

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич  
Должность: врио ректора  
Дата подписания: 31.08.2023 18:57:37  
Уникальный программный ключ:  
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf75f08

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Утверждаю:

Руководитель ООП



*Handwritten signature of O.N. Medvedeva*

О.Н. Медведева

«30» \_\_\_\_\_ мая \_\_\_\_\_ 2023 г.

Рабочая программа дисциплины (с аннотацией)  
**Физика и технология магнитных материалов**

Направление подготовки

27.03.05 Инноватика

профиль

Управление инновациями (по отраслям и сферам экономики)

Для студентов

3 курса, очной формы обучения

Составитель: к.ф.-м.н., доцент Дегтева О.Б.

*Handwritten signature of O.B. Degteva*

Тверь, 2023

## **I. Аннотация**

### **1. Цель и задачи дисциплины**

Курс расширяет представления студентов об особенностях магнитных свойств различных веществ. Магнетизм рассматривается как универсальное природное явление, присущее как живой, так и неживой материи, устанавливается неразрывная связь особенностей внешнего проявления магнитных свойств с электронным строением атомов вещества. Студенты получают практические навыки расчетов магнитных моментов атомов, что необходимо для правильной интерпретации не только поведения макроскопических магнитных характеристик под влиянием внешних воздействий, но и особенностей атомных спектров испускания и поглощения.

Целями и задачами освоения дисциплины являются

Изучение классических моделей ферро-, антиферро-, ферримагнетизма и теории парамагнетизма Ланжевена. Изучаются основные типы взаимодействий в магнетиках: обменное магнитостатическое, магнитоупругое магнитокристаллическое, взаимодействие магнетика с внешним магнитным полем. Рассматривается влияние каждого из них на основные магнитные свойства магнитоупорядоченных веществ. Студенты получают необходимые сведения о термодинамическом описании магнетокалорического эффекта, ферромагнитной аномалии теплоемкости, принципах, лежащих в основе термодинамически равновесного распределения векторов спонтанной намагниченности в магнетиках, особенностях формирования равновесной доменной структуры и основных типах доменных границ. Полученные теоретические знания подкрепляются практическими занятиями, на которых студентам предлагаются оригинальные задачи по следующим темам: принципы заполнения электронных оболочек атомов, принцип Паули и правила Хунда, определение спиновых, орбитальных и полных магнитных моментов многоэлектронных атомов, обозначение терма основного состояния атома;

энергия обменного взаимодействия и определение обменного параметра по температуре Кюри ферромагнетиков; виды магнитокристаллической анизотропии магнетиков, расчет энергии и поля анизотропии для различных случаев; учет собственного размагничивающего фактора образца при определении магнитных характеристик материала, связь между магнитной восприимчивостью тела и материала образца, определение энергии магнетика в собственном размагничивающем поле; расчет параметров доменной структуры одноосных магнетиков

## 2. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Физика и технология магнитных материалов» изучается в модуле Элективные дисциплины 2 Блока 1. Дисциплины части учебного плана, формируемой участниками образовательных отношений.

**3. Объем дисциплины:** 4 зачетные единицы, 144 академических часа, **в том числе:**

**контактная аудиторная работа:** лекции 28 часов, практические занятия 28 часов;

**самостоятельная работа:** 88 часов, в том числе контроль 27 часов.

## 4. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Планируемые результаты освоения образовательной программы (формируемые компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине
УК-1. Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач.	УК-1.1. Анализирует задачу, выделяя ее базовые составляющие. УК-1.5. Рассматривает и предлагает возможные варианты решения поставленной задачи, оценивая их достоинства и недостатки.
ПК-1. Способен выполнять анализ	ПК-1.1. Осуществляет постановку задачи

результатов технологических исследований продуктов.	на технологические исследования. ПК-1.3. Анализирует результаты технологических исследований.
---	--

**5. Форма промежуточной аттестации и семестр прохождения**

Экзамен в 6 семестре.

**6. Язык преподавания:** русский.

**II. Содержание дисциплины, структурированное по темам с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий**

**1. Для студентов очной формы обучения**

**Часть I**

Учебная программа – наименование разделов и тем	Всего (час.)	Контактная работа (час.)		Самостоятельная работа (час.)
		Лекции	Практические (лабораторные) занятия	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Введение. Физика реальных кристаллов один из важнейших разделов современной физики твердого тела. Идеальные и реальные кристаллы.	1	-	1	-
Основные кристаллографические понятия. Пространственная кристаллическая решетка, элементарная ячейка, периодичность, симметрия, дискретность, кристаллографические индексы узлов решетки, направлений и плоскостей. Плотнейшие шаровые упаковки в кристаллических структурах, основные характеристики ПШУ.	8	2	2	4
Классификация дефектов кристаллической решетки. Виды точечных дефектов. Термодинамика реального кристалла, содержащего точечные дефекты. Равновесная концентрация точечных дефектов. Комплексы точечных дефектов. Влияние точечных дефектов на физические свойства кристаллов. Способы создания неравновесной концентрации точечных дефектов. Экспериментальные методы наблюдения точечных дефектов. Краевые и винтовые дислокации. Вектор Бюргерса. Контур Бюргерса. Смешанные дислокации. Прямолинейные дислокации. Криволинейные дислокации. Дислокационные петли.	6	2	2	2

Элементы теории упругости. Упругое взаимодействие. Закон Гука в тензорной форме. Представление поля упругих напряжений кубического кристалла. Упругое поле дислокаций. Энергия дислокации. Сила, действующая на дислокацию в поле внутренних упругих напряжений. Ядро дислокации.	4	-	2	2
Механизмы движения дислокаций. Физическая природа взаимодействия дислокаций. Скольжение дислокаций. Понятия плоскости и направления скольжения. Принципиальное различие механизмов скольжения и переползания.	9	2	2	5
Образование дислокаций. Механизмы зарождения дислокаций при росте кристаллов. Экспериментальные методы наблюдения дислокаций. Размножение дислокаций при пластических деформациях. Источник Франка-Рида. Источник Бардина-Херринга. Влияние отжига и пластической деформации на плотность дислокаций.	4	-	2	2
Дислокации в типичных металлических структурах. Полные и частичные дислокации. Типы частичных дислокаций в ГЦК и ГПУ решетках. Анализ процессов скольжения. Тетраэдр Томпсона. Частичные дислокации Франка и Шокли. Дислокационные реакции. Энергетический критерий дислокационной реакции, критерий Франка. Вершинная дислокация. Поперечное и двойное поперечное скольжение дислокаций. Пересечение дислокаций при их движении. Дислокационные сетки. Сетка Франка. Особенности дислокаций в ионных кристаллах.	4	-	2	2
Взаимодействие дислокаций с точечными дефектами. Взаимодействие дислокаций с примесными атомами. Атмосферы Коттрелла. Образование атмосфер Снука в о.ц.к. решетке железа. Атмосферы Сузуки вблизи растянутой полосы дефектов упаковки в г.ц.к. решетке. Взаимодействие дислокаций с вакансиями и междоузельными атомами. Торможение дислокаций облаками Коттрелла, Снука и Судзуки.	4	-	2	2

Границы зерен и субзерен. Дислокационная природа межзеренных границ. Модель границ как решетки совпадающих узлов (PCY). Малоугловые и большеугловые границы. Границы наклона и кручения. Энергия границ. Дислокационные ряды и стенки. Механизмы образования трещин в кристаллах. Хрупкое и вязкое разрушение.	4	-	2	2
Представления физики твердого тела о прямой и обратной решетках. Понятие пространственной решетки Бравэ. Ячейка Вигнера-Зейтца. Структуры ОЦК и ГЦК как решетки Бравэ. Понятие координационного числа. Ячейки Вигнера-Зейтца для решеток ОЦК и ГЦК. Обратная решетка. Обратное k-пространство. Связь основных векторов прямой и обратной решеток. Уровни электрона в периодическом потенциальном поле кристаллической решетки. Теорема Блоха. Энергетическая зона. Понятие зоны Бриллюэна. Число разрешенных энергетических состояний. Образование энергетической щели. Понятие уровня и поверхности Ферми. Экспериментальные методы исследования поверхности Ферми (эффекты Де-Гааза - Ван-Альфена, Шубникова - Де-Гааза).	16	4	3	9
ИТОГО	60	10	20	30

