

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»**

Обнинский институт атомной энергетики

**Физико-энергетический факультет
Кафедра материаловедения**

**И.А.АНТОШИНА, К.А.ГОРЧАКОВ, П.В.ДЕМЕНКОВ,
Ю.В.КОНОБЕЕВ, Ю.В.ЛИСИЧКИН, В.Г.МАЛЫНКИН,
О.А.ПЛАКСИН, В.А.СТЕПАНОВ, П.А.СТЕПАНОВ**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
по материаловедческим дисциплинам**

Часть 1

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»**

Обнинский институт атомной энергетики

**Физико-энергетический факультет
Кафедра материаловедения**

**И.А.АНТОШИНА, К.А.ГОРЧАКОВ, П.В.ДЕМЕНКОВ,
Ю.В.КОНОБЕЕВ, Ю.В.ЛИСИЧКИН, В.Г.МАЛЫНКИН,
О.А.ПЛАКСИН, В.А.СТЕПАНОВ, П.А.СТЕПАНОВ**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
по материаловедческим дисциплинам**

Часть 1

*Рекомендовано к изданию
редакционно-издательским советом*

Обнинск 2015

УДК 620.1

Антошина И.А., Горчаков К.А., Деменков П.В., Конобеев Ю.В., Лисичкин Ю.В., Малышкин В.Г., Плаксин О.А., Степанов В.А., Степанов П.А. Учебно-методическое пособие по материаловедческим дисциплинам. Ч.1. – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2015. – 138 с.

Пособие состоит из описаний учебно-методических комплексов (целей, содержания, средств текущего и промежуточного контроля знаний студентов) базовых дисциплин направлений подготовки «Материаловедение и технологии материалов» и «Наноматериалы». Дисциплины приведены в последовательности их изучения в бакалавриате и магистратуре. Пособие предназначено, как для преподавателей, так и для студентов.

Рецензенты: к.т.н., заместитель генерального директора, директор ОИРМиТ ОАО «ГНЦ РФ-ФЭИ», А.Е.Русанов, д.т.н., начальник цеха АО «ОНИП «Технология», Д.В.Харитонов

© ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2015 г.

© И.А.Антошина, К.А.Горчаков, П.В.Деменков, Ю.В.Конобеев, Ю.В.Лисичкин, В.Г.Малышкин, О.А.Плаксин, В.А.Степанов, П.А.Степанов, 2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
История науки о материалах	6
Физика конденсированного состояния вещества	13
Теоретическая физика	22
Уравнения переноса в твердых телах	44
Фазовые равновесия и структурообразование	50
Кристаллография, рентгенография и электронная спектроскопия	70
Механика материалов и физика прочности	91
Физическое материаловедение	102
Общее материаловедение и технологии материалов	109
Математическое моделирование и современные проблемы наук о материалах	128

ВВЕДЕНИЕ

В пособии приведены методические материалы по дисциплинам, читаемым на кафедре Материаловедения ИАТЭ НИЯУ МИФИ студентам материаловедческих направлений подготовки в последовательности их изучения в бакалавриате и магистратуре. В первой части – это, в основном, базовые дисциплины. Каждый раздел содержит цель, план дисциплины, структурированный по темам, и средства текущего и промежуточного контроля знаний студентов.

Текущий контроль, как правило, проводится два раза в семестр для своевременной обратной связи и коррекции обучения, а также активизации самостоятельной работы студентов. Текущий контроль может быть в виде контрольных работ, домашних заданий, коллоквиумов, студенческих рефератов, тестовых заданий. Результаты контроля подводятся в соответствии с уровнем освоения студентами материала, предусмотренного программой дисциплины, умением использовать теоретические знания при выполнении заданий и решении задач.

Отметка «отлично» ставится, если изученный материал изложен полно, верно сформулированы определения и ответ свидетельствует о понимании материала, студент может применить знания в решении задач и примеров.

Отметка «хорошо» ставится, если изученный материал изложен достаточно полно или задачи в целом решены, но допускаются ошибки, которые обучающийся в состоянии исправить самостоятельно при наводящих вопросах.

Отметка «удовлетворительно» ставится, если материал изложен неполно, с неточностями в определениях, студент не может доказательно обосновать решения примеров и задач, на 50% дополнительных вопросов или заданий даны неверные ответы.

Отметка «неудовлетворительно» ставится, если обнаруживается полное незнание и непонимание изучаемого материала, даны неверные ответы более чем на 50% дополнительных вопросов, заданий, примеров.

По окончании освоения дисциплины проводится промежуточная аттестация в виде экзамена или зачета. Наивысшая итоговая оценка за дисциплину выставляется, если студент при ответе на вопросы экзаменационного или зачетного билета демонстрирует глубокое и прочное усвоение знаний материала,

может последовательно изложить теоретический материал и сделать выводы по излагаемому материалу.

Оценка «хорошо» соответствует достаточно полному знанию программного материала. Студент демонстрирует знание основных теоретических понятий и достаточно последователен в ответах.

Общее знание изучаемого материала и владение только основным понятийным аппаратом дисциплины соответствует отметке «удовлетворительно».

Незачет или отметка «неудовлетворительно» на экзамене соответствуют незнанию значительной части программного материала, неумению строить ответы и делать выводы по излагаемому материалу.

ИСТОРИЯ НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ

Цель изучения дисциплины:

овладение основными сведениями по истории физического материаловедения, знаниями о главных исторических этапах развития научного материаловедения, о базовых принципах теоретического и экспериментального исследования и создания материалов с заранее заданными свойствами, о выдающихся мировых и отечественных учёных-материаловедах.

Содержание дисциплины, структурированное по разделам (темам)

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
1	Основные исторические этапы развития материаловедения	Предмет, роль и место курса в системе подготовки материаловедов. Предмет и структура материаловедения как науки. Фундаментальное и техническое (прикладное) материаловедение. Направления и разделы в фундаментальном материаловедении (физическое, химическое и др.). Становление и последующее формирование материаловедения как интегральной науки о разнообразных материалах. Вклад и роль выдающихся ученых. Особенности исторического

		<p>развития материаловедения в России, Калужском регионе и Обнинске. Материаловедческие комплексы в ядерной энергетике и промышленности, в авиационной и космической отраслях. Подготовка материаловедов в ведущих вузах (МГУ, МФТИ, МИФИ, МИСиС и др.). Обучение студентов по физике металлов и МТМ в Обнинском филиале МИФИ, ИАТЭ. Материаловедческие подразделения и кадры в ФЭИ, НПО “Технология”, ФХИ им. Карпова. Основные научные направления и достижения этих вузов и НИИ.</p>
2	История реализации основных методов познания в материаловедении.	<p>Критерии научности. Специфика науки. Индуктивный, гипотетико-дедуктивный, конструктивный и прагматический методы (реализация в материаловедении). Качественные и количественные понятия в экспериментальном знании. Взаимосвязь эксперимента и теории. Принципы наблюдаемости, относительной к средствам наблюдения, дополнительности. Измерение в материаловедении. Методология научно-исследовательских программ. Научная парадигма и революции в материаловедении.</p>
3	История развития экспериментальных методов в физическом материаловедении	<p>методологические принципы проведения физического эксперимента в материаловедении. Структура физического эксперимента. Постановка физических задач в материаловедении. Моделирование материаловедческого эксперимента (полномасштабное, математическое, масштабное, аналоговое и др.). Тезаурус в материаловедческих теориях. Методологическое обоснование выбора техники эксперимента и создания экспериментальных установок. Методология проведения измерений, их автоматизации. Обработка, анализ, физическая интерпретация и представление результатов эксперимента. Методы и средства физических измерений. Измерения и физические величины. Методологическая классификация измерений.</p>

Контрольная работа 1 - Характеристика основных стадий интуитивно-эмпирического и научного этапов материаловедения, типовые вопросы

<p><i>Вариант 1</i> Виды материалов, которые использовались на заре человеческой цивилизации.</p>	<p><i>Вариант 6</i> История изобретения доменной печи</p>	<p><i>Вариант 11</i> История применения дифракции рентгеновских лучей к изучению атомной структуры материалов</p>
<p><i>Вариант 2</i> Использование и обработка материалов в каменном веке</p>	<p><i>Вариант 7</i> История изобретения мартена</p>	<p><i>Вариант 12</i> История открытия сверхпроводящих материалов</p>
<p><i>Вариант 3</i> Способы создания и обработки материалов в бронзовом веке</p>	<p><i>Вариант 8</i> Начало научного этапа развития материаловедения, роль отечественных учёных</p>	<p><i>Вариант 13</i> История открытия высокотемпературных сверхпроводников</p>
<p><i>Вариант 4</i> Причины завершения бронзового века и перехода к использованию и обработке материалов из железа</p>	<p><i>Вариант 9</i> Вклад Д.И. Менделеева в создание научной базы материаловедения</p>	<p><i>Вариант 14</i> История открытия углеродных наноматериалов</p>
<p><i>Вариант 5</i> История изобретения вагранки</p>	<p><i>Вариант 10</i> История создания теории теплоёмкости твёрдых тел</p>	<p><i>Вариант 15</i> История открытия радиационных эффектов в конструкционных материалах ядерных реакторов</p>

Контрольная работа 2 - Основные этапы истории реализации методов познания в материаловедении, типовые вопросы

<p><i>Вариант 1</i> Исторически сложившиеся формы познания. Критерии научности знания. Специфика науки.</p>	<p><i>Вариант 4</i> Качественные и количественные понятия в экспериментальном знании (на примере физического материаловедения).</p>	<p><i>Вариант 7</i> Методология научно-исследовательских программ в материаловедении</p>
<p><i>Вариант 2</i> Реализация в физическом материаловедении индуктивного метода познания (примеры)</p>	<p><i>Вариант 5</i> Взаимосвязь экспериментальных и теоретических методов исследования в физическом материаловедении (примеры).</p>	<p><i>Вариант 8</i> Научная парадигма в материаловедении</p> <p><i>Вариант 9</i> Революции в материаловедении</p>
<p><i>Вариант 3</i> Реализация в физическом материаловедении гипотетико-дедуктивного метода познания (примеры)</p>	<p><i>Вариант 6</i> Принципы наблюдаемости и дополнителности. Измерение в физическом материаловедении</p>	

Контрольная работа 3 - Характеристика исторического развития методов экспериментальных исследований в физическом материаловедении, типовые вопросы

1. Исторически сложившиеся общие методологические принципы проведения эксперимента в физическом материаловедении.
2. Типичная структура эксперимента в физическом материаловедении.
3. Источники возникновения физических задач в экспериментальном материаловедении.
4. Моделирование материаловедческого эксперимента (полномасштабное, математическое, масштабное, аналоговое и др.).
5. Принципы обоснования выбора техники эксперимента.

6. Методы создания экспериментальных установок.
7. Методология проведения измерений в физическом материаловедении.
8. Роль и формы автоматизации материаловедческого эксперимента.
9. Исторические аспекты развития методов обработки, анализа, интерпретации и представления результатов материаловедческого эксперимента.
10. История развития методов и средств измерений в физическом материаловедении.
11. История структурных исследований материалов.
12. Недостатки и преимущества различных методов структурных исследований (рентгенографии, электронографии, нейтронографии, синхротронного излучения).
13. История изучения атомно-молекулярной динамики материалов.
14. История исследования термодинамических свойств материалов.
15. История открытия сверхпроводников.
16. История изучения физических свойств аморфных сплавов.
17. История исследования наноструктурированных материалов.

Вопросы к зачету

1. Предмет, структура, направления и разделы материаловедения как науки.
2. Фундаментальное и техническое (прикладное) материаловедение. Направления и разделы в фундаментальном материаловедении (физическое, химическое и др.).
3. Основные исторические этапы развития разделов физики, оказавших влияние на зарождение и развитие физического материаловедения.
4. Становление и последующее формирование материаловедения как интегральной науки о разнообразных материалах. Вклад и роль выдающихся ученых.
5. Методологические особенности экспериментальных и теоретических исследований в физическом материаловедении.
6. Особенности исторического развития материаловедения в России, Калужском регионе и Обнинске.
7. Создание и применение материалов в ядерной энергетике и промышленности, в авиационной и космической отраслях. Становление соответствующих материаловедческих

комплексов.

