

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  
«30» ноября 2022 г. №13

## **Рабочая программа дисциплины**

**Физика больших пластических деформаций и современные  
методы получения ультрамелкозернистых материалов**

(наименование дисциплины (модуля))

**Уровень высшего образования**

**Магистратура**

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

**Направление подготовки**

**03.04.02 - Физика**

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

**Направленность образовательной программы**

**Физика конденсированного состояния**

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

**Квалификация (степень)**

**Магистр**

(бакалавр / магистр / специалист)

**Форма обучения**

**Очная**

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород - 2023

## 1. Место и цели дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Физика больших пластических деформаций и современные методы получения ультрамелкозернистых материалов» (Б1.В.ДВ.03.04) относится к части, формируемой участниками образовательных отношений ООП. Дисциплина является дисциплиной выбора для изучения на 1 курсе обучения магистратуры, во 2 семестре.

Место дисциплины в учебном плане образовательной программы	Характеристика дисциплины
Блок 1. Дисциплины (модули). Часть, формируемая участниками образовательных отношений	Дисциплина Б1.В.ДВ.03.04 относится к части, формируемой участниками образовательных отношений ООП направления подготовки 03.04.02 Физика

Целями освоения дисциплины являются:

- познакомить студентов с основными методами формирования ультрамелкозернистой структуры в металлах и сплавах, их преимуществами и недостатками в сравнении друг с другом;
- познакомить студентов с основными понятиями теории неравновесных границ зерен в металлах, необходимых для описания закономерностей эволюции структуры и физико-механических свойств, а также описания (объяснения) эффектов, наблюдающихся в ультрамелкозернистых металлах и сплавах;
- познакомить студентов с основными эффектами и закономерностями, проявляющимися в ультрамелкозернистых металлических материалах, получаемых с использованием методов интенсивного пластического деформирования;
- научить описывать явления, протекающие в ультрамелкозернистых металлах и сплавах при их термической обработке и деформации на языке физики металлов, теории дефектов и теории неравновесных границ зерен в металлах;
- научить составлять рекомендации по выбору оптимальных режимов термической обработки и деформации ультрамелкозернистых металлов и сплавов, обеспечивающие их повышенные физико-механические свойства и служебные характеристики;
- научить студентов использовать теоретические знания в области физики металлов и теории неравновесных границ зерен для решения практических задач, связанных с изучением закономерностей эволюции структуры и физико-механических свойств ультрамелкозернистых металлов и сплавов;
- выработать навыки анализа многофакторных экспериментальных результатов, получаемых при исследовании сложных физических процессов в ультрамелкозернистых металлах и сплавах.

## 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, в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции	Результаты обучения по дисциплине	
ПК-3. Способен свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять	ПК-3.1 Знание основных законов физики	Знать: З1: Знать основные методы формирования ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры в металлических материалах с использованием	Собеседование Тест

результаты научных исследований в инновационной и проектной деятельности		технологий интенсивного пластического деформирования. 32: Знать основные положения теории неравновесных границ зерен в металлах, необходимые для описания закономерностей эволюции структуры и свойств УМЗ металлов и сплавов. 33: Знать основные закономерности фрагментации структуры металлов и сплавов при интенсивной пластической деформации. 34: Знать основные закономерности протекания процессов возврата и рекристаллизации при нагреве УМЗ металлов и сплавов. 35: Знать характер влияния параметров микроструктуры УМЗ металлов и сплавов на их физико-механические свойства. Основные закономерности изменения механических свойств УМЗ металлов и сплавов при отжиге. 36: Знать особенности сверхпластической деформации УМЗ сплавов.	Собеседование Тест  Реферат Собеседование Тест  Реферат Собеседование Тест  Реферат Собеседование Тест  Реферат Собеседование Тест
	ПК-3.2 Умение решать научно-инновационные задачи в своей инновационной и проектной деятельности	У1: Уметь объяснять закономерности эволюции структуры и физико-механических свойств металлов и сплавов при интенсивной пластической деформации и последующем отжиге на языке теории неравновесных границ зерен. У2: Уметь обосновывать выбор оптимальных режимов применения (эксплуатации) УМЗ металлов и сплавов с использованием карт механизмов деформации и разрушения.	Собеседование       Собеседование

