изучении профильных дисциплин; 6. Студент умеет представить полученные результаты (оформить отчет в соответствии с требованиями, изложенными в учебном или учебно-методическом пособии).
не зачтено	Отчет по работе не представлен (в том числе - вовремя) или невыполнен один из критериев, необходимых для успешной аттестации (см. выше)

5.3.11 Типовые задания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам) для оценки сформированности компетенции ПК-3

Состав, оформление и содержание отчета по лабораторной работе должны соответствовать требованиям, описанным в следующих учебных пособиях:

1. Нохрин А.В., Пискунов А.В., Лопатин Ю.Г., Чувильдеев В.Н., Смирнова Е.С., Перевезенцев В.Н. Изучение процессов рекристаллизации при отжиге сильнодеформированных мелкозернистых металлов – Н.Новгород: ННГУ, 2020, 38 с.
2. Перевезенцев В.Н., Огородников А.Е., Нохрин А.В. Исследование ползучести субмикроструктурных металлов и сплавов методом микроиндентирования – Н.Новгород, ННГУ, 2020, 43 с.
3. Шадрин Я. С., Нохрин А. В., Чувильдеев В. Н., Смирнова Е. С. Изучение процессов распада твердого раствора при отжиге алюминиевых и медных сплавов. Практикум – Н.Новгород, ННГУ, 2022, 42 с.

5.3.12 Типовые задания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам) для оценки сформированности компетенции ПК-4

Состав, оформление и содержание отчета по лабораторной работе должны соответствовать требованиям, описанным в следующих учебных пособиях:

1. Нохрин А.В., Пискунов А.В., Лопатин Ю.Г., Чувильдеев В.Н., Смирнова Е.С., Перевезенцев В.Н. Изучение процессов рекристаллизации при отжиге сильнодеформированных мелкозернистых металлов – Н.Новгород: ННГУ, 2020, 38 с.
2. Перевезенцев В.Н., Огородников А.Е., Нохрин А.В. Исследование ползучести субмикроструктурных металлов и сплавов методом микроиндентирования – Н.Новгород, ННГУ, 2020, 43 с.
3. Шадрин Я. С., Нохрин А. В., Чувильдеев В. Н., Смирнова Е. С. Изучение процессов распада твердого раствора при отжиге алюминиевых и медных сплавов. Практикум – Н.Новгород, ННГУ, 2022, 42 с.

Критерии оценивания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Отчет по лабораторной работе (практике) выполнен полностью, замечания – отсутствуют.
отлично	Отчет о проделанной лабораторной работе полностью соответствует требованиям, описанной в учебном (учебно-методическом) пособии к

Оценка	Критерии оценивания
	лабораторной работе. При ответах на дополнительные вопросы (при сдаче отчета по лабораторной работе) студент демонстрирует знание основного материала, наличие необходимого множества навыков, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение обозначить проблемные ситуации, владение источниками, а также отвечает на все поставленные вопросы. В тексте отчета неправомерные заимствования отсутствуют.
очень хорошо	Отчет о проделанной лабораторной работе содержит ряд некритических отклонений от формы, описанной в учебном (учебно-методическом) пособии к лабораторной работе. При ответах на дополнительные вопросы (при сдаче отчета по лабораторной работе) студент демонстрирует знание основного материала с рядом негрубых ошибок или погрешностей, наличие необходимого множества навыков, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение обозначить проблемные ситуации, владение источниками, а также отвечает на большинство поставленных вопросов. В тексте отчета неправомерные заимствования отсутствуют.
хорошо	Отчет о проделанной лабораторной работе содержит ряд существенных отклонений от формы, описанной в учебном (учебно-методическом) пособии к лабораторной работе, которые студент оперативно исправляет. При ответах на дополнительные вопросы (при сдаче отчета по лабораторной работе) студент демонстрирует хорошее знание основного материала с рядом негрубых ошибок или погрешностей, наличие необходимого множества навыков, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение обозначить проблемные ситуации, владение источниками, а также отвечает на большинство поставленных вопросов. В тексте отчета неправомерные заимствования отсутствуют.
удовлетворительно	Отчет о проделанной лабораторной работе содержит ряд существенных отклонений от формы и требований, описанной в учебном (учебно-методическом) пособии к лабораторной работе. При ответах на дополнительные вопросы (при сдаче отчета по лабораторной работе) студент демонстрирует минимальное знание основного материала, наличие минимально необходимого множества навыков, незначительное понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, а также отвечает более чем на половину поставленных вопросов. В тексте отчета неправомерные заимствования отсутствуют.
неудовлетворительно	Отчет о проделанной лабораторной работе не представлен или форма представленного отчета существенно отличается от формы, описанной в учебном (учебно-методическом) пособии к лабораторной работе, или присутствуют элементы неправомерного заимствования в отчете. При ответах на дополнительные вопросы (при сдаче отчета по лабораторной работе) студент демонстрирует полное непонимание смысла проблем, присутствуют грубые ошибки в основном материале, студент не демонстрирует достаточно полное владение терминологией, а также отсутствуют один или несколько

