

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**

(факультет / институт / филиал)

**УТВЕРЖДЕНО**  
Решением ученого совета ННГУ  
протокол от  
«31» мая 2023 г. №6

## **Рабочая программа дисциплины**

**Физика металлов, сплавов и керамик**

(наименование дисциплины (модуля))

**Уровень высшего образования**

**бакалавриат**

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

**Направление подготовки / специальность**

**03.03.02 - Физика**

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

**Профиль образовательной программы**

**Физика конденсированного состояния**

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

**Квалификация (степень)**

**Бакалавр**

(бакалавр / магистр / специалист)

**Форма обучения**

**Очная**

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород 2023

## 1. Место и цели дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Физика металлов, сплавов и керамик» (Б1.В.1.ДВ.03.03) относится к дисциплинам выбора части ООП, формируемой участниками образовательных отношений.

Дисциплина преподается на четвертом году обучения, в 7 и 8 семестрах.

Место дисциплины в учебном плане образовательной программы	Характеристика дисциплины
Блок 1. Дисциплины (модули). Часть, формируемая участниками образовательных отношений	Дисциплина Б1.В.1.ДВ.03.03 относится к дисциплинам выбора части, формируемой участниками образовательных отношений ООП направления подготовки 03.03.02 Физика

Целями освоения дисциплины являются:

- познакомить студентов с основными понятиями, законами и методами современной теории металлов и физического материаловедения, научить использовать эти знания для решения задач, возникающих перед специалистами-материаловедами;
- научить описывать явления, протекающие в металлах и сплавах при деформационно-термическом воздействии на языке физического материаловедения;
- научить эффективному использованию знаний в области теории дефектов и диффузионно-контролируемых процессов в металлах, сплавах и керамиках для решения практических задач по выбору оптимальных режимов обработки материалов с целью получения в них требуемого уровня физико-механических свойств;
- научить составлять рекомендации (предписания), позволяющие подбирать методы и режимы модификации свойств металлов и сплавов, научить практическим методам исследования структуры и физико-механических свойств металлов и сплавов;
- научить студентов использовать теоретические знания в области физики металлов и сплавов для решения практических задач (экспериментальных исследований), связанных с изучением особенностей диффузионно-контролируемых процессов в современных металлических материалах;
- выработать первичные навыки эффективной практической работы в современном исследовательском оборудовании;
- выработать навыки анализа многофакторных экспериментальных результатов, получаемых при исследовании сложных физических диффузионно-контролируемых процессов.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции	Результаты обучения по дисциплине	
ПК-3. Способен проводить научные исследования с помощью современной приборной базы, сложного физического оборудования и	ПК-2.1 Демонстрация способности применять профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных дисциплин, в научно-исследовательской	<u>Знать:</u> З1: Знать основные разделы физики конденсированного состояния, физического материаловедения и смежных дисциплин, формирующих фундаментальную научно-образовательную базу, необходимую для решения	Контрольные вопросы

информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта	деятельности, при реализации научно-исследовательских, научно-инновационных и практических проектов	<p>задач в области физики металлов, сплавов и керамик.</p> <p>32: Знать методы физических исследований, необходимые для получения новых знаний и решения задач в области физики металлов, сплавов и керамик.</p> <p>33: 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».</p> <p>34: Знать требования техники безопасности при проведении практических работ с выбранными методами физических исследований.</p> <p>35: Знать теоретические основы методов физических исследований, необходимых для выполнения практических заданий и лабораторных работ по дисциплине «Физика металлов, сплавов и керамик».</p> <p>36: Знать требования к документам, предъявляемым в качестве отчетных за выполненные лабораторные работы (практические задания).</p> <p>37: Знать основные разделы физики металлов, сплавов и керамик, необходимых используемые для решения практических задач, в том числе:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- основы теории диффузии и диффузионных процессов в металлах, сплавах и керамиках;</li> <li>- механизмы выделения и роста частиц второй фазы, в том числе знать уравнения для расчета кинетических зависимостей объемной доли</li> </ul>	<p>Контрольные вопросы</p> <p>Контрольные вопросы</p> <p>Отчет по лабораторной работе</p> <p>Контрольные вопросы</p> <p>Отчет по лабораторной работе</p> <p>Контрольные вопросы</p>
---	---	---	---

		<p>и размера выделяющихся частиц второй фазы;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- механизмы пластической деформации в области микро- и макропластической деформации, в том числе знать уравнения для расчета основных физико-механических свойств материалов;</li> <li>- основные механизмы ползучести, в том числе знать уравнения для расчета скорости ползучести;</li> <li>- механизмы зарождения и разрушения металлических и керамических материалов, в том числе знать их классификацию с использованием карт механизмов разрушения.</li> </ul> <p><u>Уметь:</u></p> <p>У1: 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.</p> <p>У2: Уметь использовать знания различных разделов физики конденсированного состояния и смежных дисциплин для решения типовых (стандартных) задач в области физики металлов, сплавов и керамик.</p> <p>У3: Уметь использовать специализированные знания в области физики конденсированного состояния, физического материаловедения и смежных дисциплин для обоснования выбора оптимального способа решения поставленных задач.</p> <p>У4: Уметь анализировать и обосновывать выбор оптимального решения исследовательских и практических задач, стоящих перед студентом в рамках курса «Физика металлов, сплавов и керамик».</p>	<p>Контрольные вопросы</p> <p>Задачи</p> <p>Задачи</p> <p>Контрольные вопросы Отчет по лабораторной работе</p>
--	--	---	--