	<p>ПК-3.3 Навыки применения результатов научных исследований в инновационной и проектной деятельности</p>	<p>В1: Владеть навыками физического анализа результатов экспериментальных исследований структуры и свойств УМЗ металлов, и их интерпретации с использованием теории неравновесных границ зерен, а также профессиональных знаний в соответствующих областях физики металлов, сплавов и керамик.</p> <p>В2: Владеть навыками решения задач по расчету параметров микроструктуры и физико-механических свойств УМЗ металлов и сплавов с использованием подходов теории неравновесных границ зерен и базовых моделей физического материаловедения.</p>	<p>Собеседование</p> <p>Задачи (практические задания)</p>
--	---	--	---

### 3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 4 зачетных единицы, всего 144 часа, из которых 34 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (16 часов занятия лекционного типа, 16 часов – практические занятия, 2 часа контроль самостоятельной работы), 65 часов составляет самостоятельная работа обучающегося и 45 часов составляют мероприятия промежуточного контроля успеваемости (подготовка студентов к экзамену).

Очная форма обучения	
Общая трудоемкость	4 з.е.
Часов по учебному плану в том числе	144
аудиторные занятия (контактная работа):	32
- занятия лекционного типа, ч	16
- практические занятия, ч	16
самостоятельная работа, ч	65
КСРИФ	2
Промежуточная аттестация	Экзамен

## 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: Основные методы формирования ультрамелкозернистой структуры с использованием технологий интенсивного пластического деформирования. Фрагментация металлов и сплавов при интенсивной пластической деформации.	30	4	4	-	-	8	22
Тема 2: Процессы возврата и рекристаллизации при отжиге ультрамелкозернистых металлов и сплавов	28	4	4	-	-	8	20
Тема 3: Физико-механические свойства ультрамелкозернистых металлов и сплавов	28	4	4	-	-	8	20
Тема 4: Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов	20	4	4	-	-	8	12
В том числе мероприятия текущего контроля – 2 часа							
Промежуточная аттестация:							
Экзамен 36 часов на промежуточный контроль успеваемости							

Тема 1: Основные методы формирования ультрамелкозернистой структуры с использованием технологий интенсивного пластического деформирования. Фрагментация металлов и сплавов при интенсивной пластической деформации.

Классификация материалов по размеру зерна: мелкозернистые, ультрамелкозернистые (субмикроструктурные) и нанокристаллические материалы. Ключевые методы интенсивной пластической деформации (ИПД) для формирования ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры в металлических материалах: равноканальное угловое прессование, кручение под квазигидростатическим давлением, различные видыковки. Основные преимущества и недостатки каждого метода формирования УМЗ структуры.

Основные аномалии в структуре и физико-механических свойствах УМЗ материалов, полученных методами ИПД: малый размер зерна, неравновесные большеугловые границы зерен, повышенная плотность дефектов, низкая термическая стабильность структуры, высокая прочность, аномалии в соотношении Холла-Петча, аномалии в реологии сверхпластического течения УМЗ материалов, эффект одновременного повышения прочности и пластичности в УМЗ материалах.

Феноменология измельчения зеренной структуры металлов и сплавов при ИПД. Понятие о пределе диспергирования зерен при ИПД. Влияние температуры и скорости ИПД на средний размер зерна (предел диспергирования) и диффузионные свойства границ зерен УМЗ металлов. Язык теории неравновесных границ зерен – основной способ описания эффектов и аномалий в УМЗ материалах, полученных методами ИПД. Основные уравнения теории неравновесных границ зерен в металлах.

Модель расчета величины предела диспергирования при ИПД. Причины двухстадийного характера зависимости предела диспергирования от температуры ИПД. Влияние температуры и скорости ИПД на величину коэффициента зернограницной диффузии в УМЗ материалах. Решение задач по различным разделам темы №1.