Оценка	Критерии оценивания
	навыков, предусмотренных данной компетенцией.
плохо	Отчет по лабораторной работе отсутствует, или не сдан во время или не соответствует требованиям или присутствуют неправомерные заимствования в отчете.

5.3.13 Типовые задания (оценочное средство - Тест) для оценки сформированности компетенции ПК-3

Типовые вопросы для теста по данной компетенции:

1. Выберите правильный вариант построения графика для определения величины энергии активации (Q) процесса диффузии по углу его наклона
2. Выберите правильное определение термина "Предел макроупругости"
3. Выберите правильное определение термина "Условный предел текучести"
4. Выберите правильное определение термина "Предел прочности"
5. Что характеризует величина предела макроупругости?
6. Что характеризует величина предела текучести?
7. В каком интервале напряжений происходит процесс микропластической деформации?
8. Как определить критическую степень деформации ϵ_1 при первичной рекристаллизации?
9. Дайте правильное определение термину "Температура рекристаллизации"
10. Как изменяется средний размер рекристаллизованного зерна (в условиях первичной рекристаллизации) при увеличении степени предварительной деформации?
11. Как изменяется объемная доля рекристаллизованного материала (в условиях первичной рекристаллизации) в при увеличении степени предварительной деформации?
12. Как изменяется температура рекристаллизации с увеличением степени предварительной деформации?
13. Выберите правильный вариант записи формулы Зинера для расчета влияния частиц второй фазы на стабильный размер рекристаллизованного зерна.
14. Выберите правильный вариант записи формулы для расчета вклада дислокаций в предел текучести
15. Выберите правильный вариант записи формулы для расчета вклада когерентных частиц второй фазы в предел текучести
16. Выберите правильный вариант записи формулы для расчета вклада некогерентных частиц второй фазы в предел текучести (формула Орована)
17. Выберите правильный вариант записи формулы для расчета вклада легирующих элементов в предел текучести (в случае равномерного распределения легирующих элементов).
18. Выберите правильный вариант записи уравнения Холла-Петча
19. Выберите правильный вариант записи уравнения, описывающее зависимость размера зерна в чистых металлах от времени отжига в условиях собирательной рекристаллизации.