8. Подготовка специалистов по материаловедению в ведущих вузах страны (МГУ, МГТУ, МИФИ, МИСиС и др.).
9. Обучение студентов материаловедческого профиля в Обнинском филиале МИФИ, ИАТЭ.
10. Характеристика научно-педагогических кадров, внесших существенный вклад в становление и развитие подготовки специалистов-материаловедов в ОФ МИФИ, ИАТЭ.
11. Материаловедческие подразделения и кадры в ФЭИ, НПО “Технология”, ФХИ им. Карпова.
12. Развитие основных научных направлений и достижения НИИ (см. вопрос 11)) в материаловедении.
13. Критерии научности. Специфика науки.
14. Индуктивный, гипотетико-дедуктивный, конструктивный и прагматический методы (реализация в физическом материаловедении).
15. Качественные и количественные понятия в экспериментальном знании (на примере физического материаловедения).
16. Взаимосвязь экспериментальных и теоретических методов исследования в физическом материаловедении.
17. Принципы наблюдаемости, относительной к средствам наблюдения, дополнительности. Измерение в физическом материаловедении.
18. Методология научно-исследовательских программ.
19. Научная парадигма и революции в материаловедении.
20. Исторически сложившиеся общие методологические принципы проведения эксперимента в физическом материаловедении.
21. Типичная структура эксперимента и постановка задач в экспериментальном физическом материаловедении.
22. Моделирование материаловедческого эксперимента (полномасштабное, математическое, масштабное, аналоговое и др.).
23. Методологическое обоснование выбора техники эксперимента и создания экспериментальных установок.
24. Методология проведения измерений, их автоматизации.
25. Исторические аспекты развития методов обработки, анализа, интерпретации и представления результатов материаловедческого эксперимента.
26. Методы и средства измерений в физическом материаловедении (история развития).

27. История и методология структурных исследований материалов. Недостатки и преимущества различных методов (рентгенографии, электронографии, нейтронографии, синхротронного излучения и др).
28. История и методология изучения атомно-молекулярной динамики материалов.
29. История и методология исследования термодинамических свойств материалов.
30. История и методология открытия, изучения и применения сверхпроводников.
31. История и особенности методологии изучения физических свойств аморфных сплавов.
32. История и методология исследования наноструктурированных материалов.
33. История и методология использования квазичастиц в теоретическом физическом материаловедении.
34. История применения квантовой механики к теоретическому объяснению свойств макроскопических свойств материалов (на примере теории теплоёмкости твёрдых тел и т.п.)

Литература

а) основная учебная литература:

1. Физическое материаловедение: Учебник для вузов в 1 т./ Под общей ред. Калина Б.А /Б.А. Калинин и др.- М.: МИФИ, 2012.. – 764 с.
2. Физическое материаловедение: Учебник для вузов в 2 т./ Под общей ред. Калина Б.А /Б.А. Калинин и др.- М.: МИФИ, 2012.. – 604 с.
3. Никифоров А.Л. Философия науки: история и методология. – М.: Дом интеллектуальной книги. 1998.
4. Лисичкин Ю.В. Метрология и техника эксперимента в физическом материаловедении. Учебное пособие. – Обнинск.: ИАТЭ, 2006, 76с.
5. Лисичкин Ю.В. Техника физического эксперимента. Учебное пособие. – Обнинск. ИАТЭ. 1997. 70с.
6. Лакатос И. Методология научных исследовательских программ. // Вопросы философии. 1995. №4. С.135-154.

б) дополнительная учебная литература:

1. Фейерабэнд П.К. Избранные труды по методологии науки. – М.: Прогресс. 1986
2. Лавренчик В.Н. Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов. – М.: Энергоатомиздат. 1986. 272с.
3. В.А.Канке. Основные философские направления и концепции науки. Итоги XX столетия. – М.: Логос. 2000. 320с.
4. Лисичкин Ю.В. Анализ экспериментальных данных в нейтронной спектроскопии конденсированных сред. Учебное пособие. – Обнинск. ИАТЭ. 2004.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Цель изучения дисциплины:

усвоение базовых концепций физики конденсированного состояния вещества, методов решения задач по физике твердого тела, знакомство с постановками классических физических экспериментов

Содержание дисциплины, структурированное по разделам (темам)

1 семестр

Темы	
1. Периодические структуры	Трансляционная симметрия. Ячейка Вигнера-Зейтца. Периодические функции. Свойства обратной решетки. Зона Бриллюэна. Приведение к зоне Бриллюэна. Граничные условия.
2. Колебания решетки, теплоемкость (продолжение)	Динамика решетки. Свойства колебаний решетки. Удельная теплоемкость решетки. Модели Эйнштейна и Дебая. Ангармонизм и тепловое расширение. Спектральная плотность колебаний. Дифракция на кристалле. Фононы. Фактор Дебая-Уоллера.
3. Электронные состояния	Одномерные квантовые задачи, Свободные электроны. Ферми статистика, фермионы. Энергия Ферми, поверхность Ферми, плотность состояний. Электронная

	<p>теплоемкость, парамагнитная восприимчивость Электронная зонная структура. Закон дисперсии электронов. Квазиимпульс. Закон дисперсии электронов. Эффективная масса. Металлы, диэлектрики, полупроводники. Зонная структура в приближении сильной и слабой связи.</p>
--	--

2 семестр

Темы	
1. Кинетические эффекты	<p>Теплопроводность решетки. Электропроводность, температурная зависимость, электрон-фононное взаимодействие, остаточное сопротивление. Эффект Холла, гальваномагнитные эффекты, скин эффект, циклотронный резонанс.</p>
2. Полупроводники	<p>Валентная зона. Электроны и дырки. Электропроводность. Плотность носителей тока. Собственная и примесная проводимости. Донорные и акцепторный уровни. Химический потенциал. p-n переход. Экситоны.</p>

3 семестр

Темы	
1. Магнетизм	<p>Парамагнетизм. Ферромагнетизм, температура Кюри. Обменное взаимодействие. Домены и доменные стенки. Спиновые волны. Магноны. Антиферромагнетизм. Однодоменность, петля гистерезиса, суперпарамагнетизм. Магнитная запись и другие приложения магнитных наночастиц.</p>
2. Сверхпроводимость и сверхтекучесть	<p>Притяжение между электронами. Куперовские пары. Квазичастицы и энергетическая щель. Критический ток. Критическое магнитное поле. Спектр элементарных возбуждений в жидком</p>

гелии. Фононы и ротоны. Критерий сверхтекучести Ландау, фононы и ротоны. Лямбда точка. Бозе-Эйнштейновская конденсация.

Контрольная работа 1 - типовые задания (вопросы):

1. Как связаны базисные векторы обратной решетки с базисными векторами решетки \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 и \mathbf{a}_3 ?
2. Объем элементарной ячейки, атомарный объем Ω и число атомов на единицу объема $N_0=1/\Omega$ в гранецентрированной кубической (**гцк**, *англ. fcc*) решетке.
3. Объем элементарной ячейки, атомарный объем Ω и число атомов на единицу объема $N_0=1/\Omega$ в объемно центрированной кубической (**оцк**, *англ. bcc*) решетке.
4. Объем элементарной ячейки, атомарный объем Ω и число атомов на единицу объема $N_0=1/\Omega$ в гексагональной плотноупакованной (**гпу**, *англ. hcp*) решетке
5. Чему равно отношение c/a для идеальной гексагональной структуры с плотной упаковкой?
6. Какие плоскости в гцк и оцк решетке являются наиболее плотно упакованными? В каких направлениях в этих решетках линейная плотность атомов максимальна?
7. Какие плоскости в гпу решетке являются наиболее плотно упакованными? В каких направлениях в гпу решетке линейная плотность атомов максимальна?
8. Приведите примеры химических элементов и сплавов на их основе с гранецентрированной кубической (гцк) решеткой.
9. Приведите примеры химических элементов и сплавов на их основе с объемно-центрированной кубической (оцк) решеткой.
10. Приведите примеры химических элементов с гексагональной плотноупакованной (гпу) решеткой
11. Укажите индексы Миллера-Бравэ для всех боковых граней шестигранной призмы (так называемой *призмы первого положения*) ГПУ- решетки.
12. Укажите индексы Миллера-Бравэ для всех боковых граней шестигранной призмы (так называемой *призмы первого положения*) ГПУ- решетки.
13. Укажите индексы Миллера-Бравэ для всех боковых граней шестигранной призмы второго положения в ГПУ- решетке.

14. Изобразите форму ячейки Вигнера-Зейтца для оцк-решетки.

Контрольная работа 2- типовые вопросы:

1. Каков закон дисперсии для колебаний линейной периодической цепочки одинаковых атомов?
2. Изобразите схематически закон дисперсии колебаний для линейной, периодической цепочки из двух разных по массе атомов.
3. Связь дебаевской частоты колебаний решетки со скоростью звука и межатомным расстоянием.
4. Температурная зависимость теплоемкости решетки при низких и высоких температурах (законы Дебая и Дюлонга-Пти).
5. Какова максимальная энергия фононов в кристалле свинца, если его температура Дебая равна 300К? Постоянная Больцмана равна $1/11604.5$ эВ/град К.
6. Чем кроме частот отличаются продольные и поперечные акустические колебания трехмерной решетки?
7. Спектральная плотность колебаний решетки.
8. Колебательная энтропия кристаллической решетки.
9. Влияние ангармонизма колебаний решетки на ее теплоемкость при высоких температурах.
10. Природа теплового расширения кристаллов.
11. Картина связей в твердых телах.
12. Зонная картина уровней электронов в твердых телах.
13. Как образуются зоны разрешенных энергий электронов в кристаллах?
14. Правило Юма-Розери и плотность состояний.
15. Статистика Ферми для электронов. Энергия Ферми. Поверхность Ферми.
16. Температурная зависимость теплоемкости электронов.

Контрольная работа 3- типовые вопросы:

1. Кинетическое уравнение для переноса электронов
2. Время релаксации для электронов. Длина свободного пробега.
3. Электропроводность.
4. Подвижность.
5. Кинетические коэффициенты. Термоэлектрический эффект.
6. Теплопроводность электронов. Закон Видемана-Франца.
7. Термоэлектрический эффект Зеебека.

8. Термоэлектрический эффект Пельтье.
9. Теплопроводность решетки. Процессы переброса.

Контрольная работа 4- типовые вопросы:

1. Какова зависимость энергии от импульса для электронов возле дна зоны проводимости и для дырок возле верхнего края валентной зоны?
2. Зависимость от температуры концентрации электронов и дырок в собственном полупроводнике.
3. Зависимость от температуры концентрации электронов и дырок в собственном полупроводнике.
4. Зависимость от температуры концентрации дырок в полупроводнике с дырочной проводимостью (р-полупроводнике).
5. Зависимость от температуры концентрации электронов в полупроводнике с электронной проводимостью (п-полупроводнике).
6. В чем разница электронной зонной структуры для полупроводников, диэлектриков и металлов?
7. Картина уровней энергии электронов в р-п-переходе.
8. Каков физический смысл эффективной массы электрона и дырок в полупроводниках?

Вопросы для коллоквиума 1

1. Законы Кюри и Кюри-Вейса.
2. Температурная зависимость намагниченности насыщения в ферромагнетиках.
3. Природа магнитного гистерезиса в ферромагнетиках.
4. Магнитная структура антиферромагнетика.
5. Ферромагнитные домены и петля гистерезиса.
6. В чем состоит различие между сверхпроводниками 1 и 2-го рода.

Вопросы для коллоквиума 2

1. Диаграмма состояний He-4 в фазовом пространстве «давление-температура».
2. Термо-механический эффект в сверхтекучем гелии.
3. Эффект «фонтанирования» и его объяснение в двух-жидкостной модели Тисса.

4. Критерий сверхтекучести гелия по Ландау.
5. Критика теории Бозе-Эйнштейновской конденсации.
6. В чем состоит эффект Мейснера?
7. Почему, несмотря на кулоновское отталкивание, электроны образуют куперовские пары?

Вопросы к зачету

Периодические структуры

1. Как связаны базисные векторы обратной решетки с базисными векторами решетки \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 и \mathbf{a}_3 ?
2. Объем элементарной ячейки, атомарный объем Ω и число атомов на единицу объема $N_0=1/\Omega$ в гранецентрированной кубической (**гцк**, *англ. fcc*) решетке.
3. Объем элементарной ячейки, атомарный объем Ω и число атомов на единицу объема $N_0=1/\Omega$ в объемно центрированной кубической (**оцк**, *англ. bcc*) решетке.
4. Объем элементарной ячейки, атомарный объем Ω и число атомов на единицу объема $N_0=1/\Omega$ в гексагональной плотно-упакованной (**гпу**, *англ. hcp*) решетке
5. Чему равно отношение c/a для идеальной гексагональной структуры с плотной упаковкой ?
6. Какие плоскости в гцк и оцк решетке являются наиболее плотно упакованными? В каких направлениях в этих решетках линейная плотность атомов максимальна?
7. Какие плоскости в гпу решетке являются наиболее плотно упакованными? В каких направлениях в гпу решетке линейная плотность атомов максимальна?
8. Приведите примеры химических элементов и сплавов на их основе с гранецентрированной кубической (гцк) решеткой.
9. Приведите примеры химических элементов и сплавов на их основе с объемно-центрированной кубической (оцк) решеткой.
10. Приведите примеры химических элементов с гексагональной плотноупакованной (гпу) решеткой
11. Укажите индексы Миллера-Бравэ для всех боковых граней шестигранной призмы (так называемой *призмы первого положения*) ГПУ- решетки.
12. Укажите индексы Миллера-Бравэ для всех боковых граней шестигранной призмы (так называемой *призмы первого положения*) ГПУ- решетки.