## Тема 2: Процессы возврата и рекристаллизации при отжиге ультрамелкозернистых металлов и сплавов

Увеличение плотности дислокаций ориентационного несоответствия, а также продуктов их делокализации (нормальных и скользящих компонент делокализованных дислокаций) в границах зерен УМЗ металлов при ИПД. Зависимость коэффициента зернограницной диффузии и энергии активации зернограницной диффузии от плотности дефектов в границах зерен УМЗ материалов. Дислокации ориентационного несоответствия и скользящие компоненты делокализованных дислокаций как источник избыточного свободного объема границ зерен.

Ключевые отличия в кинетике и механизмах процессов возврата в обычных крупнокристаллических и УМЗ материалах: кинетика возврата в крупнокристаллических материалах за счет переползания решеточных дислокаций и кинетика зернограницного возврата в УМЗ материалах. Основные уравнения, описывающие кинетику возврата в УМЗ материалах в случае стабильной микроструктуры. Зависимость плотности дефектов, энергии активации и коэффициента зернограницной диффузии от времени отжига и размера зерна в условиях стабильной микроструктуры. Влияние температуры ИПД и времени вылежки на степень неравновесности границ зерен УМЗ материалов и кинетику зернограницного возврата.

Ключевые отличия в кинетике и механизмах процессов рекристаллизации в обычных крупнокристаллических и в УМЗ материалах. Влияние степени и температуры ИПД на температуру начала рекристаллизации и характер миграции границ зерен в УМЗ материалах. Модель расчета температуры начала рекристаллизации в чистых УМЗ металлах. Модель расчета скорости аномального роста зерен при отжиге УМЗ металлов. Модель эффекта ускорения диффузии при аномальном росте зерен УМЗ материалов.

Решение задач по различным разделам темы №2.

## Тема 3: Физико-механические свойства ультрамелкозернистых металлов и сплавов

Прочность УМЗ металлов и сплавов. Проблемы соотношения Холла-Петча в УМЗ материалах. Модель расчета параметров соотношения Холла-Петча в УМЗ материалах: предел макроупругости и предел текучести в УМЗ металлах. Эффект аномального упрочнения при отжиге УМЗ материалов: основные экспериментальные факты. Модель влияния возврата и миграции границ зерен на параметры соотношения Холла-Петча в УМЗ материалах. Условия проявления эффекта аномального упрочнения при отжиге УМЗ материалов.

Эффект одновременного повышения прочности и пластичности УМЗ материалов при комнатной температуре: основные экспериментальные факты. Проблема предельной прочности и предельной пластичности УМЗ материалов при комнатной температуре. Модель влияния параметров микроструктуры и условий испытаний (температуры и скорости деформации) на предельную прочность и предельную пластичность УМЗ материалов. Условия проявления эффекта одновременного повышения прочности и пластичности в УМЗ материалах.

Решение задач по различным разделам темы №3.

## Тема 4: Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов

Феноменология сверхпластичности в УМЗ материалах: эффекты низкотемпературной и высокоскоростной сверхпластичности; эффект оптимального размера зерна для сверхпластичности УМЗ материалов.

Эффект ускорения зернограницной диффузии при сверхпластичности УМЗ материалов. Основные уравнения теории неравновесных границ зерен, описывающие кинетику накопления дефектов на границах зерен УМЗ металлов в условиях сверхпластической деформации. Влияние

температуры и скорости сверхпластической деформации на коэффициент зернограницной диффузии УМЗ материалов.

Модель расчета оптимального размера зерна для сверхпластичности УМЗ материалов. Физические причины «проявления» эффекта оптимального размера зерна при сверхпластичности. Влияние роста зерен на сверхпластичность УМЗ материалов.

Особенности деформационного упрочнения при сверхпластичности УМЗ металлов и сплавов. Накопление связь кинетики накопления дефектов на границах зерен и вида кривой деформационного упрочнения в условиях сверхпластичности УМЗ сплавов. Модель расчета напряжения течения при сверхпластической деформации УМЗ сплавов.

Решение задач по различным разделам темы №4.

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 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 придти 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.6 настоящей рабочей программы дисциплины.

Основной целью самостоятельной работы является решение задач, заданных преподавателем для самостоятельного разбора. Для проведения самостоятельной работы обучающимся предоставляются свободные аудитории, доступ к компьютерной технике.