## Часть II

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Введение. Физика магнитных материалов - один из важнейших разделов современной физики твердого тела. Применение магнитных материалов в различных отраслях техники.	1		1	
Основные магнитные характеристики магнитных материалов. Кривая намагничивания. Намагниченность насыщения, индукция, магнитная проницаемость, восприимчивость. Виды магнитной проницаемости и их определение. Петля магнитного гистерезиса. Основные параметры петли магнитного гистерезиса. Предельная и частные петли магнитного гистерезиса, кривые возврата. Статическая и динамическая петли	8	2	2	4

гистерезиса.				
Основные типы взаимодействий в магнитных материалах, ответственные за формирование их свойств: обменное, магнитокристаллическое, магнитоупругое, магнитостатическое. Основные факторы, влияющие на магнитные и электрические свойства магнитных материалов: химический состав, кристаллическая структура, атомное упорядочение, дефекты кристаллической решетки. Структурно-чувствительные и структурно-нечувствительные магнитные свойства.	6	2	1	3
Энергия постоянного магнита. Энергия намагниченного тела. Графический способ определения максимального энергетического произведения (ВН)тах и его использование для оценки энергии магнитного материала. Рабочая точка постоянного магнита. Способы получения размагниченного состояния.	7	2	1	4
Магнитные свойства материалов в переменных магнитных полях. Динамическая кривая намагничивания и петля гистерезиса. Магнитная проницаемость. Физический смысл составляющих магнитной проницаемости.	8	2	2	4
Магнитомягкие и магнитотвердые магнитные материалы. Физические основы их классификации. Предварительные сведения об основных группах магнитных материалов.	2		1	1
Магнитные материалы с наибольшей намагниченностью насыщения (железо, железокобальтовые сплавы). Химический состав. Кристаллическая структура. Основные магнитные свойства, влияние примесей на ход кривой намагничивания, индукцию, электросопротивление. Перспективы повышения качества.	2		1	1
Высокопроницаемые магнитные материалы с малыми потерями при перемагничивании с частотой 50 Гц (кремнистое железо). Химический состав, Влияние содержания кремния на основные магнитные свойства. Кристаллическая структура, кристаллическая текстура. Влияние субструктуры и пластической деформации на коэрцитивную силу. Технология изготовления кремнистого	8	2	2	4



железа. Термическая обработка и влияние ее режимов на магнитные характеристики. Термомагнитная обработка. Особенности доменной структуры. Классификация сталей по ГОСТ и основные магнитные свойства. Перспективы повышения качества.				
Магнитные материалы с пониженными потерями энергии при перемагничивании в полях звуковых частот (400-20000 Гц). Влияние химического состава на магнитные свойства, зависимость магнитных потерь и коэрцитивной силы от толщины листа. Потери на гистерезис, вихревые токи, дополнительные потери, способы разделения потерь. Перспективы повышения качества.	4		2	2
Магнитные материалы с наибольшей проницаемостью $\mu$ в слабых полях. Влияние химического состава на магнитные свойства, кристаллическая структура, физические основы термомагнитной обработки, закалки, отжига. Основные магнитные свойства. Перспективы повышения качества.	2		1	1
Магнитные материалы с постоянной магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях (перминвары, изопермы). Материалы с резкой зависимостью проницаемости от температуры. Магнитные шунты.	4		2	2
Магнитострикционные (пьезомагнитные) материалы. Применение, основные характеристики. Особенности технологического получения. Перспективы развития.	4		2	2
Полупроводниковые высокопроницаемые магнитные материалы. Магнитомягкие ферриты. Классификация ферритов по техническому назначению. Химический состав, кристаллическая структура, особенности магнитной структуры. Особенности поведения намагниченности и электросопротивления в зависимости от температуры. Перспективы повышения качества.	8	2	2	4
Магнитные полупроводниковые материалы с повышенной стабильностью магнитной проницаемости при изменении поля, частоты и температуры. Магнитодиэлектрики. Особенности	4		2	2

структуры и методов получения. Температурный коэффициент стабильности магнитной проницаемости.				
Магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса и большой скоростью перемагничивания (ППГ-ферриты, тонкие магнитные пленки). Основные магнитные и технические характеристики. Получение тонких магнитных пленок. Особенности их доменной структуры, магнитной анизотропии.	4		2	2
Магнитные материалы с цилиндрическими магнитными доменами. Ортоферриты, ферриты-гранаты, гексаферриты. Особенности доменной структуры и практических применений.	4		2	2
Магнитные материалы с умеренными значениями коэрцитивной силы и магнитной энергии. Электротехнические стали. Физические условия получения высококоэрцитивного состояния. Особенности структуры, влияние основных примесей на магнитные свойства.	4		2	2
Магнитотвердые материалы с повышенными значениями коэрцитивной силы и магнитной энергии (материалы типа ЮНДК). Химический состав, основные магнитные свойства, гетерогенная структура – причина достижения высококоэрцитивного состояния. Маркировка по ГОСТ.	4		2	2
Магнитотвердые ферриты. Кристаллическая структура и основные магнитные характеристики. Способы повышения температурной стабильности магнитной индукции.	4		2	2
Магнитные материалы с повышенной плотностью записи информации. Особенности получения материалов для магнитных лент и дисков. Физические принципы записи и считывания информации.	4		2	2
Магнитные материалы на основе сплавов РЗМ-Со. Особенности кристаллической структуры и магнитные свойства. Особенности гетерогенной структуры сплавов $(R,Zr)(Co,Cu,Fe)_z$ как неотъемлемого признака высококоэрцитивного состояния. Получение постоянных магнитов	12	4	2	6

методами литья и порошковой металлургии. Основные механизмы магнитного гистерезиса.				
Магнитные материалы на основе сплавов РЗМ-Fe-B. Особенности кристаллической структуры, основные магнитные характеристики. Получение постоянных магнитов методами порошковой металлургии и скоростной закалки. Особенности микроструктуры, основной механизм намагничивания и перемагничивания. Перспективы повышения магнитных характеристик.	12	4	2	6
Аморфные магнитные материалы. Их преимущества и недостатки по сравнению с кристаллическими аналогичных составов. Способы получения аморфных материалов. Физические основы термомагнитной записи информации и контактной печати с применением аморфных пленок.	4		2	2
ИТОГО	120	20	40	60
ВСЕГО	180	30	60	90

### **III. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

- Тесты и задачи для практических занятий и самостоятельного решения;
- Контрольные вопросы для экзамена;
- Требования к рейтинг-контролю.

### **IV. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине**

**Форма проведения промежуточного контроля:** студенты, освоившие программу курса могут получить оценку по итогам семестровой и полусеместровой рейтинговой аттестации согласно «Положению о рейтинговой системе обучения ТвГУ» (протокол №8 от 30 апреля 2020 г.).

Если условия «Положения о рейтинговой системе ...» не выполнены, то экзамен сдается согласно «Положению о промежуточной аттестации

(экзаменах и зачетах) обучающихся по программам высшего образования ТвГУ» (протокол №11 от 28 апреля 2021 г.)