		<p>У5: Уметь использовать возможности современных методов физических исследований для решения сложных экспериментальных и теоретических физических задач в области физики металлов, сплавов и керамик.</p> <p>У6: Уметь интерпретировать полученные экспериментальные результаты с использованием методов анализа экспериментальных данных и методов элементарной обработки результатов эксперимента.</p> <p>У7: Уметь решать практические задачи, связанные с расчетом оптимальных параметров структуры металлических и керамических материалов, необходимых для обеспечения заданного уровня их физико-механических свойств.</p> <p>У8: 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.</p> <p>У9: 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.</p> <p><u>Владеть:</u></p>	<p>Контрольные вопросы Отчет по лабораторной работе</p> <p>Отчет по лабораторной работе</p> <p>Отчет по лабораторной работе Задачи</p> <p>Задачи</p> <p>Отчет по лабораторной работе</p>
--	--	--	--

		<p>V1: Владеть методами, теориями и инструментарием дисциплины «Физика металлов, сплавов и керамик», базирующихся на различных разделах физики конденсированного состояния.</p> <p>V2: Владеть опытом использования знаний и методов физики конденсированного состояния для получения новых знаний и решения задач в области физики конденсированного состояния.</p> <p>V3: Опытном проведении сложных (комплексных) экспериментальных исследований (выполнения лабораторных работ) в области физики металлов, сплавов и керамик с использованием современных методов физических исследований.</p> <p>V4: Опытном анализа полученных экспериментальных результатов и их интерпретации с учетом профессиональных знаний в области теории и методов физических исследований.</p> <p>V5: Владеть навыками оформления отчетных документов по проведенным лабораторным работам (практическим задания) в соответствии с требованиями, установленными учебно-методическими материалами.</p> <p>V6: Владеть навыками решения задач (проведения расчетов) оптимальных параметров структуры металлических материалов в заданных условиях эксплуатации.</p> <p>V7: Владеть навыками исследования сложных физических процессов (диффузии, рекристаллизации, распада твердого раствора) с использованием ряда взаимно</p>	<p>Отчет по лабораторной работе</p> <p>Задачи Отчет по лабораторной работе</p> <p>Отчет по лабораторной работе</p> <p>Отчет по лабораторной работе</p> <p>Отчет по лабораторной работе</p> <p>Задачи Отчет по лабораторной работе</p> <p>Отчет по лабораторной работе</p>
--	--	--	---

		дополняющих методик. В8: Владеть навыками физического анализа результатов экспериментальных исследований и их интерпретации с использованием профессиональных знаний в соответствующих областях физики металлов, сплавов и керамик.	Отчет по лабораторной работе
--	--	--	------------------------------

### 3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 10 зачетных единиц, всего 360 часов, из которых 178 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (42 часа занятия лекционного типа, 116 часов занятия лабораторные работы, 16 часов практические занятия), 182 часа составляет самостоятельная работа обучающегося (101 час - самостоятельная работа в течении семестра и 81 час - мероприятия промежуточного контроля успеваемости).

Очная форма обучения	
Общая трудоемкость	10 зет
Часов по учебному плану в том числе	360
аудиторные занятия (контактная работа):	178
- занятия лекционного типа, ч	42
- практические (семинарские) занятия, ч	16
- лабораторный работы, ч	116
самостоятельная работа, ч	182
КСР, ч	4
Промежуточная аттестация	Экзамен

### Содержание дисциплины

Содержание дисциплины Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	В том числе					Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы					
		из них					
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия)	Занятия лабораторного типа	Консультации	Всего	
Тема 1: Основы диффузионных процессов в твердых телах. Феноменология и теория диффузионных процессов в металлах, сплавах и керамиках		16	2	0	-	18	20
Тема 2: Процессы возврата и рекристаллизации в деформированных металлах и сплавах. Анализ процессов рекристаллизации с использованием современных методов физических исследований		10	2	64	-	76	20
Тема 3: Механизмы микро- и макропластической деформации. Определение механизмов микро- и макропластической деформации с использованием традиционных и современных методов		2	6	0	-	8	40

исследований механических свойств							
Тема 4: Механизмы распада твердого раствора в металлах и сплавах. Анализ механизмов распада твердого раствора с использованием современных методов физических исследований		8	2	52	-	62	15
Тема 5: Механизмы деформации и разрушения в условиях ползучести. Анализ механизмов деформации и разрушения с использованием карт механизмов деформации и разрушения		6	4	0	-	10	21
<b>Итого</b>		42	32	116		192	116

Краткое содержание основных разделов (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 зернограничной диффузии. Основные закономерности зернограничной диффузии. Влияние различных факторов на интенсивность процессов зернограничной диффузии. Понятие о свободном объеме границ зерен. Влияние избыточного свободного объема на коэффициент зернограничной диффузии.

Зернограничные сегрегации. Влияние легирующих элементов на коэффициент зернограничной диффузии. Причины немоного влияния концентрации легирующих элементов на величину коэффициента зернограничной 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 возврате 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 Котрелла. 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.

В процессе изучения дисциплины используются следующие образовательные технологии: проблемный метод изложения материала и диалогическая форма проведения лекций, элементы научной дискуссии. Лекции и семинарские занятия проводятся с использованием средств мультимедиа.

Самостоятельная работа студентов связана с применением компьютерных и информационно-коммуникационных технологий.

В преподавании дисциплины (в части семинаров) активно используются интерактивные технологии групповой работы на практических занятиях, когда студенты обсуждают с преподавателем предложенную им задачу (научно-практическую проблему) как индивидуально («преподаватель – студент»), так и в ходе группового обсуждения с преподавателем возможных вариантов предложенных студентами решений («преподаватель – группа студентов»). В ходе обсуждения преподаватель может высказывать конструктивные критические замечания к предлагаемым решениям, просить студентов уделить особое внимание какому-нибудь аспекту рассматриваемого явления (обосновать сделанные выводы), а также предложить провести групповое обсуждение рассматриваемой проблемы и прийти к единому мнению.

#### **4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

Самостоятельная работа студентов включает активное изучение лекционного материала, основной и вспомогательной учебной литературы, а также соответствующих разделов учебных и учебно-методических пособий, перечень которых приведен в п.7 настоящей рабочей программы дисциплины.