5.3.14 Типовые задания (оценочное средство - Тест) для оценки сформированности компетенции ПК-4

Типовые вопросы для теста по данной компетенции:

1. Выберите правильный вариант определения "Механизм диффузии по Шотки"

2. Выберите правильный вариант представления (записи) физического смысла предэкспоненциального множителя D_0 в уравнении для зависимости коэффициента диффузии от температуры $D = D_0 \exp(-Q/kT)$.
3. Как обычно влияет повышение гидростатического давления на процессы диффузии?
4. Выберите правильный вариант определения "Зернограничная сегрегация"
5. Как с увеличением плотности дефектов в границе зерна изменяется величина коэффициента зернограничной диффузии?
6. Является ли процесс полигонизации одним из вариантов процесса рекристаллизации?
7. Выберите правильный вариант формулы для расчета коэффициента зернограничной диффузии
8. Выберите правильный вариант уравнения, описывающего зависимость скорости внутризеренной деформации от величины приложенного напряжения и температуры.
9. Выберите правильный вариант соотношения между энергией активации самодиффузии в кристаллической решетке (Q_v) и в границе зерна (Q_b) (для металлов)
10. Выберите правильный вариант записи формулы для расчета числа дислокаций в плоском скоплении (в случае отсутствия дальнедействующих полей внутренних напряжений от границ зерен).
11. Выберите правильный вариант формулы для расчета скорости миграции границ зерен V_m (M_b – подвижность границ зерен, P – движущая сила миграции границ зерен)
12. Выберите правильный вариант записи уравнения для расчета миграционной подвижности большеугловых (неспециальных) границ зерен
13. Выберите правильный вариант записи уравнения для расчета движущей силы первичной рекристаллизации (Dg - изменение плотности решеточных дислокаций до и после рекристаллизационного отжига)
14. Выберите правильный вариант записи уравнения для расчета движущей силы собирательной рекристаллизации (g_b – энергия границы зерна, k - коэффициент)
15. Выберите правильный вариант записи уравнения, описывающего зависимость объема рекристаллизованного материала X от степени предварительной деформации e
16. Выберите правильный вариант записи первого закона Фика (J – плотность потока вещества, C – концентрация вещества)
17. Выберите правильный вариант записи второго закона Фика (уравнение диффузии)
18. Выберите правильный вариант записи уравнения Аррениуса (T_m – температура плавления)
19. Выберите правильный вариант уравнения, описывающего связь величины коэффициента зернограничной диффузии и величины избыточного свободного объема D_a (где b - численный коэффициент).
20. Выберите правильный вариант термина "Дислокация ориентационного несоответствия"
21. Выберите правильный вариант термина "Вектор Бюргерса"
22. Выберите правильный вариант определения "Рекристаллизация"
23. Выберите правильный вариант определения "Первичная рекристаллизация"
24. Чем характеризуется собирательная рекристаллизация (нормальный рост зерен)?
25. Укажите основной механизм собирательной рекристаллизации
26. Дайте правильный вариант определения "Относительный свободный объем (границы зерна)"
27. Укажите основной механизм первичной рекристаллизации
28. Дайте правильный вариант термина (определения) "Плоскость легкого скольжения дислокации"
29. Что является отличительной особенностью некогерентной частицы второй фазы (по сравнению с когерентной частицей)?
30. Выберите правильный вариант термина "Атмосфера Коттрелла"
31. Что является причиной образования атмосферы Судзуки?
32. На какой модели теории дислокаций основано уравнение Холла-Петча?
33. Что описывает вклад Пайрелса-Набарро?
34. Как дислокации взаимодействуют с когерентными частицами второй фазы?

35. Выберите правильный вариант термина "Дисперсионное упрочнение"

36. Выберите правильный вариант термина "Специальные границы зерен"

Критерии оценивания (оценочное средство - Тест)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	При тестировании набирает более 50% правильных ответов.
не зачтено	При тестировании набирает менее 50% правильных ответов.