#### 5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине, включающий:

##### 5.1 Описание шкал оценивания

Индикаторы компетенции	ОЦЕНКИ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИЙ						
	Плохо	Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Очень хорошо	Отлично	Превосходно
	Не зачтено		Зачтено				
<b>Полнота знаний</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>Наличие умений</b>	Отсутствие минимальных умений.	При решении стандартных задач не	Продемонстрированы основные	Продемонстрированы все основные	Продемонстрированы все основные	Продемонстрированы все основные	Продемонстрированы все основные

	Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки.	умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме.	умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме.	умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<b>Наличие навыков (владение опытом)</b>	Отсутствие владения материалом. 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	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач
<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 качества	Учебная активность и мотивация проявляются на уровне выше среднего, демонстрируется готовность выполнять большинство поставленных задач на высоком уровне качества	Учебная активность и мотивация проявляются на высоком уровне, демонстрируется готовность выполнять все поставленные задачи на высоком уровне качества	Учебная активность и мотивация проявляются на очень высоком уровне, демонстрируется готовность выполнять 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



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»)), общие критерии выставления оценок по которой определены приказом ректора ННГУ №229-ОД от 10 октября 2002 г.:

<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.
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.
Очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета, самостоятельно решает задачу и отвечает на вопросы (задания) преподавателя с небольшими неточностями.
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).
Удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий, может решить типовую задачу с помощью преподавателя.
Неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Задача не решена. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.
Плохо	Подготовка совершенно недостаточна. Последующая пересдача возможна только с комиссией.

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:

- практические контрольные задания повышенной сложности (факультативные задачи или практические задания) (текущий контроль, промежуточная аттестация).

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

### 5.2.1 Типовые контрольные вопросы (темы для собеседования)

1. Общая характеристика ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов. Характерные отличия структуры УМЗ материалов от наноматериалов и обычных мелкозернистых материалов.

Основные методы интенсивного пластического деформирования (ИПД). Основные аномалии (эффекты), наблюдаемые в физико-механических свойствах УМЗ материалов.

2. Понятие о пределе диспергирования зерен при большой пластической деформации металлов и сплавов. Модель расчета предела диспергирования зерен при ИПД. Влияние температуры и скорости ИПД на предел диспергирования зерен и диффузионные свойства границ зерен УМЗ материалов.
3. Кинетика процессов возврата в УМЗ материалах. Характер зависимости энергии активации и коэффициента зернограницной диффузии от времени отжига. Влияние процессов возврата на механические свойства УМЗ материалов.
4. Особенности процессов рекристаллизации в УМЗ материалах. Модель расчета температуры начала рекристаллизации в УМЗ металлах. Влияние температуры ИПД на температуру начала рекристаллизации УМЗ металлов.
5. Аномальный рост зерен при отжиге УМЗ металлов. Эффект ускорения зернограницной диффузии при миграции границ зерен в УМЗ материалах.
6. Особенности проявления эффекта Холла-Петча в УМЗ материалах. Расчет параметров соотношения Холла-Петча в УМЗ материалах. Влияние температуры ИПД на параметры соотношения Холла-Петча в УМЗ материалах.
7. Влияние рекристаллизации на параметры соотношения Холла-Петча в УМЗ материалах. Эффект аномального упрочнения при отжиге УМЗ металлов. Условия проявления эффекта аномального упрочнения при отжиге УМЗ металлов.
8. Эффект одновременного повышения прочности и пластичности в УМЗ материалах. Влияние размера зерна и структурного состояния границ зерен на прочность и пластичность в УМЗ материалах. Условия проявления эффекта одновременного повышения прочности и пластичности в УМЗ материалах.
9. Сверхпластичность УМЗ материалов. Основные уравнения. Низкотемпературная и высокоскоростная сверхпластичность УМЗ материалов. Эффект ускорения зернограницной диффузии при сверхпластической деформации УМЗ материалов.
10. Влияние размера зерна и структурного состояния границ зерен на предельные характеристики сверхпластической деформации УМЗ материалов. Модель расчета оптимального размера для сверхпластической деформации УМЗ материалов.
11. Деформационное упрочнение в условиях сверхпластической деформации УМЗ сплавов. Модель расчета напряжения течения в условиях сверхпластической деформации. Влияние размера зерна и структурного состояния границ зерен на деформационное упрочнение УМЗ сплавов в условиях сверхпластической деформации.
12. Эффект одновременного повышения прочности и пластичности в УМЗ материалах: основные закономерности. Физические причины проявления эффекта одновременного повышения прочности и пластичности. Расчет оптимального размера зерна УМЗ материала, при котором проявляется эффект одновременного повышения прочности и пластичности.