**1. Типовые контрольные задания для проверки уровня сформированности компетенции 1 (ПК-1: способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин).**

Этап формирования компетенции, в котором участвует дисциплина	Типовые контрольные задания для оценки знаний, умений, навыков	Критерии оценивания компетенции, шкала оценивания
<p>Начальный</p> <p><b>Уметь:</b> применять полученные знания при решении конкретных задач в профессиональной деятельности, определять конкретные цели, которые должны быть достигнуты в процессе эксперимента (решения задач).</p>	<p><b>Примеры задач.</b></p> <p>1. Определить символы атомных рядов, заданных следующими парами точек:  а) <math>(0, \frac{1}{2}, 0)</math> и <math>(1, \frac{1}{2}, 1)</math>;  б) <math>(1, \frac{1}{2}, 1)</math> и <math>(\frac{1}{2}, 1, \frac{1}{2})</math>.</p> <p>2. Определить индексы атомной плоскости по координатам трех принадлежащих ей точек:  а) <math>(0, 0, \frac{1}{2})</math>, <math>(0, \frac{1}{4}, 0)</math>, <math>(0, 0, 0)</math>;  б) <math>(-\frac{1}{3}, 0, 0)</math>, <math>(0, \frac{1}{2}, 0)</math>, <math>(0, 0, \frac{1}{2})</math>.</p>	<p>1. Не использует базовые знания в области физики реальных кристаллов при решении конкретных задач.</p> <p>2. Использует лишь ограниченные знания физических законов.</p> <p>3. Удовлетворительно использует знания физических законов, но не всегда может получить окончательный результат.</p> <p>4. Умеет хорошо использовать знания в области физики реальных кристаллов, допускает ошибки.</p> <p>5. Свободно использует основные физические представления и законы, получает правильный результат.</p>
<p>Начальный</p> <p><b>Знать:</b> основные классы современных магнитных материалов и особенности их практического применения. Иметь общие представления о кристаллической структуре и основных типах дефектов кристаллических решеток, а также о</p>	<p><b>Примеры задач.</b></p> <p>1. Определить по марке материала его химический состав (принадлежность к одной из групп) и основные магнитные характеристики: 3411, 1211, 2412, 1212, 50 НХС, 79 НМ, Н88М9, 1000 НЦ, 600 НЦ, 4000 НН, 2000 НН, 150 ВЧ, 2,1 ВТ, 150 КГ, ВЧ 32, ЕХ5К5, ЕХ9К15М2, ЮНД4, ЮНДК18, КС37.</p> <p>2. При существовании одноименных дислокаций в</p>	<p>1. Не знает основных кристаллографических понятий, классификации основных магнитных материалов.</p> <p>2. Знает лишь отдельные понятия физики реальных кристаллов, некоторые определения магнитных параметров материалов.</p> <p>3. Удовлетворительно знает основные положения физики реальных кристаллов и магнитных</p>

<p>процессах, происходящих с дефектами под влиянием внешних воздействий и воздействии этих процессов на основные магнитные свойства материалов.</p>	<p>разных плоскостях скольжения их взаимодействие приводит к образованию  А. Дислокационной петли.  Б. Сетки Франка.  В. Облаков Судзуки.  Г. Стенки дислокаций.</p>	<p>материалов, допускает отдельные ошибки.  4. Хорошо знает основные положения физики реальных кристаллов и магнитных материалов.  5. Исчерпывающе знает основные положения физики реальных кристаллов и магнитных материалов.</p>
<p>Промежуточный  <b>Владеть:</b> методиками планирования и разработки физических экспериментов, методами анализа и обработки полученных результатов, экспериментальными навыками работы с современной аппаратурой.</p>	<p>1. Измерить статическую и динамическую петли гистерезиса монокристалла кремнистого железа. Объяснить различный вид петель гистерезиса.  2. По кривым намагничивания железа построить зависимости магнитной проницаемости от напряженности внешнего магнитного поля.</p>	<p>1. Не владеет методиками планирования эксперимента, анализа и обработки полученных результатов.  2. Удовлетворительно владеет методиками, но не может анализировать полученные результаты.  3. Удовлетворительно владеет методиками измерений и исследований, но при анализе результатов допускает методические ошибки.  4. Хорошо владеет методиками планирования эксперимента, анализа и обработки полученных результатов.  5. Свободно владеет экспериментальными методиками и методами анализа и обработки полученных результатов.</p>
<p>Промежуточный  <b>Уметь:</b> применять полученные знания при решении конкретных задач в профессиональной деятельности, определять конкретные цели, которые должны быть достигнуты в процессе эксперимента (решения задач).</p>	<p>1. Сравнить потери на вихревые токи в листе электротехнической стали с 3% Si толщиной <math>d=0,35</math> мм при значении индукции 1,5 Тл и различных частотах перемагничивающего поля 50, 100, 400 Гц. Сделать вывод о зависимости потерь от частоты перемагничивания.  2. Вычислить глубину проникновения переменного магнитного поля в аморфную</p>	<p>1. Не использует базовые знания в области физики реальных кристаллов и магнитных материалов при решении конкретных задач.  2. Использует лишь ограниченные знания физических закономерностей.  3. Удовлетворительно использует знания в области физики реальных</p>

	ленту сплава 24 КСР, магнитная проницаемость которой $\mu_m=1500$ , $\rho=1,25$ мкОм м при частоте 1000 Гц.	кристаллов и магнитных материалов, но не всегда может получить окончательный результат. 4. Умеет хорошо использовать знания в области физики реальных кристаллов и магнитных материалов, допускает ошибки. 5. Свободно использует основные физические представления и законы, получает правильный результат.
Промежуточный <b>Знать:</b> основные классы современных магнитных материалов и особенности их практического применения. Иметь общие представления о кристаллической структуре и основных типах дефектов кристаллических решеток, а также о процессах, происходящих с дефектами под влиянием внешних воздействий и воздействии этих процессов на основные магнитные свойства материалов.	1. Построить пространственные изображения указанных кристаллографических плоскостей в кубе: (112), (221), (110), (111), ( $\bar{1}\bar{1}1$ ), ( $1\bar{1}1$ ). 2. Вычислить потери на вихревые токи при перемагничивании железной проволоки с радиусом $r=1$ мм и удельным сопротивлением $\rho=107$ Ом м. Проволока перемагничивается в поле с частотой 50 Гц.	1. Не знает основных кристаллографических понятий, классификации основных магнитных материалов. 2. Знает лишь отдельные понятия физики реальных кристаллов, некоторые определения магнитных параметров материалов. 3. Удовлетворительно знает основные положения физики реальных кристаллов и магнитных материалов, допускает отдельные ошибки. 4. Хорошо знает основные положения физики реальных кристаллов и магнитных материалов. 5. Исчерпывающе знает основные положения физики реальных кристаллов и магнитных материалов.

**2. Типовые контрольные задания для проверки уровня сформированности компетенции 2** (ПК-2: способность проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта).

Этап формирования компетенции, в котором	Типовые контрольные задания для оценки знаний,	Критерии оценивания компетенции, шкала
--	--	--

участвует дисциплина	умений, навыков	оценивания
<p>Начальный</p> <p><b>Уметь:</b> правильно производить нужные измерения, обрабатывать их с применением прикладных компьютерных программ, анализировать полученные результаты на основе теоретических знаний.</p>	<p>1. Представить результаты магнитных измерений в виде графиков с использованием программы научной графики Origin.</p> <p>2. Получить изображения микроструктуры и представить результаты в виде отчета в формате Microsoft Word.</p>	<p>1. Не умеет правильно производить измерения и обрабатывать результаты с помощью стандартных и специализированных компьютерных программ.</p> <p>2. Обладает лишь начальными навыками работы на экспериментальных установках и методами компьютерной обработки полученных результатов.</p> <p>3. Удовлетворительно справляется с проведением измерений и обработкой полученных результатов.</p> <p>4. Умеет правильно производить нужные измерения, обрабатывать их с применением прикладных компьютерных программ, анализировать полученные результаты на основе теоретических знаний, допускает отдельные ошибки.</p> <p>5. Умеет правильно производить нужные измерения, обрабатывать их с применением прикладных компьютерных программ, анализировать полученные результаты на основе теоретических знаний.</p>
<p>Начальный</p> <p><b>Знать:</b> основные экспериментальные методы исследования свойств магнетиков, физические принципы работы экспериментальных установок.</p>	<p>1. Экспериментальные методы наблюдения точечных дефектов в кристаллах.</p> <p>2. Экспериментальные методы исследования поверхности Ферми (эффекты Де-Гааза - Ван-Альфена, Шубникова - Де-Гааза).</p>	<p>1. Не знает основных экспериментальных методов исследования физических свойств магнетиков и принципов работы экспериментальных установок.</p> <p>2. Знает лишь отдельные экспериментальные методы исследования физических свойств</p>