5.3.15 Типовые задания (оценочное средство - Тест) для оценки сформированности компетенции ПК-3

Типовые вопросы для теста по данной компетенции:

1. Выберите правильный вариант построения графика для определения величины энергии активации (Q) процесса диффузии по углу его наклона
2. Выберите правильное определение термина "Предел макроупругости"
3. Выберите правильное определение термина "Условный предел текучести"
4. Выберите правильное определение термина "Предел прочности"
5. Что характеризует величина предела макроупругости?
6. Что характеризует величина предела текучести?
7. В каком интервале напряжений происходит процесс микропластической деформации?
8. Как определить критическую степень деформации ϵ_1 при первичной рекристаллизации?
9. Дайте правильное определение термину "Температура рекристаллизации"
10. Как изменяется средний размер рекристаллизованного зерна (в условиях первичной рекристаллизации) при увеличении степени предварительной деформации?
11. Как изменяется объемная доля рекристаллизованного материала (в условиях первичной рекристаллизации) при увеличении степени предварительной деформации?
12. Как изменяется температура рекристаллизации с увеличением степени предварительной деформации?
13. Выберите правильный вариант записи формулы Зинера для расчета влияния частиц второй фазы на стабильный размер рекристаллизованного зерна.
14. Выберите правильный вариант записи формулы для расчета вклада дислокаций в предел текучести
15. Выберите правильный вариант записи формулы для расчета вклада когерентных частиц второй фазы в предел текучести
16. Выберите правильный вариант записи формулы для расчета вклада некогерентных частиц второй фазы в предел текучести (формула Орована)
17. Выберите правильный вариант записи формулы для расчета вклада легирующих элементов в предел текучести (в случае равномерного распределения легирующих элементов).
18. Выберите правильный вариант записи уравнения Холла-Петча
19. Выберите правильный вариант записи уравнения, описывающее зависимость размера зерна в чистых металлах от времени отжига в условиях собирательной рекристаллизации.

5.3.16 Типовые задания (оценочное средство - Тест) для оценки сформированности компетенции ПК-4

Типовые вопросы для теста по данной компетенции:

1. Выберите правильный вариант определения "Механизм диффузии по Шоттки"
2. Выберите правильный вариант представления (записи) физического смысла предэкспоненциального множителя D_0 в уравнении для зависимости коэффициента диффузии от температуры $D = D_0 \exp(-Q/kT)$.
3. Как обычно влияет повышение гидростатического давления на процессы диффузии?
4. Выберите правильный вариант определения "Зернограничная сегрегация"
5. Как с увеличением плотности дефектов в границе зерна изменяется величина коэффициента зернограничной диффузии?
6. Является ли процесс полигонизации одним из вариантов процесса рекристаллизации?
7. Выберите правильный вариант формулы для расчета коэффициента зернограничной диффузии
8. Выберите правильный вариант уравнения, описывающего зависимость скорости внутризеренной деформации от величины приложенного напряжения и температуры.
9. Выберите правильный вариант соотношения между энергией активации самодиффузии в кристаллической решетке (Q_v) и в границе зерна (Q_b) (для металлов)
10. Выберите правильный вариант записи формулы для расчета числа дислокаций в плоском скоплении (в случае отсутствия дальнедействующих полей внутренних напряжений от границ зерен).
11. Выберите правильный вариант формулы для расчета скорости миграции границ зерен V_m (M_b – подвижность границ зерен, P – движущая сила миграции границ зерен)
12. Выберите правильный вариант записи уравнения для расчета миграционной подвижности большеугловых (неспециальных) границ зерен
13. Выберите правильный вариант записи уравнения для расчета движущей силы первичной рекристаллизации (D_g - изменение плотности решеточных дислокаций до и после рекристаллизационного отжига)
14. Выберите правильный вариант записи уравнения для расчета движущей силы собирательной рекристаллизации (g_b – энергия границы зерна, k - коэффициент)
15. Выберите правильный вариант записи уравнения, описывающего зависимость объема рекристаллизованного материала X от степени предварительной деформации e
16. Выберите правильный вариант записи первого закона Фика (J – плотность потока вещества, C – концентрация вещества)
17. Выберите правильный вариант записи второго закона Фика (уравнение диффузии)
18. Выберите правильный вариант записи уравнения Аррениуса (T_m – температура плавления)
19. Выберите правильный вариант уравнения, описывающего связь величины коэффициента зернограничной диффузии и величины избыточного свободного объема D_a (где b - численный коэффициент).
20. Выберите правильный вариант термина "Дислокация ориентационного несоответствия"
21. Выберите правильный вариант термина "Вектор Бюргерса"
22. Выберите правильный вариант определения "Рекристаллизация"
23. Выберите правильный вариант определения "Первичная рекристаллизация"
24. Чем характеризуется собирательная рекристаллизация (нормальный рост зерен)?
25. Укажите основной механизм собирательной рекристаллизации
26. Дайте правильный вариант определения "Относительный свободный объем (границы зерна)"
27. Укажите основной механизм первичной рекристаллизации
28. Дайте правильный вариант термина (определения) "Плоскость легкого скольжения дислокации"
29. Что является отличительной особенностью некогерентной частицы второй фазы (по сравнению с когерентной частицей)?
30. Выберите правильный вариант термина "Атмосфера Коттрелла"
31. Что является причиной образования атмосферы Судзуки?
32. На какой модели теории дислокаций основано уравнение Холла-Петча?
33. Что описывает вклад Пайрелса-Набарро?