13. Укажите индексы Миллера-Бравэ для всех боковых граней шестигранной призмы второго положения в ГПУ- решетке.

14. Изобразите форму ячейки Вигнера-Зейтца для оцк-решетки.

Колебания решетки.

1. Каков закон дисперсии для колебаний линейной периодической цепочки одинаковых атомов?
2. Изобразите схематически закон дисперсии колебаний для линейной, периодической цепочки из двух разных по массе атомов.
3. Связь дебаевской частоты колебаний решетки со скоростью звука и межатомным расстоянием.
4. Температурная зависимость теплоемкости решетки при низких и высоких температурах (законы Дебая и Дюлонга-Пти).
5. Какова максимальная энергия фононов в кристалле свинца, если его температура Дебая равна 300К? Постоянная Больцмана равна $1/11604.5$ эВ/град К.
6. Чем кроме частот отличаются продольные и поперечные акустические колебания трехмерной решетки?
7. Спектральная плотность колебаний решетки.
8. Колебательная энтропия кристаллической решетки.
9. Влияние ангармонизма колебаний решетки на ее теплоемкость при высоких температурах.
10. Природа теплового расширения кристаллов.

Электронные состояния

1. Картина связей в твердых телах.
2. Зонная картина уровней электронов в твердых телах.
3. Как образуются зоны разрешенных энергий электронов в кристаллах?
4. Правило Юма-Розери и плотность состояний.
5. Статистика Ферми для электронов. Энергия Ферми. Поверхность Ферми.
6. Температурная зависимость теплоемкости электронов

Вопросы к экзамену

1. Законы Кюри и Кюри-Вейса.
2. Температурная зависимость намагниченности насыщения в ферромагнетиках.
3. Природа магнитного гистерезиса в ферромагнетиках.
4. Магнитная структура антиферромагнетика.

5. Ферромагнитные домены и петля гистерезиса.
6. В чем состоит различие между сверхпроводниками 1 и 2-го рода.
7. Диаграмма состояний He-4 в фазовом пространстве «давление-температура».
8. Термо-механический эффект в сверхтекучем гелии.
9. Эффект «фонтанирования» и его объяснение в двухжидкостной модели Тисса.
10. Критерий сверхтекучести гелия по Ландау.
11. Критика теории Бозе-Эйнштейновской конденсации.
12. В чем состоит эффект Мейснера?
13. Почему, несмотря на кулоновское отталкивание, электроны образуют куперовские пары?

Литература

а) основная учебная литература:

1. Ч. Киттель, Введение в физику твердого тела, «Наука», Москва, 1989.
2. Н.Б. Брандт, С.М. Чудинов, Электронная структура металлов. Из-во МГУ, 1973.
3. В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников, Физика полупроводников. «Наука», Москва, 1977.
4. А.М. Косевич, Основы механики кристаллической решетки. «Наука», Москва, 1972.
5. П. Гроссе, Свободные электроны в твердых телах. «Мир», Москва, 1982.
6. Дж. Займан, Принципы теории твердого тела. «Мир», Москва, 1974.
7. Н. Ашкрофт, Н. Мермин. Физика твердого тела. В 2-х томах. «Мир», Москва, 1979.
8. С.В. Вонсовский, М.И. Кацнельсон. Квантовая физика твердого тела. «Наука», Москва, 1983.
9. П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. Физика твердого тела, «Высшая школа», Москва, 2000.

б) дополнительная учебная литература:

1. А.С. Давыдов, Теория твердого тела. «Наука», Москва, 1976.
 2. У. Харрисон, Теория твердого тела. «Мир», Москва, 1972.
 3. О. Маделунг, Теория твердого тела. «Наука», Москва, 1980.
 4. Ф.Дж. Блат, Теория подвижности электронов в твердых телах
- 20

5. А.А. Абрикосов, Введение в теорию нормальных металлов. «Наука», Москва, 1976.
6. Дж. Рейсленд. Физика фононов. «Мир», Москва, 1975.
7. И.М. Лифшиц, М.Я. Азбель, М.И. Каганов, Электронная теория металлов. «Наука», Москва, 1971.
8. Г. Лейбфрид, Микроскопическая теория механических и тепловых свойств кристаллов. «Физ-Мат-Лит», 1963.
9. Задачи по физике твердого тела, ред. Г.Дж. Голдсмит, Наука, Москва, 1976.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Цель изучения дисциплины:

- научить основным понятиям, законам и методам теоретической физики: классической и релятивистской механики, теории упругости, классической электродинамики, квантовой механики, термодинамики и статистической механики;
- получение навыков по решению конкретных задач теории упругости для изотропных и анизотропных упругих тел, задач, связанных с электромагнитными явлениями в конденсированных средах, задач по квантовой механике и статистической физике в приложении к твердым телам.

Содержание дисциплины, структурированное по разделам (темам)

1 семестр

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
	Механика	
1	Общие принципы механики	Задачи механики. Обобщенные координаты и импульсы. Принцип наименьшего действия. Функции Лагранжа. Уравнение Лагранжа. Принцип относительности Галилея. Законы сохранения энергии, импульса и момента импульса.
2	Законы сохранения	Интегралы движения. Энергия, импульс, момент импульса. Однородность времени,

	механике	однородность и изотропность пространства. Законы сохранения энергии, импульса и момента импульса. Центр инерции. Аддитивность массы.
3	Интегрирование уравнений движения Лагранжа	Механическое подобие. Одномерное движение. Финитное и инфинитное движение. Приведенная масса. Введение в движение в центральном поле. Циклические координаты. Секториальная скорость. Движение в центральном поле. Эффективная потенциальная энергия. Центробежная энергия. Кеплерова задача. Траектории материальных точек в гравитационном и кулоновском полях.
4	Столкновение частиц	Распад частиц. Распределение распадных частиц по направлениям и энергии. Упругие столкновения частиц. Максимальная переданная энергия. Рассеяние частиц. Эффективное сечение рассеяния. Рассеяние заряженных частиц в кулоновском поле. Формула Резерфорда. Рассеяние под малыми углами. Распределение рассеянных частиц по направлениям и энергии.
5	Малые колебания	Устойчивое равновесие системы. Свободные одномерные колебания. Гармонические колебания. Комплексная амплитуда. Вынужденные колебания. Резонанс. Колебания систем со многими степенями свободы. Нормальные координаты. Нормальные колебания. Вырожденные колебания. Колебания молекул. Колебательные степени свободы молекул. Затухающие колебания. Диссипация энергии. Вынужденные колебания при наличии трения. Дисперсионная зависимость поглощенной энергии от частоты.
6	Движение	Движение твердого тела. Угловая скорость.

	твёрдого тел	Тензор инерции. Момент импульса твёрдого тела. Уравнения движения твёрдого тела. Эйлеровы углы. Уравнения Эйлера. Движение в неинерциальной системе отсчета.
7	Метод Гамильтона в классической механике	Уравнение движения Гамильтона. Канонические преобразования. Скобки Пуассона. Законы сохранения. Уравнение Гамильтона-Якоби. Разделение переменных. Адиабатические инварианты.
8	Основные уравнения теории упругости	Тензор деформации. Тензор напряжений. Термодинамика деформирования. Закон Гука. Однородные деформации. Уравнение равновесия изотропных тел. Упругие свойства кристаллов.
9	Упругие волны	Уравнение движения упругой среды. Упругие волны в изотропной среде. Упругие волны в кристаллах.
10	Физические основы теории относительности	Постулаты теории относительности. Преобразование Лоренца. Пространственно-и времени-подобные интервалы. Сложение скоростей. Четырёхмерная формулировка теории относительности. Четырёхмерный мир. Четырёхмерные векторы. Релятивисткая кинематика. Вектор энергии-импульса. Закон сохранения энергии-импульса. Функция Лагранжа в релятивистской механике. Связь между массой и энергией.

2 семестр

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
	Электродинамика	
1	Релятивистская механика.	Преобразования Лоренца. Действие, функция Лагранжа, импульс и энергия релятивистской частицы.

2	Заряд в электромагнитном поле	<p>Векторный и скалярный потенциалы, функция Лагранжа заряда в векторном - скалярном поле.</p> <p>Связь напряженности электрического поля и магнитной индукции с потенциалами, уравнение движения заряда в электромагнитном поле (сила Лоренца). Движение в постоянном однородном электрическом поле. Движение в постоянном однородном магнитном поле.</p> <p>Электростатическая линза. Магнитная линза. Ускорители заряженных частиц, циклотрон, синхротрон, бетатрон, микротрон.</p>
3	Преобразование Лоренца для поля	<p>Преобразования Лоренца для электромагнитного поля. Инварианты электромагнитного поля.</p>
4	Уравнения Максвелла	<p>Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной формах. Уравнение непрерывности и закон сохранения заряда. Локальность законов сохранения. Плотность и поток энергии электромагнитного поля.</p>
5	Постоянное электромагнитное поле	<p>Уравнения Пуассона и Лапласа. Электростатическая энергия зарядов. Электромагнитная масса и классический радиус электрона. Дипольный момент и поле электрического диполя. Постоянное магнитное поле. Закон Био и Савара. Магнитный момент.</p>
6	Динамическое электромагнитное поле	<p>Уравнения для электромагнитных волн. Плоские волны. Эффект Доплера. Сферические волны. Запаздывающие потенциалы. Дипольное излучение электромагнитных волн.</p>
7	Электродинамика конденсированного состояния	<p>Электростатика проводников и диэлектриков, диэлектрическая поляризация, пьезоэлектрики, сегнетоэлектрики, магнитостатика конденсированных сред, намагниченность, диамагнетики,</p>

	парамагнетики, ферромагнетики. Уравнения Максвелла в веществе. Распространение электромагнитных волн в диэлектриках, дисперсия диэлектрической проницаемости. Скин-эффект в металлах.
--	--

3 семестр

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
	Квантовая механика	
1.	Введение в квантовую механику	<p>Ньютонова механика и классическая электромагнитная теория. Проблема излучения абсолютно черного тела. Проблема теплоемкости твердых тел. Фотоэлектрический эффект. Импульс фотона и комптоновское рассеяние. Волновая природа частиц. Атом водорода и теория Бора.</p> <p>Свойства математических операторов. Собственные функции и собственные числа операторов. Эрмитовы операторы. Ортогональность собственных функций и действительность собственных чисел эрмитова оператора. Нормировка собственных функций. Полнота набора собственных функций. Дираковские обозначения.</p> <p>Основные постулаты квантовой механики. Коммутатор операторов. Волновая функция. Среднее значение физической величины. Конкретный вид квантово-механических операторов. Перестановочные соотношения операторов координаты и импульса. Коммутирующие и некоммутирующие операторы. Физический смысл волновой функции. Собственные функции оператора энергии. Стационарное уравнение Шредингера. Соотношения</p>

		<p>неопределенностей. Частица в бесконечной потенциальной яме. Частица в конечной потенциальной яме. Прохождение частицы через конечный потенциальный барьер. Туннелирование частиц через барьер. Физические явления, связанные с туннелированием частиц. Альфа-распад ядер. Туннелирование электронов в твердых телах. Четность функций и оператор четности. Задача о гармоническом осцилляторе. Полиномы Эрмита. Собственные функции гармонического осциллятора. Операторы рождения и уничтожения. Операторы момента количества движения частицы. Собственные функции и собственные числа оператора z-компоненты момента количества движения. Собственные функции и собственные числа оператора момента количества движения. Нормировка собственных функций операторов момента количества движения. Коммутаторы операторов момента количества движения. Частица в сферически-симметричном потенциальном поле. Атом водорода. Собственные числа полной энергии электрона в атоме водорода Поправки конечность массы ядра. Энергия отдачи и доплеровское смещение.</p>
2.	Методы квантовой механики	<p>Основы алгебры матриц. Эрмитовы, эрмитово-сопряженные и унитарные матрицы. Представление операторов физических величин матрицами. Матрица преобразования. Преобразования матриц оператора физической величины. Матричный метод решения задачи о собственных функциях и собственных числах оператора физической величины. Матричные элементы операторов момента количества движения. Спин. Матрицы</p>