Основной целью самостоятельной работы является подготовка к выполнению лабораторных работ (практических занятий), анализ результатов, полученных в ходе выполнения лабораторных работ, а также решение задач, заданных преподавателем для самостоятельного разбора.

В случае отклонения студента от графика учебного процесса по какой-либо причине, в рамках самостоятельной работы может выделяться время на выполнение той части лабораторной работы, по которой имеет место отставание обучающегося от графика.

Для проведения самостоятельной работы обучающимся предоставляются свободные аудитории, доступ к компьютерной технике.

## 5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

### 5.1 Описание шкал оценивания

Уровень сформированности компетенций	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	Не зачтено			Зачтено			
<b>Знания</b>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	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 негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<b>Умения</b>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки.	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественным недочетами, выполнены все задания в полном объеме.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<b>Навыки</b>	Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа. Лабораторная работа не выполнена	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки. Лабораторная работа не выполнена (отчет по лабораторной работе не принят).	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами. Отчет по лабораторной работе содержит существенные замечания.	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами. Отчет по лабораторной работе содержит некоторые ошибки и недочеты.	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Отчет по лабораторной работе содержит несущественные недочеты.	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов. Отчет по лабораторной работе не содержит ошибок и недочетов.	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач. Отчет по лабораторной работе не содержит ошибок и недочетов.
<b>Мотивация (личностное отношение)</b>	Полное отсутствие учебной активности и мотивации	Учебная активность и мотивация слабо выражены, готовность качественно решать поставленные задачи отсутствует	Учебная активность и мотивация низкие, слабо выражены, стремление решать задачи качественно	Учебная активность и мотивация проявляются на среднем уровне, демонстрируется готовность выполнять поставленные задачи на среднем уровне	Учебная активность и мотивация проявляются на уровне выше среднего, демонстрируется готовность выполнять большинство поставленных	Учебная активность и мотивация проявляются на высоком уровне, демонстрируется готовность выполнять все поставленные	Учебная активность и мотивация проявляются на очень высоком уровне, демонстрируется готовность выполнять нестандартные

				качества	задачи на высоком уровне качества	задачи на высоком уровне качества	дополнительные задачи на высоком уровне качества
<b>Характеристика сформированности компетенции</b>	Компетенция не сформирована. Отсутствуют знания, умения, навыки, необходимые для решения практических (профессиональных) задач. Требуется повторное обучение	Компетенция в полной мере не сформирована. Имеющихся знаний, умений, навыков недостаточно для решения практических (профессиональных) задач. Требуется повторное обучение	Сформированность компетенции соответствует минимальным требованиям. Имеющихся знаний, умений, навыков в целом достаточно для решения практических (профессиональных) задач, но требуется дополнительная практика по большинству практических задач.	Сформированность компетенции в целом соответствует требованиям, но есть недочеты. Имеющихся знаний, умений, навыков и мотивации в целом достаточно для решения практических (профессиональных) задач, но требуется дополнительная практика по некоторым профессиональным задачам.	Сформированность компетенции в целом соответствует требованиям. Имеющихся знаний, умений, навыков и мотивации в целом достаточно для решения стандартных практических (профессиональных) задач.	Сформированность компетенции полностью соответствует требованиям. Имеющихся знаний, умений, навыков и мотивации в полной мере достаточно для решения сложных практических (профессиональных) задач.	Сформированность компетенции превышает стандартные требования. Имеющихся знаний, умений, навыков и мотивации в полной мере достаточно для применения творческого подхода к решению сложных практических (профессиональных) задач.
<b>Уровень сформированности компетенций</b>	Нулевой	Низкий	Ниже среднего	Средний	Выше среднего	Высокий	Очень высокий
<b>Баллы, %</b>	0-30	31-50	51-70	71-85	86-90	91-98	99-100

#### Описание шкал оценивания.

При промежуточной аттестации студентов на экзамене в конце каждого семестра обучения используется традиционная семибалльная шкала оценивания (выставления оценки («Плохо», «Неудовлетворительно», «Удовлетворительно», «Хорошо», «Очень хорошо», «Отлично», «Превосходно»))

<b>Оценка</b>	<b>Критерий выставления</b>
Превосходно	Отличная подготовка. 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. Отчет по лабораторной работе не содержит ошибок и недочетов.
Отлично	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета, самостоятельно решает задачу в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на вопросы допускаются незначительные неточности. Отчет по лабораторной работе не содержит ошибок и недочетов.
Очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета, самостоятельно решает задачу и отвечает на вопросы (задания) преподавателя с небольшими неточностями. Отчет по лабораторной работе содержит несущественные недочеты.
Хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета, решает задачу с наводящими вопросами преподавателя и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета). Отчет по лабораторной работе содержит некоторые ошибки и недочеты.

Удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий, может решить типовую задачу с помощью преподавателя. Отчет по лабораторной работе содержит существенные замечания.
Неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Задача не решена. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания. Лабораторная работа не выполнена (отчет по лабораторной работе не принят или отчет не предоставлен в срок).
Плохо	Подготовка совершенно недостаточна. Последующая передача возможна только с комиссией. Лабораторная работа не выполнена (отчет по лабораторной работе не принят или отчет не предоставлен в срок).

При проверке отчета по лабораторной работе преподавателем оценивается:

- степень понимания целей работы;
- степень достижения поставленных целей (соответствие объема выполненной работы минимальным требованиям, установленным в учебном или учебно-методическом пособии);
- качество и достоверность полученных экспериментальных результатов;
- обоснованность полученных выводов (качество анализа полученных экспериментальных результатов);
- умение объяснить полученные результаты с использованием базовых и дополнительных источников, а также знаний, полученных при изучении профильных дисциплин;
- умение представить полученные результаты (оформить отчет в соответствии с требованиями, изложенными в учебном или учебно-методическом пособии).