		<p>магнетиков.</p> <p>3. Удовлетворительно знает экспериментальные методы исследования физических свойств магнетиков и принципы работы экспериментальных установок, допускает отдельные ошибки.</p> <p>4. Хорошо знает экспериментальные методы исследования физических свойств магнетиков и принципы работы экспериментальных установок.</p> <p>5. Знает в полном объеме экспериментальные методы исследования физических свойств магнетиков и принципы работы экспериментальных установок.</p>
<p>Промежуточный</p> <p><b>Владеть:</b></p> <p>компьютерными программами для построения графиков, таблиц, анализа изображений, полученных с помощью микроскопа, навыками работы с литературой.</p>	<p>1. Измерить петли гистерезиса образцов магнитомягких и магнитотвердых материалов. Определить основные параметры петель гистерезиса.</p> <p>2. Обработать изображения микроструктуры двухфазного сплава с целью получения количественных параметров.</p>	<p>1. Не владеет компьютерными программами для построения графиков, таблиц, анализа изображений, полученных с помощью микроскопа, навыками работы с литературой.</p> <p>2. Удовлетворительно владеет компьютерными программами для построения графиков, таблиц, анализа изображений, полученных с помощью микроскопа, навыками работы с литературой, но не может объяснить полученные результаты.</p> <p>3. Удовлетворительно владеет компьютерными программами для построения графиков,</p>



		таблиц, анализа изображений, полученных с помощью микроскопа, навыками работы с литературой, но допускает методические ошибки. 4. Хорошо владеет компьютерными программами для построения графиков, таблиц, анализа изображений, полученных с помощью микроскопа, навыками работы с литературой. 5. Свободно владеет компьютерными программами для построения графиков, таблиц, анализа изображений, полученных с помощью микроскопа, навыками работы с литературой.
<p>Промежуточный</p> <p><b>Уметь:</b> правильно производить нужные измерения, обрабатывать их с применением прикладных компьютерных программ, анализировать полученные результаты на основе теоретических знаний.</p>	<p>1. По трем различным кривым размагничивания образцов материалов типа РЗМ-Со построить зависимости энергетического произведения (ВН) от напряженности внешнего магнитного поля, по ним определить значение <math>(ВН)_{max}</math>. Сделать вывод о наиболее предпочтительной форме размагничивающей части петли гистерезиса для достижения наивысших значений энергетического произведения.</p> <p>2. Выявить микроструктуру поликристалла сплава с помощью электрохимического травления. Получить изображения поверхности на металлографическом микроскопе.</p>	<p>1. Не умеет правильно производить измерения и обрабатывать результаты с помощью стандартных и специализированных компьютерных программ.</p> <p>2. Обладает лишь начальными навыками работы на экспериментальных установках и методами компьютерной обработки полученных результатов.</p> <p>3. Удовлетворительно справляется с проведением измерений и обработкой полученных результатов.</p> <p>4. Умеет правильно производить нужные измерения, обрабатывать их с применением прикладных компьютерных программ, анализировать полученные результаты на основе теоретических знаний,</p>

		<p>допускает отдельные ошибки.</p> <p>5. Умеет правильно производить нужные измерения, обрабатывать их с применением прикладных компьютерных программ, анализировать полученные результаты на основе теоретических знаний.</p>
<p>Промежуточный</p> <p><b>Знать:</b> основные экспериментальные методы исследования свойств магнетиков, физические принципы работы экспериментальных установок.</p>	<p>1. Физические основы магнитной записи и воспроизведения информации.</p> <p>2. Основные факторы, влияющие на магнитные и электрические свойства магнитных материалов: химический состав, кристаллическая структура, атомное упорядочение, дефекты кристаллической решетки. Структурно чувствительные и структурно нечувствительные магнитные свойства.</p>	<p>1. Не знает основных экспериментальных методов исследования физических свойств магнетиков и принципов работы экспериментальных установок.</p> <p>2. Знает лишь отдельные экспериментальные методы исследования физических свойств магнетиков.</p> <p>3. Удовлетворительно знает экспериментальные методы исследования физических свойств магнетиков и принципы работы экспериментальных установок, допускает отдельные ошибки.</p> <p>4. Хорошо знает экспериментальные методы исследования физических свойств магнетиков и принципы работы экспериментальных установок.</p> <p>5. Знает в полном объеме экспериментальные методы исследования физических свойств магнетиков и принципы работы экспериментальных установок.</p>

**3. Типовые контрольные задания для проверки уровня сформированности компетенции 3 (ПК-3: готовность применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований).**

Этап формирования компетенции, в котором участвует дисциплина	Типовые контрольные задания для оценки знаний, умений, навыков	Критерии оценивания компетенции, шкала оценивания
<p>Начальный</p> <p><b>Уметь:</b> грамотно планировать проведение заданных экспериментов, объяснять результаты на основе современных теоретических представлений.</p>	<p>1. Определить потери на гистерезис при перемагничивании образца магнитомягкого материала.</p> <p>2. На основе микрофотографий поверхности образцов кремнистого железа, содержащих ямки травления, определить плотность дислокаций.</p>	<p>1. Не умеет планировать проведение заданных экспериментов.</p> <p>2. Обладает лишь начальными навыками планирования заданных экспериментов, затрудняется объяснять результаты.</p> <p>3. Удовлетворительно справляется с планированием экспериментов, может объяснить отдельные результаты.</p> <p>4. Умеет планировать проведение заданных экспериментов. При объяснении результатов допускает отдельные ошибки.</p> <p>5. Умеет грамотно планировать проведение заданных экспериментов, объяснять результаты на основе современных теоретических представлений.</p>
<p>Начальный</p> <p><b>Знать:</b> основные экспериментальные методы исследования свойств магнетиков, физические принципы работы экспериментальных установок.</p>	<p>1. Сравнить потери на вихревые токи в листах электротехнической стали с 3% Si различной толщины <math>d=0,1; 0,35; 0,7</math> мм при значении индукции 1,5 Тл и частоте перемагничивающего поля 50 Гц. Сделать вывод о зависимости потерь от толщины листа.</p> <p>2. Применение метода дифракционного рентгеноструктурного анализа для определения параметров</p>	<p>1. Не знает основные практические применения конкретных физических свойств магнетиков.</p> <p>2. Знает применения лишь отдельных физических свойств магнетиков.</p> <p>3. Удовлетворительно знает основные применения физических свойств магнетиков, допускает ошибки.</p> <p>4. Хорошо знает основные применения физических</p>

	кристаллической решетки металлов и сплавов.	свойств магнетиков, испытывает затруднения в выборе способов управления ими в ходе эксперимента. 5. Знает особенности практических применений конкретных физических свойств магнетиков, способы управления ими в ходе эксперимента.
Промежуточный <b>Владеть:</b> умением работать в коллективе, работа которого подчинена достижению общей цели.	1. Коллективная работа по планированию эксперимента, проведению измерений, обсуждению полученных результатов и подготовке отчета.	1. Не владеет навыками работы в коллективе. 2. Испытывает определенные трудности при работе в коллективе. 3. Удовлетворительно владеет навыками работы в коллективе. 4. Хорошо владеет навыками работы в коллективе. 5. Свободно владеет навыками работы в коллективе, деятельность которого подчинена достижению общей цели.
Промежуточный <b>Уметь:</b> грамотно планировать проведение заданных экспериментов, объяснять результаты на основе современных теоретических представлений.	1. Получить изображения микроструктуры образцов многофазных сплавов. Определить относительное содержание фаз. 2. С помощью сканирующего зондового микроскопа получить изображения доменной структуры магнитооптического диска.	1. Не умеет планировать проведение заданных экспериментов. 2. Обладает лишь начальными навыками планирования заданных экспериментов, затрудняется объяснять результаты. 3. Удовлетворительно справляется с планированием экспериментов, может объяснить отдельные результаты. 4. Умеет планировать проведение заданных экспериментов. При объяснении результатов допускает отдельные ошибки. 5. Умеет грамотно планировать проведение