		<p>Паули. Полное уравнение Шредингера. Правомерность использования полного уравнения Шредингера. Вероятностная интерпретация временной волновой функции. Изменение во времени средних значений физических величин. Теорема Эренфеста. Стационарная теория возмущений. Поправки первого порядка. Поправки второго порядка. Временная теория возмущений. Гармоническое периодическое возмущение. Переходы между дискретными состояниями. Переходы в континуум состояний. Золотое правило Ферми. Матрица плотности. Среднее по ансамблю частиц. Уравнения Максвелла и волновое уравнение. Поток электромагнитной энергии. Квантование мод электромагнитного поля. Квантование стоячих волн. Операторы рождения и уничтожения для электромагнитного поля. Квантование бегущих волн. Излучение абсолютно черного тела. Распределение мод электромагнитного поля по частотам. Средняя тепловая энергия электромагнитной моды. Нулевая энергия электромагнитной моды. Спектральная плотность энергии излучения абсолютно черного тела. Индуцированные переходы. Полуклассическое приближение. Размытие уровней. Время жизни возбужденного атома относительно спонтанного перехода. Скорость спонтанных переходов. Равновесие квантовой системы с электромагнитным полем.</p>
3.	Квантовая статистика	<p>Линейные комбинации собственных функций. Гибридизация волновых функций и химическая связь в молекулах. Система из</p>

	<p>двух тождественных частиц. Оператор перестановки. Симметричные и антисимметричные волновые функции. Фермионы и бозоны. Система из многих тождественных частиц. Детерминант Слеттера. Принцип запрета Паули для фермионов. Энергия фермионной и бозонной систем. Атом гелия. Энергия состояний атома гелия. Экранировка заряда ядра. Энергия ионизации атома гелия. Синглетные и триплетные состояния. Статистические методы в квантовой механике. Микроскопически различные распределения частиц по состояниям. Одночастичные функции. Различные микроскопические распределения (РМР) системы. Макроскопическое состояние системы. Основная задача квантовой статистики. Три вида квантовых частиц. Идентичные различные частицы. Идентичные неразличимые частицы с полуцелым спином. Идентичные неразличимые частицы с целым спином. комбинаторика квантовых многочастичных систем. Статистики Максвелла-Больцмана, Ферми-Дирака, Бозе-Эйнштейна. Смеси частиц. Плотность состояний в трехмерной квантовой яме. Примеры статистических законов распределений частиц.</p>
--	--

4 семестр

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
	Статистическая физика	
1	Равновесная	Биномиальное распределение,

	статистическая физика	<p>распределение Пуассона. Распределение Гаусса, логнормальное распределение. Фазовое пространство, фазовые траектории. Среднее по времени и среднее по ансамблю значение энергии статистической системы, эргодическая теорема. Микроканонический, канонический и большой канонический ансамбли. Статистический вес. Каноническое распределение Гиббса. Статистическая сумма. Обоснование 2-го и 3-го начал термодинамики. Энтропия, связь с каноническим распределением, статистический смысл. Статистическое обоснование и вычисление термодинамических функций. Флуктуации энергии канонического ансамбля.</p>
2	Статистика частиц	<p>Распределение Больцмана. Распределение Бозе-Эйнштейна. Распределение Ферми-Дирака. Квантовая запутанность и квантовая телепортация. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы. Распределение Максвелла-Больцмана.</p>
3	Статистическая физика твердого тела	<p>Типы возбуждений в кристаллах, квазичастицы. Колебания кристаллической решётки. Фононы оптические и акустические. Теплоёмкость кристаллической решётки: теория Эйнштейна, закон Дюлонга и Пти. Теплоёмкость кристаллической решётки: теория Дебая. Связь характеристических частот и температур Эйнштейна и Дебая. Свободная энергия кристалла в гармоническом приближении. Уравнение Ми-Грюнайзена. Уравнение Грюнайзена. Энергия Ферми, теплоёмкость вырожденного электронного газа. Плазмоны.</p>

Контрольная работа 1 (механика)

Типовые задачи:

Вариант 1

1. Определить период одномерного движения частицы массы m с энергией E в потенциальном поле вида $U=U_0tg^2ax$.
2. Записать функцию Лагранжа математического маятника массы m и длины l , точка подвеса которого движется в вертикальной плоскости по закону $y=y(t)$, $x=x(t)$.

Вариант 2

1. Найти угол рассеяния и эффективное сечение рассеяния частицы с энергией E в поле $U=\alpha/r^2$ ($\alpha>0$).
2. Записать уравнение для малых колебаний математического маятника массы m и длины l , точка подвеса которого колеблется по вертикали по закону $x=acos\omega t$.

Контрольная работа 2 (механика)

Типовые задачи:

Найти главные системы координат, связанные с центром масс, и главные моменты инерции следующих сплошных однородных тел:

1. стержня в форме прямого параллелепипеда $axbxc$,
2. шара радиуса R ,
3. конуса высоты h с радиусом основания R ,
4. полого шара, внешний диаметр которого D , внутренний d ,
5. трехосного эллипсоида с полуосями a , b , c ,
6. тора, средний радиус которого R , а радиус поперечного сечения r ,
7. полого цилиндра длины l , внешний радиус которого D , внутренний d ,
8. правильной трехгранной призмы, высота которой l , сторона основания a ,
9. правильной шестигранной призмы, длина которой l , сторона основания a .

Контрольная работа 3 (механика)

Типовые вопросы:

1. Определить частоту радиальных колебаний сферической полости в неограниченной упругой среде.

2. Найти компоненты тензора деформаций в сферических и цилиндрических координатах.

3. Для продольной волны справедливо утверждение

- 1) возникновение волны связано с деформацией сдвига
- 2) частицы колеблются в направлении распространения волны
- 3) частицы колеблются в направлениях, перпендикулярных направлению распространения волны

Контрольная работа 4 (электродинамика - дифференциальные операции на векторном поле)

Типовые примеры:

<p>Вариант 1</p> $\text{grad} \frac{(\vec{a}\vec{r})}{r^3}$ $(\vec{r}\vec{\nabla})[\vec{a}\vec{r}]$ $\text{div}\vec{r}(\vec{r}\vec{a})$ $\text{rot}[[\vec{a}\vec{r}][\vec{b}\vec{r}]]$ <p>Вариант 2</p> $\text{grad}(\vec{a}\vec{r})(\vec{b}\vec{r})$ $(\vec{a}\vec{\nabla})(\vec{r}[\vec{a}\vec{r}])$ $\text{div}[\vec{a}[\vec{r}\vec{b}]]$ $\text{rot}\vec{r}(\vec{r}\vec{a})$ <p>Вариант 3</p> $\text{grad} \exp(\vec{a}\vec{r})$ $(\vec{a}\vec{\nabla})r[\vec{a}\vec{r}]$ $\text{div}[\vec{r}[\vec{a}\vec{r}]]$ $\text{rot} \frac{\vec{a}}{r}$	<p>Вариант 4</p> $\text{grad}([\vec{a}\vec{r}][\vec{b}\vec{r}])$ $(\vec{a}\vec{\nabla}) \frac{\vec{a}}{r}$ $\text{div}\vec{a}[\vec{a}\vec{r}]^2$ $\text{rot} \frac{\vec{r}}{r}$ <p>Вариант 5</p> $\text{grad}r^n(\vec{a}\vec{r}) \quad n -$ <p>любое число</p> $(\vec{a}\vec{\nabla})[\vec{b}\vec{r}](\vec{a}\vec{r})$ $\text{div}[[\vec{a}\vec{r}][\vec{b}\vec{r}]]$ $\text{rot}\vec{b}(\vec{r}\vec{a})$ <p>Вариант 6</p> $\text{grad}([\vec{a}\vec{r}]^2)$ $(\vec{a}\vec{\nabla})\vec{a}\vec{r}$ $\text{div}\vec{r} \exp(\vec{a}\vec{r})$ $\text{rot}[\vec{a}\vec{r}]$	<p>Вариант 7</p> $\text{grad}r(\vec{a}\vec{r})(\vec{b}\vec{r})$ $(\vec{a}\vec{\nabla})\vec{a}(\vec{a}\vec{r})^2$ $\text{div}\vec{b}(\vec{a}\vec{r}) \exp(\vec{a}\vec{r})$ $\text{rot}\vec{a}[\vec{a}\vec{r}]^2$ <p>Вариант 8</p> $\text{grad}(\vec{r}[\vec{a}\vec{r}])$ $(\vec{a}\vec{\nabla})(\vec{a}\vec{r})^2 \vec{r}$ $\text{div}\vec{a} \exp(\vec{b}[\vec{a}\vec{r}])$ $\text{rot}[\vec{a}[\vec{r}\vec{b}]]$ <p>Вариант 9</p> $\text{grad}(\vec{a}\vec{r})[\vec{a}\vec{r}]^2$ $(\vec{r}\vec{\nabla})[\vec{a}\vec{r}]^2 \vec{r}$ $\text{div}\vec{a}(\vec{a}\vec{r})^2$ $\text{rot}r^2 \vec{a}$
--	--	--

Контрольная работа 5 (электродинамика - интегральные теоремы)

Типовые примеры:

<p>Вариант 1</p> $\text{rotrot}[\vec{b}\vec{r}](\vec{a}\vec{r})$ <p>Преобразовать</p>	<p>Вариант 4</p> $\text{rotrot}\vec{r}(\vec{a}\vec{r})$ <p>Преобразовать</p>	<p>Вариант 7</p> $\text{rotrot}\vec{a}r^2$ <p>Преобразовать</p>
---	--	---

<p>контурный интеграл в поверхностный:</p> $\oint_L [\vec{a}\vec{r}] d\vec{l}$ <p>Вариант 2</p> $rotrot \frac{\vec{a}}{r}$ <p>Преобразовать контурный интеграл в поверхностный:</p> $\oint_L r[\vec{a}\vec{r}] d\vec{l}$ <p>Вариант 3</p> $rotrot[\vec{a}\vec{r}][\vec{a}\vec{r}]^2$ <p>Преобразовать контурный интеграл в поверхностный:</p> $\oint_L \vec{r}(\vec{a}\vec{r}) d\vec{l}$	<p>контурный интеграл в поверхностный:</p> $\oint_L [\vec{a}\vec{r}][\vec{b}\vec{r}] d\vec{l}$ <p>Вариант 5</p> $rotrot[\vec{r}[\vec{a}\vec{r}]]$ <p>Преобразовать контурный интеграл в поверхностный:</p> $\oint_L \vec{a}(\vec{a}\vec{r}) d\vec{l}$ <p>Вариант 6</p> $rotrot\vec{r}[\vec{a}\vec{r}]$ <p>Преобразовать контурный интеграл в поверхностный:</p> $\oint_L r\vec{a}d\vec{l}$	<p>контурный интеграл в поверхностный:</p> $\oint_L \vec{r}x d\vec{l}$ <p>Вариант 8</p> $\Delta\vec{a}(\vec{a}\vec{r})$ <p>Преобразовать контурный интеграл в поверхностный:</p> $\oint_L r^2 \vec{a} d\vec{l}$ <p>Вариант 9</p> $\Delta\vec{r}(\vec{r}\vec{a})$ <p>Преобразовать контурный интеграл в поверхностный:</p> $\oint_L \frac{\vec{r}}{r} d\vec{l}$
--	--	--

Контрольная работа 6 (электродинамика)

Типовые задачи:

1. Найти напряженность электрического поля вне и внутри равномерно заряженного шара радиуса R , из которого вырезан сферический объем радиуса R_1 (объемная плотность заряда равна ρ).
2. Найти емкость сферического конденсатора из металлических сфер с радиусами r_1, r_2 .
3. Найти индукцию магнитного поля от бесконечной плоскости, в которой течет электрический ток с поверхностной плотностью j .
4. Электродвижущую силу в плоском контуре площадью S , которая наводится одновременным магнитным полем, направленным перпендикулярно плоскости контура $\vec{B} = \vec{B}_0 \sin \omega t$.
5. Чему равна энергия внешнего магнитного поля однородно намагниченного (J) шара.
6. Вычислить собственную частоту колебаний электронов в материале, если его статическая диэлектрическая проницаемость равна 5 (плотность атомов $n=10^{23} \text{ см}^{-3}$).

7. Найти напряженность электрического поля на поверхности плоского пьезоэлектрика с поляризацией P .
8. Определите емкость, приходящуюся на единицу длины бесконечного цилиндрического конденсатора из двух проводящих коаксиальных цилиндров радиусами a и b , между которыми помещен диэлектрик с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ .
9. Как интенсивность электромагнитного излучения антенны связана с частотой тока в ней.
10. Найти скорость, при которой доплеровское смещение частоты излучаемых источником электромагнитных волн составляет 10% от исходной частоты.
11. Найти индукцию магнитного поля в центре кругового контура с радиусом R и током I .
12. Электродвижущую силу в плоском контуре площадью S , которая наводится одновременным магнитным полем, направленным перпендикулярно плоскости контура $\vec{B} = \vec{B}_0 \cos \omega t$.
13. Найти скорость, при которой доплеровское смещение частоты излучаемых источником электромагнитных волн составляет 50% от исходной частоты.