Приемка отчетов по проделанным лабораторным работам проводится на основании следующих критериев:

Оценка	Критерий выставления
Отчет по лабораторной работе принят	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 минимально 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. Отчет предоставлен в срок.
Отчет по лабораторной работе не принят	Отчет о проделанной лабораторной работе не представлен или форма представленного отчета существенно отличается от формы, описанной в учебном (учебно-методическом) пособии к лабораторной работе. 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 навыков, предусмотренных данной компетенцией. В тексте отчета встречаются элементы неправомерного заимствования, в том числе – текста лабораторных работ других студентов.

Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине, характеризующих этапы формирования компетенций.

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- тестирование (текущий контроль);
- индивидуальное собеседование (текущий контроль, промежуточная аттестация);
- письменные ответы на вопросы (промежуточная аттестация).

Для оценивания результатов обучения в виде умений используются следующие процедуры и технологии:

- простые практические контрольные задания (задачи) (текущий контроль, промежуточная аттестация);
- индивидуальная или групповая дискуссия с преподавателем при обсуждении возможных вариантов решения поставленных задач (текущий контроль);

Для оценивания результатов обучения в виде владений (оценка навыков) используются следующие процедуры и технологии:

- комплексные практические задания (отчеты по лабораторным работам) (текущий контроль, промежуточная аттестация);
- практические контрольные задания повышенной сложности (факультативные задачи или практические задания) (текущий контроль, промежуточная аттестация).

Критерии и шкалы оценивания сформированности компетенций приведены в п.2.1 Фонда оценочных средств дисциплины «Физика металлов, сплавов и керамик».

Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

## 5.2 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

### 5.2.1 Контрольные вопросы к экзамену по дисциплине «Физика металлов, сплавов и керамик»

Вопрос	Код компетенции
Диффузия (определение). Само- и гетеродиффузия. Энергия активации диффузии и ее физический смысл. Физический смысл предэкспоненциального множителя $D_0$ в уравнении для коэффициента диффузии.	ПК-3
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.	ПК-3
Механизмы зернограничной диффузии. Основные закономерности зернограничной диффузии. Физический смысл энергии активации зернограничной диффузии. Влияние различных факторов на интенсивность процессов зернограничной диффузии.	ПК-3
Зернограничные сегрегации. Влияние легирующих элементов на коэффициент зернограничной диффузии при комнатной и повышенной температурах. Влияние легирующих элементов на температуру начала рекристаллизации.	ПК-3
Эффекты Френкеля и Киркендалла. Механизмы и основные закономерности. Основные уравнения, описывающие эффект Киркендалла. Связь эффекта Френкеля с эффектом Киркендалла.	ПК-3
Возврат. Основные закономерности и движущие силы возврата. Полигонизация. Причины образования и условия полигонов (дислокационной субструктуры).	ПК-3

Первичная рекристаллизация. Механизмы первичной рекристаллизации. Основные закономерности и движущая сила первичной рекристаллизации. Уравнение Аврами для описания кинетики первичной рекристаллизации.	ПК-3
Собирательная рекристаллизация. Механизм собирательной рекристаллизации. Основные закономерности и движущая сила собирательной рекристаллизации (нормального роста зерен). Уравнение роста зерен в условиях собирательной рекристаллизации.	ПК-3
Влияние частиц второй фазы на миграционную подвижность границ зерен. Уравнение Зинера.	ПК-3
Особенности роста зерен в керамиках	ПК-3
Распад твердого раствора. Понятие о критическом (устойчивом) размере зародыша.	ПК-3
Механизм и кинетика выделения частиц второй фазы. Основные уравнения, описывающие кинетику выделения частиц второй фазы в случае гомогенного и гетерогенного распада твердого раствора.	ПК-3
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.	ПК-3
Методы механических испытаний. Классификация методов механических испытаний (испытания на растяжение, твердость, усталость, ползучесть). Физические процессы, лежащие в основе методов механических испытаний.	ПК-3
Особые точки на зависимости «деформация – разрушение». Предел макроупругости. Предел текучести. Предел прочности. Твердость. Корреляция между этими величинами.	ПК-3
Скольжение дислокаций. Плоскости легкого скольжения. Скольжение решеточных дислокаций в поле равномерно расположенных точечных препятствий.	ПК-3
Вклад дислокационного упрочнения. Вклад субструктурного упрочнения. Причины различного влияния хаотического распределения дислокаций и малоугловых субграниц на прочность металлов.	ПК-3
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	ПК-3
Классификация видов разрушения: хрупкое, квазихрупкое и вязкое разрушение. Классификация по виду дефектов: трещины (острые, пластические) и поры. Виды разрушения раскалыванием. Виды вязкого разрушения. Межзеренное разрушение при ползучести. Пластический разрыв. Принцип построения карт механизмов разрушения.	ПК-3
Особенности пластической деформации и разрушения керамик. Карты деформации и разрушения керамик	ПК-3
Твердорастворное упрочнение. Виды твердорастворного упрочнения. Атмосферы. Причины образования атмосфер и их виды. Атмосфера Котрелла. Атмосфера Судзуки. Атмосфера Снука. Зуб текучести на диаграмме «напряжение-деформация».	ПК-3
Влияние размера зерна и структурно-фазового состояния границ зерен на предел текучести металлов и сплавов. Соотношение Холла-Петча.	ПК-3
Дисперсное и дисперсионное упрочнение. Вклад частиц второй фазы (когерентных, некогерентных) в упрочнение металлических материалов. Уравнение Орована.	ПК-3