34.Как дислокации взаимодействуют с когерентными частицами второй фазы?

35.Выберите правильный вариант термина "Дисперсионное упрочнение"

36.Выберите правильный вариант термина "Специальные границы зерен"

Критерии оценивания (оценочное средство - Тест)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	При тестировании набирает 100% правильных ответов.
отлично	При тестировании набирает 90-99% правильных ответов.
очень хорошо	При тестировании набирает 80-90% правильных ответов.
хорошо	При тестировании набирает 70-80% правильных ответов.
удовлетворительно	При тестировании набирает 50-70% правильных ответов.
неудовлетворительно	При тестировании набирает менее 50% правильных ответов.
плохо	При тестировании набирает менее 50% правильных ответов.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Изучение процессов рекристаллизации при отжиге сильнодеформированных мелкозернистых металлов: практикум / Нохрин А. В., Пискунов А. В., Лопатин Ю. Г., Чувильдеев В. Н., Смирнова Е. С., Перевезенцев В. Н. - 2-е изд., испр. и доп. - Нижний Новгород : ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2020. - 38 с. - Рекомендовано методической комиссией физического факультета для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки: 03.03.02 «Физика» и 03.04.02 «Физика». - Библиогр.: доступна в карточке книги, на сайте ЭБС Лань. - Книга из коллекции ННГУ им. Н. И. Лобачевского - Физика., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=783302&idb=0>.
2. Гегузин Яков Евсеевич. Очерки о диффузии в кристаллах / АН СССР. - 2-е изд., доп. - М. : Наука, 1974. - 253 с. : ил. - (Научно-популярная серия). - 0.39., 2 экз.
3. Горелик Семен Самуилович. Рекристаллизация металлов и сплавов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Металлургия, 1978. - 568 с. : ил. - 3.60., 1 экз.
4. Перевезенцев Владимир Николаевич. Рекристаллизация металлов и сплавов : учеб. пособие / ННГУ. - Н. Новгород : Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2000. - 62 с. - ISBN 5-85746-608-3 : 15.00., 5 экз.
5. Физическое металловедение : в 3 т. Т. 1. Атомное строение металлов и сплавов / под ред. Р. У. Кана, П. Хаазена ; пер с англ. под ред. О. В. Абрамова [и др.]. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Металлургия, 1987. - 638, [1] с. : ил. - 6.40., 2 экз.
6. Физическое металловедение : в 3 т. Т. 2. Фазовые превращения в металлах и сплавах и сплавы с особыми физическими свойствами / под ред. Р. У. Кана, П. Хаазена ; пер с англ. под ред. О. В. Абрамова, А. В. Серебрякова. - М. : Металлургия, 1987. - 621, [2] с. : ил. - 6.40., 2 экз.