Коллоквиум 1 (квантовая механика)

типичные вопросы:

1. Частица в бесконечной потенциальной яме. Частица в конечной потенциальной яме.
2. Прохождение частицы через конечный потенциальный барьер. Туннелирование частиц через барьер. Физические явления, связанные с туннелированием частиц.
3. Задача о гармоническом осцилляторе. Полиномы Эрмита. Собственные функции гармонического осциллятора. Операторы рождения и уничтожения гармонического осциллятора.
4. Операторы момента количества движения частицы. Собственные функции и собственные числа оператора момента количества движения. Коммутаторы операторов момента количества движения.
5. Частица в сферически-симметричном потенциальном поле. Задача об атоме водорода.

6. Линейные комбинации собственных функций. Гибридизация волновых функций и химическая связь в молекулах. Система из двух тождественных частиц.

Коллоквиум 2 (квантовая механика)

типовые вопросы:

1. Гармоническое периодическое возмущение. Матрица плотности.
2. Уравнения Максвелла, волновое уравнение, плотность электромагнитной энергии. Квантование мод электромагнитного поля.
3. Операторы рождения и уничтожения электромагнитного поля. Квантование бегущих волн.
4. Излучение абсолютно черного тела. Индуцированные переходы. Спонтанные переходы.
5. Коэффициенты Эйнштейна. Скорость спонтанных переходов.
6. Микроскопически различимые распределения частиц по состояниям. Три вида квантовых частиц. Комбинаторика квантовых многочастичных систем.

Контрольная работа 7 (статистическая физика)

Вариант 1

1. Найти значения $\langle x \rangle$, $\langle x^2 \rangle$ и дисперсию x при равномерном распределении величины x в интервале от a до b .
2. Система состоит из N независимых частиц, которые могут находиться в состояниях с энергиями $E_1=0$ и $E_2=\varepsilon$. Найти термодинамические функции системы: свободную энергию F , энтропию S , Определить их значение при $T \rightarrow 0$ и $T \rightarrow \infty$.

Вариант 2

1. Найти момент 4-го порядка $\langle x^4 \rangle$ для гауссовского распределения вероятности.
2. Система состоит из N независимых частиц, которые могут находиться в состояниях с энергиями $E_1=0$ и $E_2=\varepsilon$. Найти термодинамические функции системы: свободную энергию F , внутреннюю энергию U . Определить их значение при $T \rightarrow 0$ и $T \rightarrow \infty$.

Вариант 3

1. Рассчитать энтропию гауссовского распределения.
2. Система состоит из N независимых частиц, которые могут находиться в состояниях с энергиями $E_1=0$ и $E_2=\varepsilon$. Найти

термодинамические функции системы: свободную энергию F и теплоемкость C_v . Определить их значение при $T \rightarrow 0$ и $T \rightarrow \infty$.

Вариант 4

1. Построить фазовую траекторию для частицы в одномерном случае, движущейся между стенками и упруго отражающейся от них.

2. Система состоит из N независимых частиц, которые могут находиться в состояниях с энергиями $E_1=0, E_2=\varepsilon, E_3=\varepsilon, E_4=2\varepsilon$. Найти термодинамические функции системы: свободную энергию F , энтропию S . Определить их значение при $T \rightarrow 0$ и $T \rightarrow \infty$.

Вариант 5

1. Найти момент 5-го порядка $\langle x^5 \rangle$ для экспоненциального распределения вероятности $f \sim \exp(-ax)$.

2. Система состоит из N независимых частиц, которые могут находиться в состояниях с энергиями $E_1=0, E_2=\varepsilon, E_3=\varepsilon, E_4=2\varepsilon$. Найти термодинамические функции системы: свободную энергию F , внутреннюю энергию U . Определить их значение при $T \rightarrow 0$ и $T \rightarrow \infty$.

Вариант 6

1. В сферических координатах распределение Максвелла – распределение для модуля скорости от 0 до ∞ :

$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right)$, так что число частиц со скоростями в интервале $(v, v+dv)$ есть:

$$dn(v) = N 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) dv.$$

Найти среднюю скорость частиц $\langle v \rangle$.

2. Система состоит из N независимых частиц, которые могут находиться в состояниях с энергиями $E_1=0, E_2=\varepsilon, E_3=\varepsilon, E_4=2\varepsilon$. Найти термодинамические функции системы: свободную энергию F и теплоемкость C_v . Определить их значение при $T \rightarrow 0$ и $T \rightarrow \infty$.

Вариант 7

1. В сферических координатах распределение Максвелла – распределение для модуля скорости от 0 до ∞ :

$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right)$, так что число частиц со скоростями в интервале $(v, v+dv)$ есть:

$$dn(v) = N 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) dv.$$

Найти наивероятнейшую скорость частиц.

2. Система состоит из N независимых частиц, которые могут находиться в состояниях с энергиями $E_1=0$, $E_2=\varepsilon$ и $E_3=\varepsilon$. Найти термодинамические функции системы: свободную энергию F , энтропию S . Определить их значение при $T \rightarrow 0$ и $T \rightarrow \infty$.

Вариант 8

1. Принимая молекулярный вес воздуха равным 29, найти по барометрической формуле отношение числа молекул в 1 см^3 к полному числу частиц n_0 при 300 К на высотах 1, 10 и 80 км.

2. Система состоит из N независимых частиц, которые могут находиться в состояниях с энергиями $E_1=0$, $E_2=\varepsilon$ и $E_3=\varepsilon$. Найти термодинамические функции системы: свободную энергию F , внутреннюю энергию U . Определить их значение при $T \rightarrow 0$ и $T \rightarrow \infty$.

Контрольная работа 8 (статистическая физика)

типичные задачи:

1. Рассчитать энергию плазменных колебаний в W с плотностью $19,3 \text{ г/см}^3$ и атомной массой 183,85 а.е.м.

2. Рассчитать энергию плазменных колебаний в Pt с плотностью $21,45 \text{ г/см}^3$ и атомной массой 195,09 а.е.м.

3. Рассчитать константу Грюнайзена кристалла, если его модуль всестороннего сжатия $K=20 \text{ ГПа}$, коэффициент линейного расширения при 300К $\alpha=10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $C_v=100 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, $\rho=5 \text{ г/см}^3$.

4. Рассчитать теплоемкость кристалла, если его константа Грюнайзена равна 2, модуль всестороннего сжатия $K=25 \text{ ГПа}$, коэффициент линейного расширения $\alpha=10^{-6} \text{ К}^{-1}$, плотность $\rho=4 \text{ г/см}^3$.

5. Оценить коэффициент линейного расширения металла при 600 К, если модуль всестороннего сжатия $K=170 \text{ ГПа}$, теплоемкость $C=30 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$, константа Грюнайзена $\gamma=1,8$.

6. Рассчитать температуру Дебая, если скорость звука $c=4 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, плотность эл. ячеек 10^{22} см^{-3} .

7. Рассчитать частоту Дебая ОЦК кристалла, если скорость звука составляет $c=2 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, плотность 6 г/см^3 и атомная масса 51 а.е.м..

8. Рассчитать частоту Дебая ГЦК кристалла, если скорость звука составляет $c=7 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, плотность 19 г/см^3 и атомная масса 183 а.е.м.

9. Экспериментально определенная частота (волновое число $1/\lambda$) высокоэнергетических колебаний решетки кварца составляет 1200

см⁻¹. Считая эту частоту частотой Эйнштейна, оценить частоту Дебая.

10. Определить энергию Ферми (эВ) для *V* с плотностью 6,11 г/см³ и атомной массой 50,94 а.е.м.

11. Определить температуру Ферми для *W* с плотностью 19,3 г/см³ и атомной массой 183,85 а.е.м.

12. Определить скорость Ферми для *Mo* с плотностью 10,22 г/см³ и атомной массой 95,94 а.е.м.

13. Определить энергию Ферми (эВ) для *Cr* с плотностью 7,18 г/см³ и атомной массой 52,00 а.е.м.

14. Определить температуру Ферми для *Pt* с плотностью 21,45 г/см³ и атомной массой 195,09 а.е.м.

15. Рассчитать молярную электронную теплоемкость *C_s* при 2 К, если энергия Ферми составляет 1,58 эВ.

Вопросы к экзамену за 1 семестр (механика)

1. Общие принципы механики.
2. Роль и место теоретической физики в формировании научного мировоззрения молодых специалистов. Значение теоретического подхода для развития физики и физического материаловедения.
3. Задачи механики. Обобщенные координаты и импульсы. Принцип наименьшего действия. Функция Лагранжа. Уравнение Лагранжа. Принцип относительности Галилея.
4. Законы сохранения в механике.
5. Интегралы движения. Законы сохранения энергии, импульса и момента импульса. Центр инерции.
6. Интегрирование уравнения движения Лагранжа.
7. Механическое подобие. Одномерное движение. Определение вида зависимости потенциальной энергии от координат по периоду колебаний. Приведенная масса. Введение в движение в центральном поле.
8. Интегрирование уравнения движения Лагранжа (продолжение).
9. Движение в центральном поле. Кеплерова задача.
10. Столкновения частиц.
11. Распад частиц. Упругие столкновения частиц.
12. Столкновения частиц.
13. Рассеяние частиц. Формула Резерфорда. Рассеяние под малыми углами.

14. Малые колебания.
15. Свободные одномерные колебания. Вынужденные колебания. Колебания систем со многими степенями свободы.
16. Малые колебания.
17. Колебания систем со многими степенями свободы (продолжение). Колебания молекул. Затухающие колебания.
18. Малые колебания. Движение твердого тела.
19. Вынужденные колебания при наличии трения.
20. Движение твердого тела. Угловая скорость. Тензор инерции.
21. Движение твердого тела.
22. Тензор инерции (продолжение). Момент импульса твердого тела. Уравнения движения твердого тела.
23. Движение твердого тела.
24. Эйлеровы углы. Уравнения Эйлера. Движение в неинерциальной системе отсчета.
25. Движение твердого тела.
26. Уравнение движения Гамильтона. Скобки Пуассона. Действие как функция координат. Уравнение Гамильтона-Якоби. Канонические преобразования.
27. Основные уравнения теории упругости.
28. Тензор деформации. Тензор напряжений. Уравнение равновесия деформированного тела.
29. Основные уравнения теории упругости.
30. Термодинамика деформирования. Закон Гука. Однородные деформации. Уравнение равновесия изотропных тел.
31. Упругие волны.
32. Уравнение движения упругой среды. Упругие волны в изотропной среде. Упругие волны в кристаллах.
33. Релятивистская механика.
34. Физические основы теории относительности.
35. Постулаты теории относительности. Преобразование Лоренца. Пространственно- и времени- подобные интервалы. Сложение скоростей.

Вопросы к экзамену за 2 семестр (электродинамика)

1. Преобразования Лоренца.
2. Действие, функция Лагранжа, импульс и энергия релятивистской частицы.

3. Векторный и скалярный потенциалы, функция Лагранжа заряда в векторном - скалярном поле.
4. Связь напряженности электрического поля и магнитной индукции с потенциалами, уравнение движения заряда в электромагнитном поле (сила Лоренца).
5. Движение в постоянном однородном электрическом поле. Движение в постоянном однородном магнитном поле.
6. Электростатическая линза. Магнитная линза. Ускорители заряженных частиц, циклотрон, синхротрон, бетатрон, микротрон.
7. Преобразования Лоренца для электромагнитного поля.
8. Инварианты электромагнитного поля.
9. Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной формах.
10. Уравнение непрерывности и закон сохранения заряда. Локальность законов сохранения. Плотность и поток энергии электромагнитного поля.
11. Уравнения Пуассона и Лапласа. Электростатическая энергия зарядов.
12. Электромагнитная масса и классический радиус электрона.
13. Дипольный момент и поле электрического диполя.
14. Постоянное магнитное поле. Закон Био и Савара. Магнитный момент.
15. Уравнения для электромагнитных волн. Плоские волны. Эффект Доплера.
16. Сферические волны. Запаздывающие потенциалы.
17. Дипольное излучение электромагнитных волн.
18. Электростатика проводников и диэлектриков, диэлектрическая поляризация, пьезоэлектрики, сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики.
19. Магнитостатика конденсированных сред, намагниченность, диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики.
20. Уравнения Максвелла в веществе.
21. Распространение электромагнитных волн в диэлектриках, дисперсия диэлектрической проницаемости.
22. Скин-эффект в металлах.

Вопросы к экзамену за 3 семестр (квантовая механика)

1. Эрмитовы операторы. Свойства собственных функций и собственных чисел эрмитова оператора.
2. Дираковские обозначения.