Контрольные вопросы для текущего опроса

Вопрос	Код компетенции
Диффузия (определение). Само- и гетеродиффузия. Энергия активации диффузии и ее физический смысл.	ПК-3
Механизмы объемной диффузии с участием точечных дефектов. Основные закономерности объемной диффузии. Закон Фика. Влияние различных факторов на интенсивность процессов диффузии	ПК-3
Механизмы зернограницной диффузии. Основные закономерности зернограницной диффузии. Влияние различных факторов на интенсивность процессов зернограницной диффузии.	ПК-3
Зернограницные сегрегации. Физический смысл коэффициента распределения примесей. Влияние легирующих элементов на коэффициент зернограницной диффузии.	ПК-3
Возврат и рекристаллизация. Полигонизация как один из механизмов возврата	ПК-3
Первичная рекристаллизация. Основные закономерности и движущая сила первичной рекристаллизации	ПК-3
Процедура определения энергии активации первичной рекристаллизации с помощью уравнения Авраами	ПК-3
Собирательная рекристаллизация. Основные закономерности и движущая сила собирательной рекристаллизации (нормального роста зерен)	ПК-3
Процедура определения энергии активации собирательной рекристаллизации	ПК-3
Формула для расчета температуры начала рекристаллизации сильнодеформированного металла	ПК-3
Влияние легирующих элементов на температуру начала рекристаллизации сильнодеформированного металла	ПК-3
Процедура измерения и физический смысл величины микротвердости	ПК-3
Корреляция между величиной микротвердости и пределом текучести сильнодеформированного металла	ПК-3
Влияние частиц второй фазы на миграционную подвижность границ зерен. Уравнение Зинера.	ПК-3
Когерентные и некогерентные частицы второй фазы. Основные отличия	ПК-3
Влияние когерентных и некогерентных частиц второй фазы на предел текучести металла	ПК-3
Влияние плотности дислокаций (в случае хаотического распределения) на предел текучести металла	ПК-3
Влияние размера зерна на предел текучести сильнодеформированного металла	ПК-3
Влияние дефектов на электросопротивление металлов и сплавов. Правило Матиссенна.	ПК-3
Влияние распада твердого раствора на изменение удельного электросопротивления при отжиге	ПК-3
Процедура определения объемной доли выделившихся частиц второй фазы на основании анализа данных по измерению удельного электросопротивления	ПК-3
Процедура определения механизма распада твердого раствора на основании анализа данных по измерению удельного электросопротивления с использованием уравнения Джонсона-Мела-Аврами-Колмогорова	ПК-3
Процедура расчета размера выделяющихся частиц второй фазы на основании совместного анализа данных по изменению микротвердости и удельного электросопротивления при отжиге металла	ПК-3
Определение механизма роста частиц второй фазы на основании анализа кинетики роста частиц	ПК-3



### 5.2.2 Тематика лабораторных работ

1. Исследование процессов рекристаллизации при отжиге сильнодеформированных мелкозернистых металлов и сплавов.
2. Исследование процессов распада твердого раствора при отжиге литых и сильнодеформированных сплавов.

### 5.2.3 Типовые задания для текущего контроля успеваемости

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.

#### 5.2.4 Типовые задачи для текущего контроля успеваемости

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-3 ат.%Cu?
4. Считая, что выделения частиц  $\text{Fe}_3\text{C}$  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  $\tau_{\text{dif}}=10$  с, а также определить температуру, при которой происходило измерение величины коэффициента зернограницной диффузии (при расчетах принять величину предэкспоненциального множителя равной  $\delta D_{b0}=5 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3/\text{с}$ , температура плавления  $T_m=1356 \text{ К}$ , вектор Бюргерса  $b=0.256 \text{ нм}$ ).
6. На поверхность чистого железа был напылён слой графита, после чего полученный образец подвергли отжигу при температуре  $500^\circ\text{C}$  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  $T_m=1810 \text{ К}$ , предэкспоненциальный множитель для коэффициента объемной диффузии  $D_{v0} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ , предэкспоненциальный множитель для коэффициента зернограницной диффузии  $\delta D_{b0} = 1.1 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ , вектор Бюргерса  $b=0.248 \text{ нм}$ ).
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 ( $100 \text{ мм}^3$ ), а концентрация углерода на поверхности образца равна нулю. (При расчетах принять плотность чистого железа равной  $7.8 \text{ г/см}^3$ ).
9. Образец сплава «железо – углерод» с начальным содержанием углерода 0.8 вес.% (сталь У8), имеющего форму квадрата и площадь каждой из сторон  $20 \text{ см}^2$ , подвергают отжигу. Рассчитайте количество (в граммах) испарившего с поверхности образца углерода, если его коэффициент диффузии в железе составляет  $D_v=10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$ , а плотность железа равна  $7.8 \text{ г/см}^3$ ).
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  $C_0=1.2 \text{ вес.}\%$  (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  $800^\circ\text{C}$ , 0.156 мм при температуре  $850^\circ\text{C}$  и 0.321 мм при температуре  $1000^\circ\text{C}$ . 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  $D_0 = 0.15$  [см<sup>2</sup>/с], энергия активации  $Q = 6$  кДж/моль, 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,  $D_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с,  $Q_v = 197$  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 см<sup>2</sup>. 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  $k = 10^{-6}$  см/с и  $10^{-4}$  см/с. При расчетах примите, что коэффициент диффузии не зависит от концентрации и составляет  $D = 4 \cdot 10^{-8}$  см<sup>2</sup>/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 ( $x=0$ ):  $dC/dx = -h \cdot (C_1 - C)$ , 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  $5 \cdot 10^{-10}$  см<sup>2</sup>/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/м<sup>2</sup>.
18. Определите энергию активации образования зародыша для гомогенного зарождения при температуре 500 °С, считая, что скорость зародышеобразования при данной температуре составляет  $10^7$  м<sup>3</sup>/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  $5 \times 10 \times 100$  мм при температуре  $500^\circ\text{C}$ ? Какие данные Вам необходимы для расчета?
21. Во сколько раз концентрация вакансий в алюминии при  $600^\circ\text{C}$  больше, чем при  $300^\circ\text{C}$ ?