		заданных экспериментов, объяснять результаты на основе современных теоретических представлений.
<p>Промежуточный</p> <p><b>Знать:</b> основные экспериментальные методы исследования свойств магнетиков, физические принципы работы экспериментальных установок.</p>	<p>1. По виду доменной структуры на образцах кремнистого железа определить кристаллографическую ориентацию плоскости металлографического шлифа.</p> <p>2. Определить величину максимального энергетического произведения постоянного магнита.</p>	<p>1. Не знает основные экспериментальные методы исследования свойств магнитных материалов, физические принципы работы экспериментальных установок.</p> <p>2. Знает лишь отдельные экспериментальные методы исследования свойств магнитных материалов.</p> <p>3. Удовлетворительно знает основные экспериментальные методы исследования свойств магнитных материалов, допускает ошибки.</p> <p>4. Хорошо знает основные экспериментальные методы исследования свойств магнитных материалов, испытывает затруднения в выборе способов управления ими в ходе эксперимента.</p> <p>5. Знает основные экспериментальные методы исследования свойств магнетиков, физические принципы работы экспериментальных установок.</p>

## **V. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

### **а) Основная литература:**

1. Лилеев, А. С. Механизмы перемагничивания магнитных материалов. Моделирование процессов перемагничивания : учебное пособие / А. С. Лилеев. — Москва : МИСИС, 2020. — 49 с. — ISBN 978-5-907226-94-

4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/156005>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Гуфан, А. Ю. Физика магнитных явлений : учебник / А. Ю. Гуфан. — Ростов-на-Дону : ЮФУ, 2020. — 372 с. — ISBN 978-5-9275-3552-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/180688>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Аникина В. И. Основы кристаллографии и дефекты кристаллического строения: практикум. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. - 148 с. - Электронный ресурс. - Режим доступа: <http://www.znaniium.com/bookread.php?book=441367>
4. Боровик, Е.С. Лекции по магнетизму [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Е.С. Боровик, В.В. Еременко, А.С. Мильнер. — Электрон. дан. — Москва : Физматлит, 2005. — 512 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/2118> .
- б) Дополнительная литература:
5. Физика твердого тела: Учебное пособие / Ю.А. Стрекалов, Н.А. Тенякова. - М.: ИЦ РИОР: НИЦ Инфра-М, 2013. - 307 с. - Электронный ресурс. - Режим доступа: <http://www.znaniium.com/bookread.php?book=363421>
6. Белов, К.П. Эффекты парапроцесса в ферромагнетиках и антиферромагнетиках [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Москва : Физматлит, 2001. — 78 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/48210> .
7. Морозов, А.И. Фрустрированные магнитные наноструктуры [Электронный ресурс] / А.И. Морозов, А.С. Сигов. — Электрон. дан. — Москва : Физматлит, 2017. — 144 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/105002> .

8. Розин, К.М. Кристаллофизика. Учебное пособие [Электронный ресурс] : учеб. пособие / К.М. Розин, В.С. Петраков. — Электрон. дан. — Москва : МИСИС, 2006. — 249 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/51712> .

## **VI. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины**

### **– Программное обеспечение:**

- Операционная система Microsoft Windows 7-10.
- Офисный пакет Microsoft Office 2010+.
- Программа научной графики Origin.

### **Внутренние информационные ресурсы:**

- Научная библиотека ТвГУ – <http://library.tversu.ru>;
- Сервер доступа к модульной объектно-ориентированной динамической учебной среде Moodle – <http://moodle.tversu.ru>;
- Сервер обеспечения дистанционного обучения и проведения Web-конференций Mirapolis Virtual Room – <http://mvr.tversu.ru>;
- Репозиторий научных публикаций ТвГУ – <http://eprints.tversu.ru>.

### **Внешние информационные ресурсы:**

- Научная электронная библиотека eLibrary.ru;
- Электронная база данных диссертаций РГБ;
- База данных Реферативных журналов ВИНТИ;
- Полнотекстовый доступ к журналам и книгам издательства Springer Verlag;
- Полнотекстовый доступ к отдельным журналам и книгам Института инженеров по электротехнике и электронике (Institute of Electrical and Electronics Engineers);
- Реферативная база Inspec (доступ к рефератам и полным текстам монографий и научных статей в области физики, электротехники,

электроники, коммуникаций, компьютерных наук и информационных технологий).

## **VII. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины Тесты и задачи для практических занятий и самостоятельного решения**

### **Часть I**

Занятие 1. Определение символов кристаллографических направлений и плоскостей.

Задание 1. Определить символы атомных рядов, заданных следующими парами точек:

а)  $(0, \frac{1}{2}, 0)$  и  $(1, \frac{1}{2}, 1)$ ;

б)  $(1, \frac{1}{2}, 1)$  и  $(\frac{1}{2}, 1, \frac{1}{2})$ .

Задание 2. Определить индексы атомной плоскости по символам двух принадлежащих ей атомных рядов:

а)  $[210]$  и  $[2\bar{1}0]$ ;

б)  $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$  и  $[1\bar{1}\bar{1}]$ .

Задание 3. Определить индексы атомной плоскости по координатам трех принадлежащих ей точек:

а)  $(0, 0, \frac{1}{2})$ ,  $(0, \frac{1}{4}, 0)$ ,  $(0, 0, 0)$ ;

б)  $(-\frac{1}{3}, 0, 0)$ ,  $(0, \frac{1}{2}, 0)$ ,  $(0, 0, \frac{1}{2})$ .

Задание 4. Построить наглядные пространственные изображения указанных кристаллографических направлений в кубе:

а)  $[1\bar{1}0]$ ,  $[111]$ ,  $[112]$ ;

б)  $[112]$  и  $[211]$ ;

в)  $[110]$ ,  $[0\bar{1}0]$ ,  $[\bar{1}11]$ .

Задание 5. Построить пространственные изображения указанных кристаллографических плоскостей в кубе:

а)  $(112)$ ,  $(221)$ ,  $(110)$ ,  $(111)$ ,  $(\bar{1}\bar{1}1)$ ,  $(1\bar{1}1)$ .



Занятие 2. Термодинамика реального кристалла, содержащего точечные дефекты.

Занятие 3. Дислокационные реакции. Тетраэдр Томпсона.

Занятие 4. Посвящено индивидуальным сообщениям студентов об экспериментальных методах исследования дислокаций с помощью ямок травления, декорирования, электронной микроскопии, рентгеновской дифракции.

## Часть II

Задача 1. Вычислить глубину проникновения переменного магнитного поля с частотой 50 Гц для железа с магнитной проницаемостью  $\mu=500$  и удельным сопротивлением  $\rho=107$  Ом м.

Указание: использовать формулу  $s = \sqrt{2\rho / \mu\nu}$ .

Задача 2. Вычислить потери на вихревые токи при перемагничивании железной проволоки с радиусом  $r=1$  мм и удельным сопротивлением  $\rho=107$  Ом м. Проволока перемагничивается в поле с частотой 50 Гц.

Указание: использовать формулу  $P = r^2 I_s^2 \nu^2 / 8\rho$ .

Задача 3. По кривым намагничивания железа построить зависимости магнитной проницаемости от напряженности внешнего магнитного поля.

Указание: использовать данные преподавателем графики.