#### 5.2.2 Типовые практические задания (аналитические задачи)

1. Запишите уравнение, описывающее зависимость величины коэффициента зернограницной диффузии от скорости миграции границ зерен.
2. Запишите уравнение, описывающее зависимость величины коэффициента зернограницной диффузии от скорости сверхпластической деформации.
3. Запишите уравнение для расчета величины предела текучести (напряжения течения) УМЗ металла в случае образования плоских дислокационных скоплений у неравновесных границ зерен.
4. Запишите уравнение для расчета величины предела текучести (напряжения течения) УМЗ металла в случае отсутствия (невозможности образования) плоских дислокационных скоплений у неравновесных границ зерен.
5. Запишите уравнение для расчета величины критического размера зерна, при котором в УМЗ материалах перестают образовываться дислокационные скопления.

6. Запишите уравнение для расчета оптимальной скорости сверхпластической деформации УМЗ сплава.
7. Запишите уравнение для расчета оптимального размера зерна при сверхпластичности УМЗ сплава.
8. Запишите уравнение для расчета напряжения течения в условиях деформационного упрочнения при сверхпластичности в предположении, что в границе зерна доминируют ДОН.
9. Запишите уравнение для расчета напряжения течения в условиях деформационного упрочнения при сверхпластичности (зависимость напряжения течения от скорости и температуры сверхпластической деформации) в предположении, что в границе зерна доминируют ДОН.
10. Запишите уравнение для расчета напряжения течения в условиях деформационного упрочнения при сверхпластичности (зависимость напряжения течения от скорости и температуры сверхпластической деформации) в предположении, что в границе зерна доминируют скользящие компоненты делокализованных дислокаций.