#### 5.2.5 Типовые экзаменационные задачи

Задача 1: В процессе рекристаллизационного отжига сильнодеформированного мелкозернистого сплава Al-0.3вес.%Sc (размер зерна 0.2 мкм) выделяются когерентные частицы – интерметаллиды  $\text{Al}_3\text{Sc}$  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  $\text{Al}_3\text{Zr}$ , величина удельного электросопротивления сплава уменьшилась на  $0.6 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$ . При этом величина предела макроупругости увеличилась от 20 МПа до 100 МПа.

*Рассчитайте объемную долю и средний размер выделившихся частиц  $\text{Al}_3\text{Zr}$ .*

(При расчетах принять: модуль сдвига  $G=25.4 \text{ ГПа}$ , вектор Бюргерса  $b=0.285 \text{ нм}$ , вклад циркония в удельное электросопротивление алюминия –  $5.85 \text{ мкОм}\cdot\text{см}/\text{ат.}\%$ . Полному распаду твердого раствора циркония в алюминии соответствует выделение 1об.% частиц  $\text{Al}_3\text{Zr}$ . Удельное электросопротивление чистого алюминия составляет  $2.7 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$ ).

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  $10^{12} \text{ м}^{-2}$ .

Рассчитайте величину предела макроупругости и предела текучести стали.

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

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

*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  $10^6 \text{ с}^{-1}$ , пороговое напряжение течения при  $T=0\text{К}$  -  $\sigma^*=1.7 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ).

Задача 6. Пластическая деформация, сопровождающаяся измельчением зеренной структуры железа, привела к повышению скорости пластической деформации при температуре 600 °С, соответствующей стадии ползучести по Коблу, от  $6 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$  до  $9 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  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  $10^6 \text{ с}^{-1}$ , пороговое напряжение течения при  $T=0\text{К}$  -  $\sigma^*=1.7 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ).

#### 5.2.6 Дополнительные вопросы на экзамене и зачете для контроля знаний

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 зернограницной и объемной диффузии?
8. Что такое прочность? Какие характеристики прочности Вы знаете? С какими прочностными характеристиками коррелирует микротвердость и почему? Между какими физическими величинами допускается строить корреляции?
9. Почему различные вклады (от различных дефектов) складываются при расчете величины предела текучести? Объясните причины, по которым при расчете предела текучести материала может быть использован принцип аддитивности различных вкладов.
10. Чем объясняются высокие электро- и теплопроводность металлов? Почему в металлах коррелируют электро- и теплопроводность?
11. Почему при нагреве электропроводность металлов уменьшается, а керамик – увеличивается?
12. Почему электропроводность металлов уменьшается при внесении дефектов? Объясните физический смысл правила Матиссена.
13. Почему частицы второй фазы дают ничтожно малый вклад в повышение электросопротивления по сравнению с вкладом твердого раствора?
14. От чего зависит масштаб повышения удельного электросопротивления сплава при его легировании?
15. С чем связана высокая пластичность металлов по сравнению с керамиками?
16. Причина проявления полиморфизма в металлах при нагревании.
17. Обоснуйте с точки зрения физики, почему при нагреве плотность дефектов должна уменьшаться.
18. 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?
19. 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.
20. 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?

21. Как определить характер процесса рекристаллизации (первичная, собирательная) на основании результатов металлографического исследования?
22. Как рассчитать микротвердость металла на основании измерения диагонали отпечатка?
23. Каковы границы применимости метода микротвердости? В чем состоят физические основы этого метода?
24. Зачем так много характеристик прочности вводятся для металлов и сплавов (физический предел упругости, условный предел упругости, физический предел текучести, условный предел текучести, предел прочности)? Что характеризует площадь под кривой «напряжение – деформация»?
25. Как сосчитать плотность дислокаций в случае хаотического распределения? Как сосчитать плотность дислокаций в случае образования субструктуры?
26. В чем состоят физические основы метода металлографического исследования дефектной структуры металлов с использованием оптического (интерференционного) микроскопа?
27. 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?
28. Опишите процедуру расчета погрешностей при определении объемной доли рекристаллизованной структуры металлографическим методом.
29. Опишите процедуру расчета погрешностей при определении энергии активации первичной рекристаллизации.
30. Опишите процедуру расчета погрешностей при измерении микротвердости.
31. Опишите процедуру расчета погрешностей при измерении удельного электросопротивления вихретоковым методом.
32. 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.
33. Опишите процедуру расчета объемной доли выделившихся частиц на основании данных измерения удельного электросопротивления.
34. Опишите процедуру определения механизма выделения частиц второй фазы на основании анализа данных измерения удельного электросопротивления.
35. 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.
36. Опишите процедуру определения механизма роста частиц второй фазы на основании совместного анализа данных по измерению электропроводности и микротвердости.
37. Опишите процедуру определения среднего размера выделившихся частиц второй фазы на основании результатов измерения удельного электросопротивления и результатов металлографического исследования.
38. 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.

## **6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **а) основная литература**

1. 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. (электронное издание, [http://www.unn.ru/books/met\\_files/Recrystallization.pdf](http://www.unn.ru/books/met_files/Recrystallization.pdf))
2. Гегузин Я.Е. Очерки о диффузии в кристаллах – М.: Наука, 1974 [Доступ через электронную библиотеку EqWord: <http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Geguzin1974ru.djvu>].