Задача 4. Сравнить потери на вихревые токи в листах электротехнической стали с 3% Si различной толщины  $d=0,1; 0,35; 0,7$  мм при значении индукции 1,5 Тл и частоте перемагничивающего поля 50 Гц. Сделать вывод о зависимости потерь от толщины листа.

Указание: использовать формулу  $P = \frac{4B^2 \nu^2 d^2}{3D\rho} 10^{-11}$ .

Задача 5. Сравнить потери на вихревые токи в листе электротехнической стали с 3% Si толщиной  $d=0,35$  мм при значении индукции 1,5 Тл и

различных частотах перемагничивающего поля  $\nu = 50, 100, 400$  Гц. Сделать вывод о зависимости потерь от частоты перемагничивания.

Задача 6. По экспериментальной кривой зависимости намагниченности насыщения от температуры построить кривую температурной зависимости магнитной восприимчивости материала.

Указание: использовать данные преподавателем графики.

Задача 7. Определить по марке материала его химический состав (принадлежность к одной из групп) и основные магнитные характеристики: 3411, 1211, 2412, 1212, 50 НХС, 79 НМ, Н88М9, 1000 НЦ, 600 НЦ, 4000 НН, 2000 НН, 150 ВЧ, 2,1 ВТ, 150 КГ, ВЧ 32, ЕХ5К5, ЕХ9К15М2, ЮНД4, ЮНДК18, КС37.

Задача 8. По трем различным кривым размагничивания образцов материалов типа РЗМ-Со построить зависимости энергетического произведения (ВН) от напряженности внешнего магнитного поля, по ним определить значение  $(ВН)_{\max}$ . Сделать вывод о наиболее предпочтительной форме размагничивающей части петли гистерезиса для достижения наивысших значений энергетического произведения.

Указание: использовать данные преподавателем графики.

Задача 9. Вычислить глубину проникновения переменного магнитного поля в феррит марки 400 НН, магнитная проницаемость которого  $\mu_m = 1100$ ,  $\rho = 0,5$  Ом м при частоте 1 МГц.

Указание: использовать формулу  $s = \sqrt{2\rho / \nu\mu_m}$ .

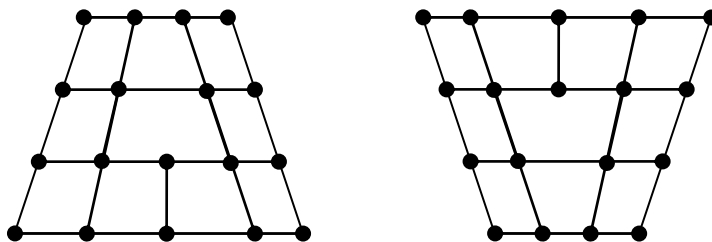
Задача 10. Вычислить глубину проникновения переменного магнитного поля в аморфную ленту сплава 24 КСР, магнитная проницаемость которой  $\mu_m = 1500$ ,  $\rho = 1,25$  мкОм м при частоте 1000 Гц.

Указание: использовать формулу  $s = \sqrt{2\rho / \nu\mu_m}$ .

### Тестовые задания

1. От какого основного фактора зависит энергия дислокации?

- А. Зависит от типа дислокации.
- Б. Энергия прямо пропорциональна квадрату вектора Бюргерса.
- В. Энергия прямо пропорциональна вектору Бюргерса.
- Г. Энергия обратно пропорциональна квадрату вектора Бюргерса.
2. Дефекты кристаллической решетки, вытянутые в одном преимущественном направлении называются:
- А. Границы зерен.
- Б. Границы фазовых включений.
- В. Дислокации.
3. Вектор Бюргерса является основной физической характеристикой
- А. Сетки Франка.
- Б. Дислокации.
- В. Силы, действующей на дислокацию.
4. Дислокационные петли – это криволинейные дислокации, содержащие в себе элементы
- А. Краевой и винтовой дислокации.
- Б. Дислокаций однократной и N-кратной мощности.
- В. Смешанной дислокации.
5. Вектор Бюргерса дислокации не зависит
6. А. От направления обхода по замкнутому контуру Бюргерса.
- Б. От формы этого контура, ограничивающего дислокацию.
- В. Как от направления обхода, так и от формы контура.
7. Изобразите контур и вектор Бюргерса показанных на рисунке дислокаций.



8. Что происходит с величиной свободной энергии Гельмгольца кристалла в при образовании дефектов?
- А. Увеличивается;
  - Б. Уменьшается;
  - В. Остается в целом неизменной.
9. Соотношение  $\frac{n}{N} = e^{-\frac{E_d}{kT}}$  позволяет определить
- А. Энергию активации самодиффузии.
  - Б. Энергию дислокации.
  - В. Равновесную концентрацию точечных дефектов в реальном кристалле при заданной температуре.
10. Приводит ли появление краевой дислокации к искажениям решетки вдоль одного направления?
- А. Да.
  - Б. Нет.
  - В. Появление дислокаций не приводит к искажениям решетки.
11. Сходство краевой и винтовой дислокаций заключается
- А. В смещении атомных слоев в направлении параллельном линии дислокации;
  - Б. В искажении кристаллической решетки в преимущественном направлении;
  - В. В смещении атомных слоев в направлении перпендикулярном линии дислокации;
  - Г. Сходства нет.
- Выберите правильные ответы.
- 1. А, Б 2. Б, В 3. А 4. Б 5. В 6. Г**
12. Вектор Бюргерса дислокации зависит
- А. От выбора начала отсчета по контуру Бюргерса.
  - Б. От вида дислокации.

- В. От формы контура Бюргерса.
13. При существовании одноименных дислокаций в разных плоскостях скольжения их взаимодействие приводит к образованию
- А. Дислокационной петли.
  - Б. Сетки Франка.
  - В. Облаков Судзуки.
  - Г. Стенки дислокаций.
14. Физической причиной переползания дислокаций является
- А. Взаимодействие упругих полей дислокаций.
  - Б. Диффузионные процессы миграции точечных дефектов.
  - В. Процесс взаимодействия дислокаций разного знака.
15. Кристалл можно считать идеальным, если плотность дислокаций  $N$  в нем составляет
- А.  $N \approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ; Б.  $N \approx 10^5 \text{ см}^{-2}$ ; В.  $N \geq 10^3 \text{ см}^{-2}$ ; Г.  $N \leq 10^3 \text{ см}^{-2}$
16. Модель источника Франка-Рида существует для объяснения
- А. Процесса образования дислокаций;
  - Б. Механизма взаимодействия дислокаций;
  - В. Увеличения плотности дислокаций при пластических деформациях;
  - Г. Механизмов переползания и скольжения дислокаций.
17. Две дислокации аннигилируют, потому что
- А. Дислокации имеют противоположные знаки;
  - Б. Дислокации имеют близкие значения векторов Бюргерса;
  - В. Скольжение дислокаций осуществляется вдоль кристаллографической плоскости, расположенной перпендикулярно краю экстраплоскости.
18. Установите соответствие между видами и классами дефектов, поставив в таблице ответов у буквы из первого столбца номер дефекта из второго столбца
- |                       |                    |
|-----------------------|--------------------|
| А. Точечные дефекты   | 1. Вакансии        |
| Б. Одномерные дефекты | 2. Границы наклона |

В. Двумерные дефекты

Г. Объемные дефекты

3. Примесные атомы

4. Дислокации

5. Экстраплоскости

6. Включения другой фазы

19. Для протекания дислокационных реакций необходимо выполнение следующих условий (выберите верное):

А. Сумма векторов Бюргерса дислокаций, вступающих в реакцию равна сумме векторов Бюргерса дислокаций, получающихся в результате реакции;

Б. Сумма векторов Бюргерса дислокаций, вступающих в реакцию меньше суммы векторов Бюргерса дислокаций, получающихся в результате реакции;

В. Сумма квадратов векторов Бюргерса дислокаций, вступающих в реакцию меньше суммы квадратов векторов Бюргерса дислокаций, получающихся в результате реакции;

Г. Сумма квадратов векторов Бюргерса дислокаций, вступающих в реакцию равна сумме квадратов векторов Бюргерса дислокаций, получающихся в результате реакции.