3. Основные постулаты квантовой механики. Коммутатор операторов. Волновая функция. Среднее значение физической величины.
4. Квантово-механические операторы физических величин. Перестановочные соотношения операторов координаты и импульса. Стационарное уравнение Шредингера. Соотношения неопределенностей.
5. Частица в бесконечной потенциальной яме. Частица в конечной потенциальной яме.
6. Прохождение частицы через конечный потенциальный барьер. Туннелирование частиц через барьер. Физические явления, связанные с туннелированием частиц.
7. Задача о гармоническом осцилляторе. Полиномы Эрмита. Собственные функции гармонического осциллятора. Операторы рождения и уничтожения гармонического осциллятора.
8. Операторы момента количества движения частицы. Собственные функции и собственные числа оператора момента количества движения. Коммутаторы операторов момента количества движения.
9. Частица в сферически-симметричном потенциальном поле. Задача об атоме водорода.
10. Линейные комбинации собственных функций. Гибридизация волновых функций и химическая связь в молекулах. Система из двух тождественных частиц.
11. Задача об атоме гелия.
12. Матричный метод решения задачи о собственных функциях и собственных числах оператора физической величины.
13. Полное уравнение Шредингера. Вероятностная интерпретация временной волновой функции.
14. Изменение во времени средних значений физических величин. Теорема Эренфеста.
15. Стационарная теория возмущений. Временная теория возмущений.
16. Гармоническое периодическое возмущение. Матрица плотности.
17. Уравнения Максвелла, волновое уравнение, плотность электромагнитной энергии. Квантование мод электромагнитного поля.

18. Операторы рождения и уничтожения электромагнитного поля. Квантование бегущих волн.
19. Излучение абсолютно черного тела. Индуцированные переходы. Спонтанные переходы.
20. Коэффициенты Эйнштейна. Скорость спонтанных переходов.
21. Микроскопически различимые распределения частиц по состояниям. Три вида квантовых частиц. Комбинаторика квантовых многочастичных систем.
22. Распределение Максвелла-Больцмана. Распределение Бозе-Эйнштейна.

Вопросы к экзамену за 4 семестр (статистическая физика)

1. Биномиальное распределение.
2. Распределение Пуассона.
3. Распределение Гаусса.
4. Логнормальное распределение.
5. Фазовое пространство и фазовые траектории.
6. Эргодическая теорема.
7. Микроканонический, канонический и большой канонический ансамбли.
8. Статистический вес.
9. Каноническое распределение Гиббса.
10. Статистическая сумма канонического распределения.
11. Обоснование 2-го начала термодинамики.
12. Обоснование 3-го начала термодинамики
13. Энтропия, связь с каноническим распределением, статистический смысл.
14. Статистическое обоснование и вычисление термодинамических функций.
15. Флуктуации энергии канонического ансамбля.
16. Распределение Больцмана и Максвелла-Больцмана,
17. Распределение Бозе-Эйнштейна.
18. Распределение Ферми-Дирака.
19. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы.
20. Статистический интеграл и свободная энергия идеального одноатомного газа.

21. Средняя, среднеквадратичная скорость молекул идеального газа.
22. Типы возбуждений в кристаллах, квазичастицы.
23. Колебания кристаллической решётки. Фононы оптические и акустические.
24. Теплоёмкость кристаллической решётки: теория Эйнштейна,
25. Закон Дюлонга и Пти.
26. Теплоёмкость кристаллической решётки: теория Дебая.
27. Связь характеристических частот и температур Эйнштейна и Дебая.
28. Свободная энергия кристалла в гармоническом приближении.
29. Уравнение Ми-Грюнайзена.
30. Уравнение Грюнайзена.
31. Энергия Ферми, теплоемкость вырожденного электронного газа.
32. Плазмоны.

Литература

а) основная учебная литература:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. “Теоретическая физика т.1, “Механика” - М.: Наука, 1988 - 215 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. “Теоретическая физика” т.7, “Теория упругости”- М.: Наука, 1987 - 248 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. “Теоретическая физика” т.2, “Теория поля”- М.: Наука, 1987 - 248 с. [Электронный ресурс] : учебное пособие / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. - М.: Физматлит, 2006. - 504 с. - 5-9221-0056-4. Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82966>
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. “Теоретическая физика” т.3, “Квантовая механика”- М.: Наука, 1987 - 248 с.
5. Галицкий В.М., Карнаков В.М., Коган В.И. Задачи по квантовой механике. - М.: Наука, 1981 - 635 с.
6. Коткин Г.Л., Сербо В.Г. “Сборник задач по классической механике” - М.: Наука, 1969. - 239 с.
7. Гречко Л.Г., Сугачев В.И., Федорченко А.М. “Сборник задач по теоретической физике” - М.: ВШ., 1972 - 480 с.

8. Ландау Л.Д., Лившиц Е.В. Электродинамика сплошных сред. – М.: Физматлит, 2005.
9. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т.5, Т.6, Т.7. –М.: Мир, 1977.
10. А. Ярив. Введение в теорию и приложения квантовой механики - М.: Мир, 1984, 360 с.
11. Давыдов А.С. Квантовая механика. -М.: ФМ, 1963 - 748 с.
12. Флюгге З. Задачи по квантовой механике, т.т.1,2. - М.: Мир, 1974.
13. Степанов В.А. Статистическая физика твердого тела. Элементарные возбуждения. (конспект лекций) Учебное пособие. Обнинск: Полипринт, 2012. - 38 с.
14. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. - Статистическая физика, часть 1, т.5, 567 с.
15. Сивухин Д.В. Термодинамика и молекулярная физика. Общий курс физики. Т.2. М.: Издательство МФТИ, 2003.
16. Фейнман Р. Статистическая механика М. Мир. 1975

б) дополнительная учебная литература:

1. Савельев И.В, Основы теоретической физики. т.1 - М.: Наука, 1991 - 493 с.
2. Батыгин В.В., Топтыгин И.Н., Бредов М.М. Сборник задач по электродинамике: Для ВУЗов. –М.: Наука. 2000, 503 с.
3. Левич В.Г. Курс теоретической физики. Т. 1. М., 1969.
4. Толмачев В.В., Головин А.М., Потапов В.С. Термодинамика и электродинамика сплошной среды. – М.: Изд-во МГУ. 1988, 232 с.
5. Абрамов А.А. Введение в тензорный анализ и риманову геометрию. –М.: Физматлит. 2004, 112 с.
6. Галицкий В.М., Карнаков В.М., Коган В.И. Задачи по квантовой механике. - М.: Наука, 1981 - 635 с.
7. Степанов В.А. Статистическая физика твердого тела. Фазовые переходы (конспект лекций). Учебное пособие. Обнинск: Полипринт, 2012, , 2012. - 44 с.
8. Левич В.Г. Курс теоретической физики. Т. 1. М., 1969.

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»), необходимых для освоения дисциплины:

1. Фейнмановские лекции по физике: Том 7. Физика сплошных сред [электронный ресурс] – http://www.all-fizika.com/article/index.php?id_article=1484
2. Введение в теорию относительности [электронный ресурс] –
3. http://www.all-fizika.com/article/index.php?id_article=2179
4. Электронная библиотека «Наука и техника» - <http://n-t.ru/>
5. Фейнмановские лекции по физике: Том 6. Электродинамика [электронный ресурс] - http://www.all-fizika.com/article/index.php?id_article=877
6. Фейнмановские лекции по физике: Том 7. Физика сплошных сред [электронный ресурс] – http://www.all-fizika.com/article/index.php?id_article=1484
7. Фейнмановские лекции по физике: Том 4. Кинетика. Теплота. Звук. [электронный ресурс] - http://www.all-fizika.com/article/index.php?id_article=185
8. Статистическая механика: курс лекций [электронный ресурс] – <http://padaread.com/?book=14986>

УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Цель изучения дисциплины:

обучение основным математическим методам линейной неравновесной термодинамики применительно к материаловедческим задачам, включая аналитические и численные методы решений уравнений в частных производных и обыкновенных дифференциальных уравнений с применением специальных функций.

Содержание дисциплины, структурированное по разделам (темам)

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
---	---------------------------------------	------------

1	Общие понятия об уравнениях переноса.	Явление переноса. Общее уравнение переноса. Виды процессов переноса (диффузия, теплопроводность, электропроводность).
2	Уравнения теплопроводности и диффузии.	Уравнение Фика, уравнение Фурье, геометрический фактор в различных кристаллических решетках и жидкостях, подвижность (соотношение Эйнштейна), зависимость коэффициента диффузии от температуры, энергетический барьер диффузии. Уравнение Аррениуса.
3	Аналитические методы решений.	Методы решений однородных и неоднородных дифференциальных уравнений. Преобразования Лапласа. Решение одномерного уравнения диффузии и теплопроводности с помощью преобразований Лапласа. Решение дифференциальных уравнений с помощью преобразований Лапласа.
5	Уравнение электропереноса.	Вывод уравнения электропереноса. Влияние температуры на механизмы электропереноса.
6	Элементы неравновесной термодинамики.	Неравновесная термодинамика, коэффициенты Онзагера.
7	Общие сведения о системе Mathcad.	Общие сведения о работе и методах вычислений в системе Mathcad.
8	Решение задач математической физики в системе Mathcad.	Решение уравнений диффузии и теплопроводности, однородных и неоднородных дифференциальных уравнений в пакете Mathcad.

Контрольная работа 1 Процессы переноса в твердых телах

1. Во сколько раз различаются частоты перескоков атомов в алюминии и платине при 500 °С?
2. Найти диффузионный путь атома в γ -железе при температуре около плавления.

3. Определить частоту колебания атома водорода, при которой происходит диффузия в кристаллической решетке гамма-железа. Высоту энергетического барьера принять равной 1 эВ.
4. Электроны в медном проводнике движутся с дрейфовой скоростью $2 \cdot 10^{-6}$ м/с. Определить подвижность электронов в электрическом поле напряженностью 1 В/мм.
5. По тонкой кремниевой пластинке шириной $l = 3,2$ мм и толщиной $d = 250$ мкм течет ток $I = 5,2$ мА. Кремний содержит примеси фосфора и является полупроводником n-типа. Число электронов в единице объема во много раз превышает концентрацию носителей заряда в чистом кремнии. Для данного образца концентрация электронов составляет $n_e = 1,5 \cdot 10^{23}$ м⁻³. Определите среднюю дрейфовую скорость электронов.
6. Медная (ГЦК) проволока находится при температуре 600 °С. Определить коэффициент диффузии электронов при этой температуре. Значение подвижности принять равным $1,6 \cdot 10^{-6}$ с/кг.

Контрольная работа 2 Методы решения уравнений диффузии и теплопроводности

<p>Вариант 1 Решить уравнение $x' + x = \exp(-2t)$, $x(0) = 1$. Решить уравнение $x''' + 2x' = t \sin(t)$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 0$.</p>	<p>Вариант 4 Решить уравнение $x'' - 2x' = -2$, $x(0) = 1$, $x'(0) = 3$. Решить уравнение $x'' + 2x' + 2x = t \exp(-t)$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 0$.</p>
<p>Вариант 2 Решить уравнение $x'' + 2x' - 3x = \exp(-t)$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 1$. Решить уравнение $x'' - 9x = 12t \exp(-3t)$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 2/3$.</p>	<p>Вариант 5 Решить уравнение $x'' + x = 1$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 1$. Решить уравнение $x'' - 3x' - 4x = 4t - 5$, $x(0) = -1$, $x'(0) = 2$.</p>
<p>Вариант 3 Решить уравнение $x' + 4x = \cos(2t)$, $x(0) = 1$, $x'(0) = -1$ Решить уравнение $x'' + 4x = (8t + 4) \exp(2t)$, $x(0) = 4$, $x'(0) = -1$</p>	<p>Вариант 6 Решить уравнение $x'' + 2x' + x = 12t \exp(-t)$, $x(0) = -3$, $x'(0) = 7$. Решить уравнение $x'' + x' - 2x = -5 \cos t + 5 \sin t$, $x(0) = 6$, $x'(0) = 0$.</p>

Контрольная работа 3 - Неравновесная термодинамика, уравнение электропереноса

<p>Вариант 1 Определить подвижность ионов в 0,1М растворе AgNO_3. Необходимые данные найти в справочнике.</p> <p>Вариант 2 Эквивалентная электропроводность при бесконечном разбавлении для KClO_4 при 291 К равна 0,01228 $\text{См}\cdot\text{м}^2\cdot\text{экв}^{-1}$. Число переноса иона ClO_4^- равно 0,481. Определите подвижности ионов K^+ и ClO_4^- и абсолютные скорости их движения.</p> <p>Вариант 3 Для 0,01 раствора KBr удельное сопротивление равно 709,22 $\text{Ом}\cdot\text{см}$. Определите подвижности ионов, если число переноса K^+ равно 0,483</p>	<p>Вариант 4 Для бесконечно разбавленного раствора LaCl_3 при 298 К число переноса катиона составляет 0,477. Вычислите электрическую подвижность ионов абсолютную скорость их движения.</p> <p>Вариант 5 Эквивалентная электрическая проводимость раствора CaCl_2 при 298 К и бесконечном разведении равна $135,85\cdot 10^{-4}$ $\text{См}\cdot\text{м}^2\cdot\text{экв}^{-1}$, число переноса Ca^{2+} составляет 0,438. Определите электрические подвижности ионов Ca^{2+} и Cl^-, абсолютные скорости их движения.</p>
---	---