### 5.2.3 Типовые практические задания в виде расчетных задач

1. Рассчитайте насколько изменится величина критического размера зерна меди, при котором перестает выполняться соотношение Холла-Петча, если в процессе ИПД в границы зерен внесена плотность ДОН  $\rho_b \Delta b = 4 \cdot 10^{-3}$ . (Модуль сдвига меди  $G = 64$  ГПа, вектор Бюргерса  $b = 0.254$  нм, напряжение течения  $\sigma_{\text{тек}} = 450$  МПа).
2. Рассчитайте какова будет величина коэффициента зернограницной диффузии в УМЗ меди после отжига  $250^\circ\text{C}$ , 1 ч, если начальная плотность ДОН составляла  $\rho_b \Delta b = 10^{-2}$ . (Величина предэкспоненциального множителя  $\delta D_{b0} = 5 \cdot 10^{-15}$  м<sup>3</sup>/с,  $T_m = 1356$  К, энергия активации диффузии по равновесным границам зерен в меди  $Q_b = 9.6$  кДж/моль).
3. Рассчитайте время инкубационного периода рекристаллизации УМЗ меди ( $d = 0.5$  мкм) при температуре  $250^\circ\text{C}$  и начальной плотности ДОН  $\rho_b \Delta b = 10^{-2}$  (Величина предэкспоненциального множителя  $\delta D_{b0} = 5 \cdot 10^{-15}$  м<sup>3</sup>/с, температура плавления  $T_m = 1356$  К).
4. Рассчитайте насколько уменьшится поле внутренних напряжений в УМЗ меди с начальной плотностью ДОН  $\rho_b \Delta b = 10^{-2}$  после отжига  $150^\circ\text{C}$ , 10 ч. (Величина предэкспоненциального множителя  $\delta D_{b0} = 5 \cdot 10^{-15}$  м<sup>3</sup>/с, температура плавления  $T_m = 1356$  К, модуль сдвига  $G = 64$  ГПа).
5. Рассчитайте насколько увеличится напряжение течения УМЗ меди при сверхпластичности при повышении скорости внутризеренной деформации от  $10^{-4}$  с<sup>-1</sup> до  $10^{-3}$  с<sup>-1</sup> при температуре  $T = 350^\circ\text{C}$ . При расчетах влиянием скользящих компонент вектора Бюргерса пренебречь. Начальную плотность ДОН принять равной нулю. (Величина предэкспоненциального множителя  $\delta D_{b0} = 5 \cdot 10^{-15}$  м<sup>3</sup>/с, температура плавления  $T_m = 1356$  К, модуль сдвига  $G = 64$  ГПа).
6. Рассчитайте насколько изменится скорость зернограницного проскальзывания в УМЗ меди при напряжении  $\sigma = 50$  МПа при повышении температуры от  $T = 350^\circ\text{C}$  до  $450^\circ\text{C}$ , если известно, что процесс нагрева привел к одновременному увеличению среднего размера зерна от  $0.5$  мкм до  $5$  мкм. (Величина предэкспоненциального множителя  $\delta D_{b0} = 5 \cdot 10^{-15}$  м<sup>3</sup>/с, температура плавления  $T_m = 1356$  К, модуль сдвига  $G = 64$  ГПа).
7. Процесс возврата привел к уменьшению плотности ДОН  $\rho_b \Delta b$  от  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$ . Рассчитайте насколько изменилась величина оптимального размера зерна для УМЗ меди, при котором наблюдается эффект одновременного повышения прочности и пластичности при комнатной температуре и скорости деформации  $10^{-3}$  с<sup>-1</sup> (Величина предэкспоненциального множителя  $\delta D_{b0} = 5 \cdot 10^{-15}$  м<sup>3</sup>/с, температура плавления  $T_m = 1356$  К, модуль сдвига  $G = 64$  ГПа).
8. Рассчитайте критическую скорость миграции границ зерен (при температурах  $100^\circ\text{C}$  и  $200^\circ\text{C}$ ), при которой в УМЗ меди (начальный размер зерна  $d_0 = 0.5$  мкм, плотность решеточных дислокаций  $\rho_v = 10^{14}$  м<sup>-2</sup>) будет наблюдаться эффект аномального упрочнения. При расчетах начальную плотность ДОН принять равной нулю. (Величина предэкспоненциального множителя  $\delta D_{b0} = 5 \cdot 10^{-15}$  м<sup>3</sup>/с, температура плавления  $T_m = 1356$  К, модуль сдвига  $G = 64$  ГПа, энергия активации диффузии по равновесным границам зерен  $Q_b = 104$  кДж/моль).

9. Рассчитайте насколько изменится величина коэффициента зернограницной диффузии при рекристаллизационном отжиге УМЗ меди ( $T_{отж}=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), если известно, что скорость миграции границ зерен составляет  $10^{-7}\text{ м/с}$ , а начальная плотность решеточных дислокаций  $\rho_v=10^{14}\text{ м}^{-2}$ . При расчетах пренебречь влиянием скользящих компонент делокализованных дислокаций и начальной плотностью ДОН (Величина предэкспоненциального множителя  $\delta D_{b0}=5\cdot 10^{-15}\text{ м}^3/\text{с}$ , температура плавления  $T_m=1356\text{ К}$ , энергия активации диффузии по равновесным границам зерен  $Q_b=104\text{ кДж/моль}$ ).
10. Сколько времени можно хранить УМЗ медь при комнатной температуре (начальный размер  $d_0=0.5\text{ мкм}$ , начальная плотность ДОН  $\rho_b\Delta b = 10^{-2}$ ) до начала процесса рекристаллизации? (Величина предэкспоненциального множителя  $\delta D_{b0}=5\cdot 10^{-15}\text{ м}^3/\text{с}$ , температура плавления  $T_m=1356\text{ К}$ , энергия активации диффузии по равновесным границам зерен  $Q_b=104\text{ кДж/моль}$ ).