7. Физическое металловедение : [в 3 вып.] : пер. с англ. Вып. 3. Дефекты кристаллического строения. Механические свойства металлов и сплавов / под ред. Р. Кана ; под ред. [и с предисл.] В. М. Розенберга. - М. : Мир, 1968. - 484 с. : ил. - 2.30., 3 экз.
8. Чувильдеев Владимир Николаевич. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения. - М. : Физматлит, 2004. - 304 с. - ISBN 5-9221-0435-7 : 40.00., 9 экз.
9. Орлов Алексей Николаевич. Границы зерен в металлах. - М. : Metallurgia, 1980. - 154 с. : ил. - (Достижения отечественного металловедения / под общ. ред. М. Л. Бернштейна, И. И. Новикова). - 1.50., 1 экз.
10. Трушин Юрий Владимирович. Физическое материаловедение : учеб. для вузов. - СПб. : Наука, 2000. - 286 с. : 140 ил. - 30.00., 31 экз.
11. Перевезенцев Владимир Николаевич. Физическое материаловедение в задачах и упражнениях : учеб. пособие / ННГУ. - Н. Новгород : Изд-во Нижегород. ун-та, 2000. - 110 с. : ил., табл., граф., схемы. - 13.00., 2 экз.
12. Фрост Г. Дж. Карты механизмов деформации / пер. с англ. Л. М. Бернштейна. - Челябинск : Metallurgia, Челяб. отд-ние, 1989. - 327, [1] с. : ил. - ISBN 5-229-00078-3 (в пер.) : 4.70., 1 экз.
13. Мартин Дж. У. Микромеханизмы дисперсионного твердения сплавов / пер. с англ. М. Ю. Матвеева ; под ред. М. С. Василевского. - М. : Metallurgia, 1983. - 166 с. : ил. - 1.80., 1 экз.
14. Мартин Джон У. Стабильность микроструктуры металлических систем / пер. с англ. О. А. Алексеева и В. С. Хабарова ; под ред. В. Н. Быкова. - М. : Атомиздат, 1978. - 280 с. : ил. - 3.10., 2 экз.
15. Орлов Алексей Николаевич. Введение в теорию дефектов в кристаллах : [учеб. пособие для вузов по специальности "Физика металлов"]. - М. : Высшая школа, 1983. - 144 с. : ил. - 0.25., 43 экз.
16. Изучение процессов распада твердого раствора при отжиге алюминиевых и медных сплавов : практикум / Я. С. Шадрина, А. В. Нохрин, В. Н. Чувильдеев, Е. С. Смирнова ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2022. - 42 с. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=797021&idb=0>.
17. Физика новых материалов : учебное пособие / В. Н. Чувильдеев, А. В. Нохрин, О. Э. Пирожникова [и др.] ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2010. - 105 с. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=849955&idb=0>.
18. Перевезенцев Владимир Николаевич. Изучение ползучести субмикроструктурных металлов и сплавов методом микроиндентирования : практикум / В. Н. Перевезенцев, А. Е. Огородников, А. В. Нохрин ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2020. - 43 с. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=794170&idb=0>.

Дополнительная литература:

1. Лившиц Борис Григорьевич. Металлография : [учеб. для металлург. специальностей вузов]. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Metallurgia, 1990. - 333, [1] с. : ил. - ISBN 5-229-00474-6 (в пер.) : 1.20., 1 экз.
2. Бокштейн Борис Самуилович. Атомы блуждают по кристаллу. - М. : Наука, 1984. - 207 с. : ил. - (Библиотечка "Квант" ; вып. 28). - 0.30., 1 экз.
3. Бокштейн Борис Самуилович. Термодинамика и кинетика диффузии в твердых телах. - М. : Metallurgia, 1974. - 280 с. : ил. - 2.20., 2 экз.