Контрольная работа 4 - Решение задач математической физики в пакете Mathcad

С помощью пакета MATHCAD:

1. Решить уравнение $x' + x = \exp(-2t)$, $x(0)=1$
2. Решить уравнение $x''' + 2x' = t \sin(t)$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 0$
3. Решить уравнение $x'' + 2x' - 3x = \exp(-t)$, $x(0) = 0$, $x'(0)=1$
4. Решить уравнение $x''-9x=12t\exp(-3t)$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 2/3$
5. Решить уравнение $x'+4x = \cos(2t)$, $x(0) = 1$, $x'(0) = -1$
6. Решить уравнение $x''+4x=(8t+4)\exp(2t)$, $x(0)=4$, $x'(0)=-1$
7. Решить уравнение $x''-2x'=-2$, $x(0) = 1$, $x'(0) = 3$
8. Решить уравнение $x''+2x'+2x=t \exp(-t)$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 0$
9. Решить уравнение $x'' + x = 1$, $x(0) = 0$, $x'(0) = 1$
10. Решить уравнение $x''-3x'-4x=4t-5$, $x(0) = -1$, $x'(0) = 2$
11. Решить уравнение $x''+ 2x'+x=12t\exp(-t)$, $x(0)=-3$, $x'(0)=7$

12. Решить уравнение $x'' + x' - 2x = -5\cos t + 5\sin t$, $x(0)=6$, $x'(0)=0$

Вопросы к зачету

1. Явления переноса в твердых телах.
2. Общее уравнение переноса.
3. Первый Закон Фика.
4. Температурная зависимость коэффициента диффузии.
5. Соотношения Эйнштейна.
6. Энергетический барьер диффузии.
7. Геометрический фактор в различных кристаллических решетках и жидкостях.
8. Уравнение Аррениуса. Аррениусовская кинетика.
9. Дифференциальное уравнение диффузии (второй закон Фика).
10. Методы решений однородных и неоднородных дифференциальных уравнений.
11. Преобразование Лапласа.
12. Распределения случайных величин и их преобразования по Лапласу.
13. Решение одномерного уравнения диффузии.
14. Решение дифференциальных уравнений с помощью преобразований Лапласа.
15. Уравнение электропереноса.
16. Влияние температуры на механизмы электропереноса.
17. Неравновесная термодинамика, теплопроводность и диффузия.
18. Уравнения Онзагера, коэффициенты Онзагера.
19. Методы вычислений в системе Mathcad.
20. Решение уравнений диффузии и теплопроводности в системе Mathcad.
21. Решение однородных и неоднородных дифференциальных уравнений в системе Mathcad.
22. Алгоритм метода решения дифференциальных уравнений с помощью преобразования Лапласа в Mathcad.

Литература

а) основная учебная литература:

1. Филиппов Л.П. Явление переноса. М.: Издательство МГУ. 1986.
- 120 с. [Электронный ресурс] /

- <http://www.twirpx.com/file/95880/>, Режим доступа: свободный (Дата обращения: 25.04.2015 г.)
2. Г.Н. Елманов, А.Г. Залужный, В.И. Скрытный, Е.А. Смирнов, Ю.А. Перлович, В.Н. Яльцев. Том 1. Физика твердого тела – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 764 с.
 3. Х. Мерер. Диффузия в твердых телах. Монография. Пер. с англ.: Научное издание / Х. Мерер – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011. – 536 с.
 4. Бокштейн Б. С. Атомы блуждают по кристаллу. — М.: Наука, 1984. — 208 с. [Электронный ресурс] / <http://www.twirpx.com/file/452942/>, Режим доступа: свободный (Дата обращения: 25.04.2015 г.)
 5. Ю. Ю. Тарасевич Численные методы на Mathcad'e. – Астраханский гос. пед. ун-т: Астрахань, 2000. 70 с. [Электронный ресурс] / <http://www.twirpx.com/file/1044520/>, Режим доступа: свободный (Дата обращения: 25.04.2015 г.)

б) дополнительная учебная литература:

1. Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. Явление переноса. М.: «Химия», 1974. 688 с. [Электронный ресурс] / <http://www.twirpx.com/file/397784/>, Режим доступа: свободный (Дата обращения: 25.04.2015 г.)
2. Ансельм А.И. Основы статистической физики и термодинамики. М.: Наука, 1973. - 424 с. [Электронный ресурс] <http://www.twirpx.com/file/132558/>, Режим доступа: свободный (Дата обращения: 25.04.2015 г.)
3. Дьярмати И. Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы. — М.: Мир, 1974. 404 с. [Электронный ресурс] <http://www.twirpx.com/file/249184/>, Режим доступа: свободный (Дата обращения: 25.04.2015 г.)

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

1. Образовательный математический сайт: Mathcad [электронный ресурс] - <http://www.exponenta.ru/soft/Mathcad/Mathcad.asp>
2. Решение нелинейных уравнений и систем уравнений в пакете MathCAD [электронный ресурс] – <http://pers.narod.ru/study/mathcad/07.html>
3. Решение физических задач с помощью пакета Mathcad [электронный ресурс] – <http://maier-gv.glazov.net/math/math1.htm>

ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ

Цель изучения дисциплины:

освоение закономерностей атомно-кристаллического строения материалов, формирования и эволюции микроструктуры металлов и сплавов при фазовых превращениях.

Содержание дисциплины, структурированное по разделам (темам)

1 семестр

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
Фазовые переходы и диаграммы равновесия		
	Введение.	Задачи материаловедения, цели. Золотое сечение, булатная сталь, квантовые ямы, фотонные кристаллы, де-бройлевская длина волны электрона (Cu, Si) – наноструктуры
1	Связь и структура кристаллов.	Периодическая система, электронное строение. Ионная, ковалентная, металлическая связи в материалах – свойства: электрические, магнитные, прочностные, теплопроводящие. Структура материалов с ионной, ковалентной и металлической связями. Координационное число, ионный радиус, энергия образования решетки, энергия Маделунга. Элементы симметрии, операции симметрии, точечные и пространственные группы. Типы сингоний. Обозначения кристаллографических осей и плоскостей. Группа трансляций. Примитивная ячейка. Решетки Бравэ. Кристаллические классы. Обозначения точечных групп. Элементарная ячейка Вигнера-Зейтца,

		кристаллографическая элементарная ячейка. Примеры для ОЦК и ГЦК.
2	Кристаллизация, диаграммы равновесия и микроструктура сплавов.	Структура жидкости Радиальная функция распределения. Типы жидкостей. Частота переходов. Кристаллизация, линейная скорость роста, переохлаждение, критический радиус, скорость образования зародышей, гомогенное и гетерогенное зарождение, закон Вульфа-Кюри, дендрит Чернова. Правило фаз Гиббса. Диаграмма однокомпонентной системы. Графический метод термодинамики. Двухкомпонентная система, правило рычага, отсутствие растворимости, ограниченная растворимость, полная растворимость. Полная растворимость в твердом и жидком состояниях. Ликвация, гомогенизация, зонная плавка. Диаграмма и микроструктура сплавов при эвтектическом превращении, отсутствие растворимости и при наличии частичной растворимости в твердой фазе. Диаграмма и микроструктура сплавов при перитектическом превращении. Диаграмма и микроструктура сплавов при наличии химического соединения или промежуточной фазы, конгруэнтное и неконгруэнтное плавление. Диаграмма и микроструктура сплавов при ограниченной сплавляемости в жидком виде, синтектическое превращение. Предельные случаи безвариантных равновесий. Типы диаграмм в зависимости от свойств компонентов, изоморфные системы, формы кривых ликвидус и солидус. Линии ограниченной растворимости, уравнение Шредера-Вант-Гоффа, дисперсионное твердение.
3	Фазы и фазовые переходы в двух-компонентных системах.	Фазовые переходы 1-го и 2-го рода, классификация Эренфеста, параметр порядка, дальний и ближний порядок. Параметр порядка при фазовых переходах структурных, порядок-беспорядок, магнитных. Типы твердых растворов, замещения, внедрения,

		<p>вычитания. Точка Курнакова, антифазные области (границы). Промежуточные фазы, электронные соединения, сигма-фазы, фазы внедрения, химические соединения, фазы Лавеса. Мартенситное превращение. Предельные случаи зародышеобразования. Эффект памяти формы. Диаграммы при аллотропическом превращении, полиморфизм. Эвтектоидные и перитектоидные превращения на диаграммах. Упорядочение твердых растворов на диаграммах, первого и второго рода. Магнитные переходы. Макроскопические свойства сплавов с различным типом диаграмм (твердость, электросопротивление).</p>
4	Пластическая деформация.	<p>Механические свойства материалов, пластичные и хрупкие материалы. Диаграммы растяжения/сжатия пластичных и хрупких материалов. Механизмы упрочнения. Деформация поликристалла, микроструктура и текстура, сверхпластичность. Возврат, полигонизация, рекристаллизация (обработки, собирательная, вторичная).</p>

2 семестр

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
	Фазовые равновесия в сплавах	
1	Железо и фазы системы железо-углерод	<p>Структура и фазовые переходы в чистом железе. Фазы системы железо-углерод, структура графита и цементита, растворы внедрения - феррит и аустенит. Диаграмма равновесия железо-углерод, стабильная, метастабильная. Стали – малоуглеродистые, высокоуглеродистые. Чугуны, доэвтектические, заэвтектические. Серый и белый чугун. Микроструктура при охлаждении затвердевших сплавов железо-углерод. Техническое железо, третичный</p>

		<p>цементит. Доэвтектоидные стали, перлит, Видманштеттова структура. Заэвтектоидные стали. Превращения в чугунах, типы чугунов. Термическая обработка стали, перлит, сорбит, тростит, бейнит, маргенсит.</p> <p>Кинетика распада аустенита, с-диаграммы, отжиг, нормализция, закалка. Отпуск стали, три стадии и изменение микроструктуры. Структура и свойства технического железа при старении. Закалочное старение. Деформационное старение, линии Чернова. ХТО, микроструктура при цементации и обезуглероживании. Термическая обработка чугуна, углерод отжига, графитизация, ковкий чугун, черносердечный чугун, белосердечный чугун.</p>
2	Диаграммы тройных систем.	<p>Концентрационный треугольник, правило рычага, правило центра тяжести. Тройная эвтектическая система, изотермические разрезы, вертикальные сечения. Наличие двойного стойкого химического соединения и отсутствие растворимости в твердом состоянии. Тройная система с неограниченной растворимостью в твердой фазе, изменение состава твердого раствора при затвердевании. Тройная система с ограниченной растворимостью в твердом состоянии.</p>
3	Легированные стали.	<p>Двойные растворы железа. Диаграммы с открытой, расширенной, ограниченной и замкнутой гамма-областью. Тройные растворы железа. Карбиды в стали. Перлитный аустенитный, ферритный, полуферритный и ледебуритный классы сталей. Марганцевая, хромистая, никелевая и кремнистая сталь. Сдвиг с-диаграмм. Коррозионностойкие, быстрорежущие, электротехнические, инструментальные, конструкционные, вторичнотвердеющие стали.</p>
4	Цветные металлы.	<p>Медь и ее сплавы. Латуни и бронзы.</p>

	<p>Алюминий и его сплавы. Старение алюминиевых сплавов, зоны Гинье-Престона. Магний и его сплавы. Литейные и деформируемые сплавы магния. Титан и его сплавы. Никель и его сплавы. К-состояние. Инвар и элинвар. Цинк и его сплавы. Деформируемые и литейные сплавы. Олово, свинец и их сплавы. Легкоплавкие сплавы и припой. Подшипниковые сплавы, баббиты. Тугоплавкие и благородные металлы.</p>
--	---

Домашнее задание – варианты:

Вариант 1

1. Определить индексы плоскости, отсекающей на осях отрезки $1/3$, 1 , $1/3$.
2. Определить параметр элементарной ячейки и энергию Ферми (эВ) для V (ОЦК) с плотностью $6,11 \text{ г/см}^3$ и атомной массой $50,94 \text{ а.е.м.}$

Вариант 2

1. Определить индексы плоскости, отсекающей на осях отрезки $1/2$, 1 , $1/3$.
2. Определить параметр элементарной ячейки и температуру Ферми для W (ОЦК) с плотностью $19,3 \text{ г/см}^3$ и атомной массой $183,85 \text{ а.е.м.}$

Вариант 3

1. Определить индексы плоскости, отсекающей на осях отрезки ∞ , 1 , $1/3$.
2. Определить параметр элементарной ячейки и скорость Ферми для Mo (ОЦК) с плотностью $10,22 \text{ г/см}^3$ и атомной массой $95,94 \text{ а.е.м.}$

Вариант 4

1. Определить индексы плоскости, отсекающей на осях отрезки $1/3$, 1 , $-1/2$.
2. Определить параметр элементарной ячейки и энергию Ферми (эВ) для Cr (ОЦК) с плотностью $7,18 \text{ г/см}^3$ и атомной массой $52,00 \text{ а.е.м.}$

Вариант 5

1. Определить индексы плоскости, отсекающей на осях отрезки $-1/3$, 1 , $-1/2$.