## 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### а) основная литература

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 субмикрорекристаллических металлов и сплавов методом микроиндентирования – Н.Новгород, ННГУ, 2020, 43 с.
3. Шадрина 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.
4. Чувильдеев В.Н., Нохрин А.В., Лопатин Ю.Г., Мелехин Н.В., Смирнова Е.С., Пирожникова О.Э., Грязнов М.Ю., Щавлева А.В., Копылов В.И. Физико-механические свойства нано- и микрокристаллических металлов, полученных методом интенсивного пластического деформирования – Н.Новгород, изд-во ННГУ, 2007, 87 с. [4 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
5. 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. [4 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
6. Чувильдеев В.Н., Дейч И.С., Пирожникова О.Э. Исследование микропластичности металлов методом релаксационных испытаний. в кн. «Физика твердого тела. Лабораторный практикум. Часть 2. Физические свойства твердых тел» / под ред. А.Ф. Хохлова - Н.Новгород, 2000, с. 21-66. [10 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
7. Сидорова А.И., Сысоев А.Н. Определение механических свойств металлов. В кн. «Физика твердого тела. Лабораторный практикум. Часть 2. Физические свойства твердых тел» / под ред. А.Ф. Хохлова - Н.Новгород, 2000, с. 28-50. [10 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
8. Грачева Т.А., Малыгин Н.Д. Определение параметров кристаллической структуры твердых растворов рентгеновским методом. В кн. «Физика твердого тела. Лабораторный практикум. Часть 1. Методы получения твердых тел и исследования их структуры» / под ред. А.Ф. Хохлова - Н.Новгород, 2000, с. 28-50. [10 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
9. Щербань М.Ю., Егорова С.П. Растровая электронная микроскопия для изучения структуры твердых тел. В кн. «Физика твердого тела. Лабораторный практикум. Часть 1. Методы получения твердых тел и исследования их структуры» / под ред. А.Ф. Хохлова - Н.Новгород, 2000, с. 28-50. [10 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
10. Перевезенцев В.Н., Щербань М.Ю. Рекристаллизация металлов и сплавов. Учебное пособие – Н.Новгород, ННГУ, 2000, 62 с. [3 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].

11. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978, 568 с. [8 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
12. 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].
13. 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].
14. 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].
15. Чувильдеев В.Н. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения – М.: Физматлит, 2004, 303 с. [доступно авторизованным пользователям через ЭБС «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].
16. 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)].
17. Корушнов А.И. Физико-механические свойства материалов после равноканального углового прессования. Особенности проявления - Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2013. 257 с. [Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/60871.html> — ЭБС «IPRbooks»].
18. Рудской А.И., Коджаспиров Г.Е. Технологические основы получения ультрамелкозернистых металлов — СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2011. 247 с. [Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43977.html>. - ЭБС «IPRbooks»]

б) дополнительная литература

1. Криммер 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].
2. Глейтер Г., Челмерс Б. Большеугловые границы зерен. – М.: Мир, 1975, [8 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
3. Орлов А.Н., Перевезенцев В.Н., Рыбин В.В. Границы зерен в металлах. М. Металлургия, 1980. 154 с. [2 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
4. 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].
5. 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>].
6. 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].
7. Трушин Ю.В. Физическое материаловедение – СПб.: Наука, 2000, 286 с. [32 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
8. Бокштейн Б.С. Термодинамика и кинетика диффузии в твердых телах – М.: Металлургия, 1974, 280 с. [1 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
9. Бокштейн Б.С. Структура и свойства внутренних поверхностей раздела в металлах – М.: Наука, 1988, 270 с. [2 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].