20. Тетраэдр Томпсона – это специальное геометрическое построение, используемое

А. Для определения возможных дислокационных реакций в кристаллах ОЦК;

Б. Для описания процесса размножения дислокаций при пластических деформациях кристалла;

В. Для определения возможных дислокационных реакций в кристаллах ГЦК.

## Контрольные вопросы для экзамена

### Часть 1

1. Физика реальных кристаллов один из важнейших разделов современной физики твердого тела. Идеальные и реальные кристаллы. Основные кристаллографические понятия.
2. Определение индексов кристаллографической плоскости по символам атомных рядов, по координатам трех узлов пространственной решетки. Индексы Миллера.
3. Основные свойства кристаллов. Типы элементарных ячеек. Явление полиморфизма. Особенности строения кристаллов магнитных материалов.
4. Плотнейшие шаровые упаковки в кристаллических структурах, основные характеристики ПШУ.
5. Классификация дефектов кристаллической решетки. Термодинамика реального кристалла.
6. Виды точечных дефектов. Комплексы точечных дефектов. Влияние точечных дефектов на физические свойства кристаллов. Способы создания неравновесной концентрации точечных дефектов.
7. Экспериментальные способы наблюдения точечных дефектов.
8. Краевые и винтовые дислокации. Вектор Бюргерса. Контур Бюргерса. Смешанные дислокации.
9. Элементы теории упругости. Упругое поле дислокаций. Энергия дислокации. Сила, действующая на дислокацию. Ядро дислокации.
10. Прямолинейные дислокации. Криволинейные дислокации. Дислокационные петли.
11. Взаимодействие дислокаций. Скольжение дислокаций.
12. Переползание дислокаций. Размножение дислокаций. Источник Франка-Рида.
13. Полные и частичные дислокации. Анализ процессов скольжения. Тетраэдр Томпсона.

14. Типы частичных дислокаций в ГЦК и ГПУ - решетках. Дислокационные реакции.
15. Дислокации в ионных кристаллах.
16. Вершинная дислокация. Поперечное скольжение дислокаций. Дислокационные сетки. Сетка Франка.
17. Механизмы образования трещин в кристаллах. Хрупкое и вязкое разрушение.
18. Взаимодействие дислокаций с точечными дефектами. Атмосферы Коттрелла, Снука, Судзуки и механизмы их образования.
19. Влияние дислокаций на магнитные свойства кристаллов. Малоугловые и большеугловые границы.
20. Механизмы зарождения дислокаций. Экспериментальные методы наблюдения дислокаций.
21. Понятие решетки Бравэ. Основные вектора решетки Бравэ. Ячейка Вигнера-Зейтца.
22. Структуры ОЦК и ГЦК как решетки Бравэ. Понятие координационного числа. Ячейки Вигнера-Зейтца для решеток ОЦК и ГЦК.
23. Обратная решетка. Обратное k-пространство.
24. Энергетическая зона. Понятие зоны Бриллюэна. Число разрешенных энергетических состояний. Образование энергетической щели.
25. Понятие поверхности Ферми. Экспериментальные методы исследования поверхности Ферми (эффекты Де-Гааза ÷ Ван-Альфена, Шубникова ÷ Де-Гааза).
26. Уровни электрона в периодическом потенциальном поле кристаллической решетки. Теорема Блоха.



## Часть 2

1. Кривая намагничивания. Намагниченность насыщения. Индукция, магнитная проницаемость, восприимчивость. Виды магнитной проницаемости и их определение.
2. Полупроводниковые высокопроницаемые магнитные материалы. Магнитомягкие ферриты. Химический состав, кристаллическая структура, особенности магнитной структуры. Особенности поведения намагниченности и электросопротивления в зависимости от температуры. Перспективы повышения качества.
3. Петля магнитного гистерезиса. Основные параметры петли гистерезиса. Предельная петля гистерезиса и частные петли, кривые возврата. Статическая и динамическая петли гистерезиса.
4. Магнитные материалы с наибольшей проницаемостью в слабых полях. Влияние химического состава на магнитные свойства, кристаллическую структуру, физические основы термомагнитной обработки, закалки, отжига. Основные магнитные свойства. Перспективы повышения качества.
5. Высокопроницаемые магнитные материалы с малыми потерями при перемагничивании с частотой 50 Гц (кремнистое железо). Химический состав, влияние содержания кремния на основные магнитные свойства. Кристаллическая структура, кристаллическая текстура. Влияние субструктуры и пластической деформации на коэрцитивную силу.
6. Энергия намагниченного тела. Графический способ определения максимального энергетического произведения  $(BH)_{\max}$ . Почему можно использовать величину  $(BH)_{\max}$  для оценки энергии магнитного материала. Чему равна энергия постоянного магнита?
7. Магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса и большой скоростью перемагничивания (ППГ - ферриты, тонкие магнитные

- пленки). Получение тонких магнитных пленок. Особенности их доменной структуры, анизотропии.
8. Магнитные свойства материалов в переменных магнитных полях. Динамическая кривая намагничивания и петля гистерезиса. Магнитная проницаемость, физический смысл составляющих магнитной проницаемости.
  9. Магнитомягкие материалы с пониженными потерями энергии при перемагничивании в полях звуковых частот (400-20000 Гц). Влияние химического состава на магнитные свойства, зависимость потерь на перемагничивание и коэрцитивной силы от толщины листа. Перспективы повышения качества.
  10. Магнитомягкие и магнитотвердые магнитные материалы. Физические основы классификации.
  11. Магнитострикционные (пьезомагнитные) материалы. Применение, основные характеристики. Перспективы развития.
  12. Основные факторы, влияющие на магнитные и электрические свойства магнитных материалов: химический состав, кристаллическая структура, атомное упорядочение, дефекты кристаллической решетки. Структурно чувствительные и структурно нечувствительные магнитные свойства.
  13. Технология изготовления кремнистого железа. Термическая обработка и влияние ее режимов на магнитные характеристики. Термомагнитная обработка. Особенности доменной структуры. Классификация сталей по ГОСТу и основные магнитные свойства. Перспективы повышения качества.
  14. Магнитные материалы с наибольшей намагниченностью насыщения: железо, железокобальтовые сплавы. Химический состав. Кристаллическая структура. Основные магнитные свойства, влияние примесей на ход кривой намагничивания. Перспективы повышения качества.

15. Магнитные материалы с постоянством проницаемости в слабых полях (перминвары, изопермы). Материалы с резкой зависимостью проницаемости от температуры.
16. Магнитотвердые материалы с умеренными значениями коэрцитивной силы и магнитной энергии.
17. Магнитные материалы с ЦМД (ортоферриты, ферриты-гранаты, гексаферриты).
18. Физические условия высококоэрцитивного состояния.
19. Магнитные материалы типа РЗМ-Со. Особенности кристаллической структуры и магнитные свойства.
20. Магнитотвердые материалы с повышенными значениями коэрцитивной силы и магнитной энергии (материалы типа ЮНДК).
21. Магнитотвердые ферриты. Кристаллическая структура и основные магнитные характеристики.
22. Основные требования, предъявляемые к сплавам для постоянных магнитов. Классификация магнитотвердых материалов. Задачи физики высококоэрцитивного состояния.
23. Особенности технологии получения и магнитных характеристик сплавов на основе редкоземельных металлов и кобальта.
24. Магнитотвердые материалы с большим значением коэрцитивной силы и повышенной магнитной энергией (ферриты кобальта, стронция, бария, сплавы Pt-Co).
25. Особенности магнитных характеристик магнитотвердых материалов на основе сплавов Nd-Fe-B. Перспективы повышения качества.
26. Динамическая петля гистерезиса и кривая намагничивания. Способы их измерения.
27. Основные особенности свойств аморфных магнитных материалов по сравнению с кристаллическими материалами.