4. Рекристаллизация металлических материалов / [под ред. Ф. Хесснера ; пер. с англ. С. Н. Вальковского и др. ; под ред. Ч. В. Копецкого]. - М. : Металлургия, 1982. - 352 с. : ил. - 4.10., 2 экз.
5. Гегузин Яков Евсеевич. Очерки о диффузии в кристаллах / АН СССР. - 2-е изд., доп. - М. : Наука, 1974. - 253 с. : ил. - (Научно-популярная серия). - 0.39., 2 экз.
6. Эшби Михаэль Ф. Конструкционные материалы : полный курс : [учеб. пособие] / пер. 3-го англ. изд. под ред. С. Л. Баженова. - Долгопрудный : Интеллект, 2010. - 672 с. - ISBN 978-5-91559-060-0 : 2059.20., 1 экз.
7. Розенберг Владимир Моисеевич. Ползучесть металлов. - М. : Металлургия, 1967. - 276 с. : ил. - 1.27., 2 экз.
8. Куров И. Б. Ползучесть металлов и сплавов : учеб. пособие / Горьк. гос. ун-т им. Н. И. Лобачевского. - Горький : Изд-во ГГУ, 1980. - 61 с. - 0.14., 21 экз.
9. Владимиров Владимир Игоревич. Физическая природа разрушения металлов. - М. : Металлургия, 1984. - 280 с. : ил. - 2.30., 2 экз.
10. Иванова Вера Семеновна. Природа усталости металлов. - М. : Металлургия, 1975. - 454 с. - 2.42., 3 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

1. <http://www.lib.unn.ru/> - сайт Фундаментальной библиотеки ННГУ.
2. <https://biblio-online.ru/> - сайт электронной библиотеки «Юрайт», содержащий в открытом доступе книги по отдельным разделам дисциплины.
3. <https://e.lanbook.com> – сайт электронно-библиотечной системы «ЛАНЬ», содержащий в открытом доступе книги по отдельным разделам дисциплины.
4. <http://elibrary.ru/defaultx.asp> - российская научная электронная библиотека «Elibrary», публикующая статьи, тематика которых совпадает с тематикой отдельных разделов преподаваемой дисциплины.
5. <http://znanium.com> – сайт электронно-библиотечной системы «Znanium.com», содержащий книги по отдельным разделам дисциплины.
6. <http://eqworld.ipmnet.ru/> - сайт электронной библиотеки EqWord, содержащий книги по отдельным разделам дисциплины.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: Для выполнения лабораторных работ со стороны НИФТИ ННГУ предоставляется доступ к оборудованию, необходимому для проведения практических занятий, в том числе:

- Литьевые машины INDUTHERM VTC-200 и INDUTHERM VCC-3000 для изготовления образцов сплавов заданного состава.
- воздушные муфельные печи типа «СНОЛ», «ЭКПС» или «Plavka Pro» для термической обработки металлов на воздухе;
- лабораторный прокатный стан;
- Ротационно-ковочная машина R5-4-21 НР.
- Интерференционные металлографические микроскопы Leica DM IRM и Altami MET1C для исследования микро- и макроструктуры сплавов.
- растровый электронный микроскоп Jeol JSM-6490 с энергодисперсионным микроанализатором INCA 350.
- испытательная машина 2167 Р-50, оборудованная системой для проведения испытаний на

растяжение, сжатие и изгиб.
- автоматизированный микротвердомер VHS-100 и МЕТОЛАБ 502;
- прибор для измерения электропроводности «SIGMATEST 2.069» вихретоковым методом.
- металлообрабатывающее оборудование для пробоподготовки образцов.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 03.03.02 - Физика.

Автор(ы): Нохрин Алексей Владимирович, доктор физико-математических наук
Сахаров Никита Владимирович, кандидат физико-математических наук
Шадрина Яна Сергеевна
Пискунов Александр Владимирович.

Рецензент(ы): Белова Ольга Васильевна.

Заведующий кафедрой: Нохрин Алексей Владимирович, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 23.12.2025, протокол № б/н.