3. Перевезенцев В.Н., Щербань М.Ю. Рекристаллизация металлов и сплавов. Учебное пособие – Н.Новгород, ННГУ, 2000, 62 с. [3 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
4. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978, 568 с. [8 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
5. Физическое металловедение в 3 т. / Под ред. Р.У. Кана, П. Хаазена, пер. с англ. под ред. О.В. Абрамова, 3-е изд. перераб и доп. / Том 1. Атомное строение металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1987. 638 с. [8 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
6. Физическое металловедение в 3 т. / Под ред. Р.У. Кана, П. Хаазена, пер. с англ. под ред. О.В. Абрамова, 3-е изд. перераб. и доп. / Т. 2: Фазовые превращения в металлах и сплавах и сплавы с особыми физическими свойствами. – М.: Металлургия, 1987. 621 с. [6 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
7. Физическое металловедение в 3 т. / Под ред. Р.У. Кана, П. Хаазена, пер. с англ. под ред. О.В. Абрамова, 3-е изд. перераб. и доп. / Т. 3: Физико-механические свойства металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1987. 661 с. [6 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
8. Чувильдеев В.Н. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения – М.: Физматлит, 2004, 303 с. [доступно авторизованным пользователям через электронно-библиотечную систему «ЛАНЬ»: [https://e.lanbook.com/book/59342?category\\_pk=925#book\\_name](https://e.lanbook.com/book/59342?category_pk=925#book_name)]. [8 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
9. Глейтер Г., Челмерс Б. Большеугловые границы зерен. – М.: Мир, 1975, [8 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
10. Орлов А.Н., Перевезенцев В.Н., Рыбин В.В. Границы зерен в металлах. М. Металлургия, 1980. 154 с. [2 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
11. Перевезенцев В.Н., Сарафанов Г.Ф. Фрагментация при пластической деформации металлов. Учебное пособие – Н.Новгород, ННГУ, 2007, 127 с. [2 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
12. 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. [[http://www.unn.ru/books/met\\_files/NokhrinAV.pdf](http://www.unn.ru/books/met_files/NokhrinAV.pdf)].
13. Готтштайн Г. Физико-химические основы современного материаловедения – М.: БИНОМ, 2014, 403 с. [доступно авторизованным пользователям через электронно-библиотечную систему «Znanium.com»: <http://znanium.com/bookread2.php?book=539831>].
14. Лившиц В.Г. Металлография – М.: Металлургия, 1990, 333 с. [4 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
15. Кример Б.И., Панченко Е.В., Шишко Л.А. и др. Лабораторный практикум по металлографии и физическим свойствам металлов и сплавов. Под ред. Б.Г. Лившица – М.: Металлургия, 1966, 248 с. [3 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
16. Трушин Ю.В. Физическое материаловедение – СПб.: Наука, 2000, 286 с. [32 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].

б) дополнительная литература

1. Лахтин Ю.М. Основы материаловедения. Учебник – М.: Инфа-М, 2013, 272 с. [доступно авторизованным пользователям через электронно-библиотечную систему «Znanium.com»: <http://znanium.com/bookread2.php?book=363145>]. [3 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
2. Федотов А.К. Физическое материаловедение. В 3 частях. Часть 2. Фазовые превращения в металлах и сплавах – Минск: Высшая школа, 2012, 449 с. [доступно авторизованным пользователям через электронно-библиотечную систему «Znanium.com»: <http://znanium.com/bookread2.php?book=508082> или через электронно-библиотечную систему «ЛАНЬ»: [https://e.lanbook.com/book/65429?category\\_pk=925#book\\_name](https://e.lanbook.com/book/65429?category_pk=925#book_name)].
3. Чувильдеев В.Н., Нохрин А.В., Пирожникова О.Э., Смирнова Е.С., Грязнов М.Ю., Макаров И.М., Лопатин Ю.Г., Щавлева А.В., Копылов В.И. Стабильность структуры нано- и



- микрокристаллических материалов, полученных методами интенсивного пластического деформирования. – Н.Новгород, изд-во ННГУ, 2006, 189 с. [1 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
4. Черепяхин А.А., Смолькин А.А. Материаловедение. Учебник – М.: Инфа-М, 2016, 290 с. [доступно авторизованным пользователям через электронно-библиотечную систему «Znanium.com»: <http://znanium.com/bookread2.php?book=550194>].
  5. Сироткин О.С. Основы современного материаловедения. Учебник – М.: Инфа-М, 2015, 364 с. [доступно авторизованным пользователям через электронно-библиотечную систему «Znanium.com»: <http://znanium.com/bookread2.php?book=432594>].
  6. Бокштейн Б.С. Термодинамика и кинетика диффузии в твердых телах – М.: Metallurgy, 1974, 280 с. [1 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
  7. Бокштейн Б.С. Структура и свойства внутренних поверхностей раздела в металлах – М.: Наука, 1988, 270 с. [2 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
  8. Бокштейн Б.С. Атомы блуждают по кристаллу – М.: Наука, 1984, 207 с. [1 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
  9. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. Учебное пособие – М.: Metallurgy, 1978, 248 с. [2 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
  10. Мартин Дж. Микромеханизмы дисперсионного твердения сплавов» - М.: Metallurgy, 1988. 167 с. [доступно через электронную библиотеку Исследовательской школы «Наноматериалы и нанотехнологии» ННГУ: <http://www.nanotech.unn.ru/sites/default/files/martin.pdf>]
  11. Мартин Д.У., Доэрти Р. Стабильность микроструктуры металлических систем – М.: Атомиздат, 1978, 280 с. [1 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
  12. Кристиан Дж. Теория превращения в металлах и сплавах. М.: Мир, 1978. 356 с. [1 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
  13. Фрост Г. Дж., Эшби М.Ф. Карты механизмов деформации. Челябинск: Metallurgy, 1989. – 328 с. [1 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
  14. Орлов А.Н. Введение в теорию дефектов кристалла. М. Высшая школа, 1983. 150 с. [доступно через электронную библиотеку Исследовательской школы «Наноматериалы и нанотехнологии» ННГУ: [http://www.nanotech.unn.ru/sites/default/files/a.n.\\_orlov\\_vvedenie\\_v\\_teoriyu\\_defektov.djvu](http://www.nanotech.unn.ru/sites/default/files/a.n._orlov_vvedenie_v_teoriyu_defektov.djvu)].
  15. Шепелевич В.Г. Физика металлов и материаловедение. Лабораторный практикум – Минск: Высшая школа, 2012, 169 с. [доступно авторизованным пользователям через электронно-библиотечную систему «Znanium.com»: <http://znanium.com/bookread2.php?book=508814>].
  16. Кислов А.Н. и др. Сопротивление материалов: Лабораторный практикум. Учебное пособие для ВУЗов. Под ред. А.А. Полякова – М.: изд-во Юрайт, 2017, 127 с. [доступно через электронную библиотеку «Юрайт»: <https://biblio-online.ru/book/5C77B05B-BC99-4E4F-90F4-1A31BBCB635F>].
  17. Адашкин А.М., Седов Ю.Е., Онегина А.К., Климов В.Н. Материаловедение в машиностроении. В 2 частях. Часть 1. Учебник для академического бакалавриата – М.: Издательство Юрайт, 2017. 258 с. доступно через электронную библиотеку «Юрайт»: <https://biblio-online.ru/book/D25736F8-D240-4438-A933-DB8B6C502004>].
  18. Адашкин А.М., Седов Ю.Е., Онегина А.К., Климов В.Н. Материаловедение в машиностроении. В 2 частях. Часть 2. Учебник для академического бакалавриата – М.: Издательство Юрайт, 2017. 258 с. [доступно через электронную библиотеку «Юрайт»: <https://biblio-online.ru/book/BCDD265E-CB43-45A9-B980-FADB91F1D83C>].
  19. Материаловедение и технология материалов в 2 ч. Часть 1: учебник для академического бакалавриата / Г. П. Фетисов [и др.]; отв. ред. Г. П. Фетисов. - М. : Издательство Юрайт, 2017. 385 с. [доступно через электронную библиотеку «Юрайт»: <https://biblio-online.ru/viewer/B7535AE0-7A04-4F47-B1CB-E80D5F960EA0#page/2>].
  20. Материаловедение и технология материалов в 2 ч. Часть 2: учебник для академического бакалавриата / Г. П. Фетисов [и др.]; отв. ред. Г. П. Фетисов. - М. : Издательство Юрайт,