28. Структурно-чувствительные и структурно-нечувствительные свойства магнитных материалов.
29. Основные виды магнитной проницаемости ферромагнетиков и их определение.
30. Тонкие магнитные пленки. Особенности их магнитных свойств и основные способы их получения. Характерные особенности доменной структуры тонких пленок.
31. Физические основы магнитной записи и воспроизведения информации.

### **Требования к рейтинг-контролю**

В семестре проводится два модуля, каждый из которых завершается письменной контрольной работой по решению задач или тестом. По сумме баллов, набранных студентом за два модуля, выставляется рейтинговая аттестация. Максимальное количество баллов, которые может получить студент за весь курс обучения равно 60. Дополнительные 10 баллов могут быть реализованы в период работы на семинарских занятиях (ответы у доски, доклады по темам рефератов). Для допуска к сдаче экзамена сумма баллов должна быть не менее 20. Семестр завершается экзаменом. Максимальное количество баллов, которые студент может получить за ответ на экзамене равно 40.

За активную работу на практических занятиях – 10 премиальных баллов.

### **VIII. Перечень педагогических и информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем**

В процессе освоения дисциплины «Магнетизм в конденсированных средах» используются традиционные формы лекций и практических занятий, написание рефератов. Способом контроля знаний студентов являются тестирование и контрольные работы.

Удельный вес практических занятий от общего количества часов курса составляет 33 %, лекций – 17 %, самостоятельной работы студентов – 50 %.

### **IX. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

<b>Наименование специальных* помещений</b>	<b>Оснащенность специальных помещений и помещений для самостоятельной работы</b>	<b>Перечень лицензионного программного обеспечения. Реквизиты подтверждающего документа</b>
Учебно-научная лаборатория магнитных и электрических измерений № 40 (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Лабораторные электронные весы с гирей M-ER 122ACF JR-600.01 LCD</li> <li>2. Вольтметр АКПП-2101</li> <li>3. Вольтметр АКПП-2101</li> <li>4. Источник питания с опцией интерфейса USB АКПП-1141</li> <li>5. Источник питания с опцией интерфейса USB АКПП-1141</li> <li>6. Компьютер iRU Corp 510 I5-2400/4096/500/G210-512/DVD-RW/W7S</li> <li>7. Компьютер с монитором 940N Core 6550 Vox/Asus P5KSE/2*1024DDRII/160/7200/DVDRW/</li> <li>8. Экран настенный ScreenMedia 153*203</li> <li>9. Мультиметр цифровой высокой точности UT804</li> <li>10. Установка импульсного намагничивания "Мишень"</li> <li>11. Мультиметр цифровой высокой точности UT804 (2 шт.)</li> <li>12. Электромагнит (3 шт.)</li> </ol>	<p>Microsoft Windows 10 Enterprise - Акт на передачу прав №1051 от 05.08.2020 г.</p> <p>MS Office 365 pro plus - Акт на передачу прав №1051 от 05.08.2020 г.</p> <p>Kaspersky Endpoint Security для Windows - Акт на передачу прав №1842 30.11.2020</p> <p>Архиватор 7-Zip - бесплатно</p> <p>Acrobat Reader DC - бесплатно</p> <p>Google Chrome – бесплатно</p> <p>Почта Outlook – бесплатно</p> <p>Origin 8.1 Sr2 - договор</p>

	13. Электромагнит ЭМ-1 14. Осциллограф С-1-68 15. Ферротестер 16. Блок питания Б5-9 17. Вольтметр В7-27А (2 шт.) 18. Генератор ГЗ-102 (3 шт.) 19. Источник питания Б-5-8 (2 шт.) 20. Осциллограф С-1-65 21. Генератор ГЗ-34 (2 шт.) 22. Блок питания Б-5-21 23. Микровеберметр Ф-190 24. Проектор BenQ MP777 25. Блок питания 26. Вольтметр В-7-23 27. Генератор ГЗ-109 28. Генератор Ф-578 29. Источник питания Б-5-21	№13918/М41 от 24.09.2009 с ЗАО «СофтЛайн Трейд»; NI MAX Measurement & Automation Explorer – бесплатно Microsoft Visual Studio 2019 - Акт на передачу прав №1051 от 05.08.2020 г. Mozilla Firefox - бесплатно
--	---	--

### Помещения для самостоятельной работы:

Наименование помещений	Оснащенность помещений для самостоятельной работы	Перечень лицензионного программного обеспечения. Реквизиты подтверждающего документа
Помещение для самостоятельной работы, учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации,	1. Компьютер RAMEC STORM C2D 4600/160Gb/ 256mB/DVD-RW +Монитор LG TFT 17" L1753S-SF – 12 шт 2. Мультимедийный комплект учебного класса (вариант № 2) Проектор Casio XJ-M140, настенный проекц. экран Lumien 180*180. ноутбук Dell N4050. сумка 15,6", мышь 3. Коммутатор D-Link 10/100/1000mbps 16-portr DGS-1016D 4. Видеокамера IP-FALCON EYE FE-IPC-BL200P, ОнЛайн Трейд ООО 5. Видеокамера IP-FALCON EYE FE-IPC-BL200P, ОнЛайн Трейд	Adobe Acrobat Reader DC - бесплатно Cadence SPB/OrCAD 16.6 - Государственный контракт на поставку лицензионных программных продуктов 103 - ГК/09 от 15.06.2009 Google Chrome - бесплатно Java SE Development Kit 8 Update 45 (64-bit) - бесплатно Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows – Акт на передачу прав №2129 от 25 октября 2016 г. Lazarus 1.4.0 - бесплатно Lego MINDSTORM EV3 - бесплатно Mathcad 15 M010 - Акт предоставления прав ИС00000027

<p>практики, Компьютерный класс физико- технического факультета. Компьютерная лаборатория робототехнических систем №4а (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)</p>	<p>ООО 6. Демонстрационное оборудование комплект «LegoMidstormsEV3» 7. Комплект учебной мебели</p>	<p>от 16.09.2011 MATLAB R2012b - Акт предоставления прав № Us000311 от 25.09.2012 Microsoft Express Studio 4 - бесплатно MiKTeX 2.9 - бесплатно MPICH 64-bit – бесплатно MSXML 4.0 SP2 Parser and SDK - бесплатно Microsoft Windows 10 Enterprise - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017 MS Office 365 pro plus - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017</p>
--	--	--

## Х. Сведения об обновлении рабочей программы дисциплины

№ п.п.	Обновленный раздел рабочей программы дисциплины (модуля)	Описание внесенных изменений	Дата и протокол заседания, утвердившего изменения
1	Раздел IV	Скорректирован фонд оценочных средств для проверки уровня сформированности закрепленных за дисциплиной компетенций	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г
2	Раздел IV	Скорректированы задания для промежуточной аттестации в соответствии с обновленным «Положением о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) студентов ТвГУ»	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г.
3	Раздел V	Обновлен перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г
4	Раздел IX	Оснащенность аудиторного фонда для проведения учебных занятий и самостоятельной работы студентов согласно «Справки МТО ООП ...»	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г
5	Раздел IV	Скорректирован фонд оценочных средств для проверки уровня сформированности закрепленных за дисциплиной компетенций	Протокол Совета ФТФ № 6 от 15.01.2019 г.
6	Раздел IV	Внесены изменения в соответствии с «Положением о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) обучающихся по программам высшего образования ТвГУ»	Протокол Совета ФТФ № 10 от 19.05.2020 г.
7	Раздел IV	Внесены изменения в соответствии с «Положением о рейтинговой системе обучения в ТвГУ»	Протокол Совета ФТФ № 10 от 19.05.2020 г.
8	Раздел IX	Актуализированы данные на основе Справки МТО ООП	Протокол Совета ФТФ №14 от 03.07.2021
9	Раздел V	Обновлен перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины	Протокол Совета ФТФ №14 от 03.07.2021