10. Бокштейн Б.С. Атомы блуждают по кристаллу – М.: Наука, 1984, 207 с. [3 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
11. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. Учебное пособие – М.: Metallurgy, 1978, 248 с. [2 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
12. Мартин Дж. Микромеханизмы дисперсионного твердения сплавов» - М.: Metallurgy, 1988. 167 с. [доступно через электронную библиотеку Исследовательской школы «Нanomатериалы и нанотехнологии» ННГУ: <http://www.nanotech.unn.ru/sites/default/files/martin.pdf>]
13. Мартин Д.У., Доэрти Р. Стабильность микроструктуры металлических систем – М.: Атомиздат, 1978, 280 с. [3 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
14. Фрост Г. Дж., Эшби М.Ф. Карты механизмов деформации. Челябинск: Metallurgy, 1989. – 328 с. [3 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
15. Орлов А.Н. Введение в теорию дефектов кристалла. М. Высшая школа, 1983. 150 с. [доступно через ЭБ Исследовательской школы «Нanomатериалы 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)].
16. Витязь П.А. Наноматериаловедение: учебное пособие/ Витязь П.А., Свидунович Н.А., Куис Д.В. - Минск: Вышэйшая школа, 2015, 512 с. [Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/35501.html> - ЭБС «IPRbooks»].
17. Вознесенский Э.Ф., Шарифуллин Ф.С., Абдуллин И.Ш. Методы структурных исследований материалов. Методы микроскопии: учебное пособие - Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2014. 184 с. [Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/61986.html> — ЭБС «IPRbooks»].
18. Голдобина В.Г. Нанотехнологии в машиностроении: учебное пособие Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2014. 150 с. [Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/49712.html> ЭБС «IPRbooks»].
19. Болдырев В.В., Аввакумов Е.Г., Болдырева Е.В. Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механохимических технологий — Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2009. 343 с. [Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/15822.html> — ЭБС «IPRbooks»].
20. Рудской А.И. Наноструктурированные металлические материалы - СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Наука, 2011. 270 с. [Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43958.html> — ЭБС «IPRbooks»].
21. Рудской А.И. Нанотехнологии в металлургии — СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Наука, 2007. 186 с. [Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43970.html> — ЭБС «IPRbooks»].
22. Наноструктурные материалы: учебное пособие. Серия «Мир материалов и технологий» под ред. Ханнинка Р. — М.: Техносфера, 2009. 488 с. [Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/12730.html>.— ЭБС «IPRbooks»].
23. Шишкин А.В., Дутова О.С. Исследование физических свойств материалов. Часть 4.1. Испытания на растяжение: учебно-методическое пособие — Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2012. 64 с. [Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45095.html>.— ЭБС «IPRbooks»].

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

1. <http://www.lib.unn.ru/> - сайт Фундаментальной библиотеки ННГУ.
2. <http://www.unn.ru/books/> - фонд образовательных электронных ресурсов ННГУ.
3. <https://biblio-online.ru/> - сайт электронной библиотеки «Юрайт», содержащий в открытом доступе книги по отдельным разделам дисциплины.
4. <https://e.lanbook.com> — сайт электронно-библиотечной системы «ЛАНЬ», содержащий в открытом доступе книги по отдельным разделам дисциплины.
5. <http://www.sciencedirect.com> — сайт международного издательства «Elsevier», публикующего статьи и монографии по актуальным направлениям физики конденсированного состояния и

физического материаловедения, совпадающим с тематикой отдельных разделов преподаваемой дисциплины.

6. <http://elibrary.ru/defaultx.asp> - российская научная электронная библиотека «Elibrary», публикующая статьи, тематика которых совпадает с тематикой отдельных разделов преподаваемой дисциплины.
7. <http://znanium.com> – сайт электронно-библиотечной системы «Znanium.com», содержащий книги по отдельным разделам дисциплины.
8. <http://eqworld.ipmnet.ru/> - сайт электронной библиотеки EqWord, содержащий книги по отдельным разделам дисциплины.
9. <http://www.nanotech.unn.ru> – сайт электронной библиотеки Исследовательской школы «Наноматериалы и нанотехнологии» ННГУ
10. <http://www.iprbookshop.ru> – сайт электронно-библиотечной системы IPRbooks, содержащей 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.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению 03.04.02 - Физика и с учетом рекомендаций ООП ВО направленности «Физика конденсированного состояния».

Автор д.ф.-м.н., проф. Нохрин А.В.

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

Рецензенты: зам. декана по учебной работе Белова О.В.

Программа одобрена на заседании методической комиссии физического факультета от «17» ноября 2022 года, протокол № б/н.

Председатель учебно-методической комиссии  
физического факультета ННГУ

\_\_\_\_\_ / Перов А.А. /