2017. 389 с. [доступно через электронную библиотеку «Юрайт»: <https://biblio-online.ru/book/FD76D572-7258-4816-86FD-678C24AC480B>].
21. Диденко И.С., Козлова Н.С., Кугаенко О.М., Петраков В.С. Физика реального кристалла. Лабораторный практикум. – М.: НИТУ «МИСИС», 2013, 76 с. [доступно авторизованным пользователям через электронно-библиотечную систему «ЛАНЬ»: [https://e.lanbook.com/book/51699?category\\_pk=925#book\\_name](https://e.lanbook.com/book/51699?category_pk=925#book_name)].
  22. Рекристаллизация металлических материалов. Под ред. Ф. Хеснера – М.: Металлургия, 1982, 352 с. [1 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
  23. Гегузин Я.Е. Очерки о диффузии в кристаллах – М.: Наука, 1984, 311 с. [1 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
  24. Павлов П.Ф., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела – М.: Высшая школа, 2000, 494 с. [35 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
  25. Эшби М.Ф., Джонс Д.Р.Х. Конструкционные материалы – Долгопрудный: Интеллект, 2010, 672 с. [1 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
  26. Розенберг В.М. Ползучесть металлов – М.: Металлургия, 1967, 276 с. [2 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
  27. Пуарье Ж.П. Высокотемпературная пластичность кристаллических тел – М.: Металлургия, 1982, 272 с. [2 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
  28. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов – М.: Металлургия, 1984, 280 с. [2 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
  29. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов – М.: Металлургия, 1975, 454 с. [4 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

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://www.sciencedirect.com> – сайт международного издательства «Elsevier», публикующего статьи и монографии по актуальным направлениям физического материаловедения, совпадающим с тематикой отдельных разделов преподаваемой дисциплины.
5. <http://elibrary.ru/defaultx.asp> - российская научная электронная библиотека «Elibrary», публикующая статьи, тематика которых совпадает с тематикой отдельных разделов преподаваемой дисциплины.
6. <http://znanium.com> – сайт электронно-библиотечной системы «Znanium.com», содержащий книги по отдельным разделам дисциплины.
7. <http://eqworld.ipmnet.ru/> - сайт электронной библиотеки EqWord, содержащий книги по отдельным разделам дисциплины.

## 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Библиотечные залы и компьютерные классы ННГУ и НИФТИ ННГУ, обеспечивающие доступ к Интернет – ресурсам. Для чтения лекций со стороны физического факультета и НИФТИ ННГУ предоставляются аудитории с презентационным оборудованием.

Для выполнения лабораторных работ со стороны НИФТИ ННГУ предоставляется доступ к оборудованию, необходимому для проведения практических занятий, в том числе:

- литейная машина «INDUTHERM VTC-200».
- воздушные муфельные печи типа «ЧОЛ» для термической обработки металлов на воздухе;
- лабораторный прокатный стан;
- металлографические микроскопы Leica DM IRM для исследования макроструктуры сплавов.
- растровый электронный микроскоп Jeol JSM-6490 с энергодисперсионным микроанализатором INCA 350.

- испытательная машина Tinius Olsen H25K-S, оборудованная системой для проведения испытаний на растяжение, сжатие, изгиб, малоцикловую усталость и ползучесть.
- автоматизированный микротвердомер VHS-100;
- прибор для измерения электропроводности «SIGMATEST 2.069» вихретоковым методом.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО с учетом рекомендаций и ООП ВО по направлению 03.03.02 - Физика, профиля «Физика конденсированного состояния».

Авторы д.ф.-м.н. Нохрин А.В., д.ф.-м.н., проф. Чувильдеев В.Н.

Заведующий кафедрой: д.ф.-м.н., проф. Чувильдеев В.Н.

Рецензент:

Зам. декана физического факультета Белова О.В.

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ от «20» мая 2023 года, протокол № б/н

Председатель

Учебно-методической комиссии

физического факультета ННГУ \_\_\_\_\_ / Перов А.А. /