2. Определить параметр элементарной ячейки и температуру Ферми для Pt (ГЦК) с плотностью $21,45 \text{ г/см}^3$ и атомной массой $195,09 \text{ а.е.м.}$

Вариант 6

1. Написать координаты центров октаэдрических пор в ОЦК решетке.

2. Определить параметр элементарной ячейки и энергию Ферми (эВ) для Al (ГЦК) с плотностью $2,7 \text{ г/см}^3$ и атомной массой $26,98 \text{ а.е.м.}$

Вариант 7

1. Рассчитать скорость скольжения дислокаций при скорости деформации $0,01 \text{ 1/с.}$

2. Определить параметр элементарной ячейки и скорость Ферми для Au (ГЦК) с плотностью $19,3 \text{ г/см}^3$ и атомной массой $196,97 \text{ а.е.м.}$

Вариант 8

1. Изобразить элементарную ячейку соединения АВ, если базис структуры А: $000, \frac{1}{2} \frac{1}{2} 0, \frac{1}{2} 0\frac{1}{2}, 0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}$; В: $0 \frac{1}{2} 0, 0 0 \frac{1}{2}, \frac{1}{2} 0 0, \frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$.

2. Считая, что концентрация вакансий при температуре плавления равна 10^{-4} , выразить температуру плавления через G и b . Учесть, что модуль сдвига при температуре плавления уменьшается вдвое по сравнению с комнатной температурой.

Вариант 9

1. Определить энергию образования вакансий, если их концентрация при $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ равна $5 \cdot 10^{-5}$.

2. Выразить скорость звука через модуль сдвига в твердых телах.

Вариант 10

1. Определить кристаллографические направления вдоль кратчайших межатомных расстояний в плоскости (110) ОЦК.

2. Определить модуль сдвига материала, если известно, что при изменении температуры от 500 К до 1000 К концентрация вакансий меняется от 10^{-5} до 10^{-4} (вектор Бюргерса принять $0,15 \text{ нм.}$)

Вариант 11

1. Рассчитать число атомов во второй координационной сфере для ГЦК.

2. Рассчитать плотность энергии, связанную с границами в нанокристаллическом материале, полагая $d=10 \text{ нм, } G=5 \cdot 10^{11} \text{ Па, } b=0,14 \text{ нм.}$

Вариант 12

1. Определить энергию образования вакансий, если их концентрация при $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ равна $5 \cdot 10^{-6}$.
2. Найти отношение объемов примитивной и элементарной ячеек решетки ГЦК.

Вариант 13

1. Определить энергию образования вакансий, если их концентрация при $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ равна $2 \cdot 10^{-5}$.
2. Найти отношение объемов примитивной и элементарной ячеек решетки ОЦК.

Вариант 14

1. Оценить равновесную концентрацию вакансий в серебре в точке при 500°C . Известно, что $G=2,8 \cdot 10^{10}$ Па, ГЦК и $a=4,078$ А.
2. Рассчитать максимальный радиус атома внедренного в окта-пору ГЦК решетки с параметром ячейки a .

Вариант 15

1. Определить кристаллографические направления вдоль кратчайших межатомных расстояний в плоскости (111) ГЦК.
2. Рассчитать плотность энергии пластической деформации твердого тела, если при деформации плотность дислокаций оказалась 10^{11} см⁻². Считать $G=3 \cdot 10^{10}$ Па, $b=0,16$ нм.

Контрольная работа 1 - типовые задания (вопросы):

1. Координационное число, ионный радиус, энергия образования кристаллической решетки, энергия Маделунга.
2. Структура кристаллов - типы сингоний. Обозначения кристаллографических осей и плоскостей.
3. Решетки Бравэ.
4. Обратная решетка. Зона Бриллюэна.
5. Модули Юнга, сдвига, всестороннего сжатия. Коэффициент Пуассона.
6. Вакансии, энергия, конфигурационная энтропия, равновесная концентрация.
7. Типы дислокаций, ось дислокации, контур Бюргерса, плоскость скольжения.
8. Консервативное и неконсервативное движение дислокаций, системы скольжения. Источник Франка-Рида.
9. Дефекты упаковки, энергия и конфигурационная энтропия.
10. Полиэдры Вороного, логнормальное распределение зерен по размерам.

11. Пластичные и хрупкие материалы. Диаграммы растяжения/сжатия пластичных и хрупких материалов.
12. Возврат, полигонизация, рекристаллизация (обработки, собирательная, вторичная).
13. Методы наблюдения дислокаций.
14. Методы исследований точечных дефектов структуры.

Задачи:

1. Чему равна длина волны электрона в микроскопе при ускоряющем напряжении 100 кВ?
2. Чему равна длина волны электрона в микроскопе при ускоряющем напряжении 200 кВ?
3. Чему равна длина волны электрона в микроскопе при ускоряющем напряжении 300 кВ?
4. Чему равна длина волны электрона в микроскопе при ускоряющем напряжении 400 кВ?
5. Чему равны углы дифракции рентгеновских лучей ($\lambda=0,15$ нм) от кристаллических плоскостей с межплоскостным расстоянием $d_{\text{HKL}}=0,2$ нм?
6. Чему равны углы дифракции рентгеновских лучей ($\lambda=0,17$ нм) от кристаллических плоскостей с межплоскостным расстоянием $d_{\text{HKL}}=0,21$ нм?
7. Чему равны углы дифракции рентгеновских лучей ($\lambda=0,16$ нм) от кристаллических плоскостей с межплоскостным расстоянием $d_{\text{HKL}}=0,25$ нм?
8. Чему равны углы дифракции рентгеновских лучей ($\lambda=0,15$ нм) от кристаллических плоскостей с межплоскостным расстоянием $d_{\text{HKL}}=0,13$ нм?
9. Чему равны углы дифракции рентгеновских лучей ($\lambda=0,17$ нм) от кристаллических плоскостей с межплоскостным расстоянием $d_{\text{HKL}}=0,28$ нм?
10. Чему равно межплоскостное расстояние d_{HKL} в кристалле, если угол дифракции 1-го порядка рентгеновских лучей ($\lambda=0,17$ нм) равен 55° ?
11. Чему равно межплоскостное расстояние d_{HKL} в кристалле, если угол дифракции 1-го порядка рентгеновских лучей ($\lambda=0,17$ нм) равен 45° ?
12. Чему равно межплоскостное расстояние d_{HKL} в кристалле, если угол дифракции 2-го порядка рентгеновских лучей ($\lambda=0,17$ нм) равен 65° ?

13. Чему равно межплоскостное расстояние d_{HKL} в кристалле, если угол дифракции 2-го порядка рентгеновских лучей ($\lambda=0,15$ нм) равен 70° ?

14. Чему равно межплоскостное расстояние d_{HKL} в кристалле, если угол дифракции 1-го порядка рентгеновских лучей ($\lambda=0,13$ нм) равен 27° ?

Задачи повышенной трудности:

1. Энергия активации диффузии вакансии $W=1$ эВ. Сколько времени необходимо проводить отжиг облученного поликристаллического сплава с размером зерна 100 мкм при $T=600^\circ\text{C}$, в результате которого неравновесные вакансии исчезнут на границах зерен? Для вычисления коэффициента диффузии считать $b=0,2$ нм, $\nu_0=10^{13}$ Гц.

2. Резонансное поглощение (пик Снука) в ОЦК железе (параметр элементарной ячейки $a=0,287$ нм), связанное с диффузией углерода, соответствует частоте $\nu=1$ Гц. Рассчитать коэффициент диффузии D в Fe.

3. Найти энергию активации диффузии, если пик резонансного поглощения (пик Снука) при 600 К соответствует 1 Гц, а при 1200 К - 10^5 Гц.

4. Из поликристаллического вольфрама с размером зерна $d=10$ мкм изготовлена игла для автоионной микроскопии. Какова вероятность увидеть границу зерна, если наблюдаемая площадка в поперечнике составляет $d_0=100$ нм?

5. Из поликристаллического вольфрама с концентрацией вакансий $C_v=10^{-6}$ изготовлена игла для автоионной микроскопии. Какова вероятность увидеть вакансию, если наблюдаемая площадка в поперечнике составляет $d_0=100$ нм?

6. Какую плотность дислокаций создает сток избыточных вакансий $\Delta C_v=10^{-4}$ в призматические петли радиусом $r=0,1$ мкм? Считать $b=0,2$ нм.

7. Энергия дефекта упаковки в Au $3,3 \cdot 10^{-6}$ Дж/см². Найти равновесную ширину расщепления винтовой дислокации. Считать $G=28$ ГПа, период ГЦК решетки $a=0,407$ нм.

8. Ширина равновесного расщепления краевой дислокации в ГЦК сплаве $r=20$ нм. Найти энергию дефекта упаковки, если $G=30$ ГПа, период решетки $a=0,4$ нм, а коэффициент Пуассона $\mu=1/3$.

9. Ширина равновесного расщепления краевой дислокации в ОЦК сплаве $r=30$ нм. Найти энергию дефекта упаковки, если $G=10$ ГПа, период решетки $a=0,3$ нм, а коэффициент Пуассона $\mu=1/3$.

10. В ОЦК кристалле (параметр элементарной ячейки $a=0,3$ нм) с плотностью краевых дислокаций $\rho=10^9$ см⁻² имеется избыток вакансий $\Delta C_v=10^{-4}$. Каково среднее перемещение x дислокаций при стоке на них всех избыточных вакансий?
11. В ГЦК кристалле (параметр элементарной ячейки $a=0,4$ нм) с плотностью краевых дислокаций $\rho=10^8$ см⁻² имеется избыток вакансий $\Delta C_v=10^{-3}$. Каково среднее перемещение x дислокаций при стоке на них всех избыточных вакансий?
12. Найти энергию активации диффузии, если пик резонансного поглощения (пик Снука) при 500 К соответствует 3 Гц, а при 1000 К - 10^6 Гц.
13. Какую плотность дислокаций создает сток избыточных вакансий $\Delta C_v=10^{-4}$ в призматические петли радиусом $r=0,1$ мкм в ОЦК металле с параметром решетки $a=0,35$ нм?
14. Энергия активации диффузии вакансии $W=0,8$ эВ. Сколько времени необходимо проводить отжиг облученного поликристаллического сплава с размером зерна 10 мкм при $T=800^\circ\text{C}$, в результате которого неравновесные вакансии исчезнут на границах зерен? Для вычисления коэффициента диффузии считать $b=0,15$ нм, $\nu_0=5 \cdot 10^{12}$ Гц.

Контрольная работа 2 - типовые вопросы:

1. Радиальная функция распределения жидкости.
2. Дендрит Чернова.
3. Фазовые переходы 1-го и 2-го рода, классификация Эренфеста.
4. Параметр порядка в магнитных фазовых переходах.
5. Параметр порядка в сегнетоэлектрических фазовых переходах.
6. Параметр порядка в фазовых переходах типа порядок-беспорядок.
7. Феноменологическая теория Ландау фазовых переходов 2-го рода.
8. Кристаллизация - линейная скорость роста и скорость образования зародышей.
9. Критический радиус зародышей при фазовом переходе 1-го рода.
10. Восходящая диффузия при спинодальном распаде твердого раствора.

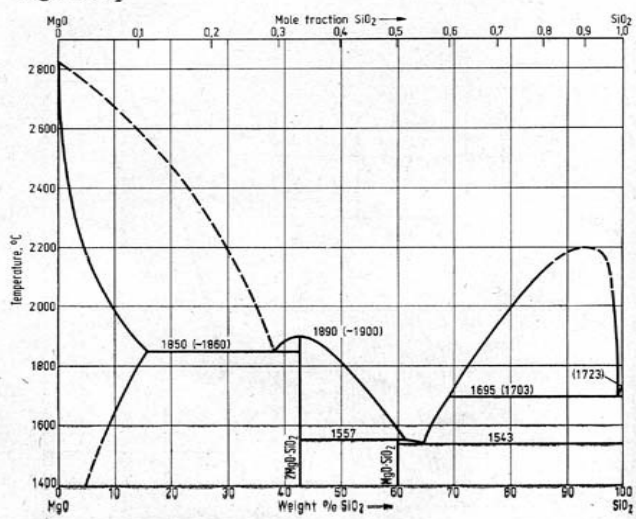
11. Термодинамическое условие возможности спинодального распада.
12. Диаграммы растяжения/сжатия пластичных и хрупких материалов.
13. Системы скольжения ГПУ, ГЦК, ОЦК структур.
14. Двойникование и полигонизация.
15. Деформация поликристалла, сверхпластичность.

Контрольная работа 3 - типовые вопросы и задания:

Вариант 1

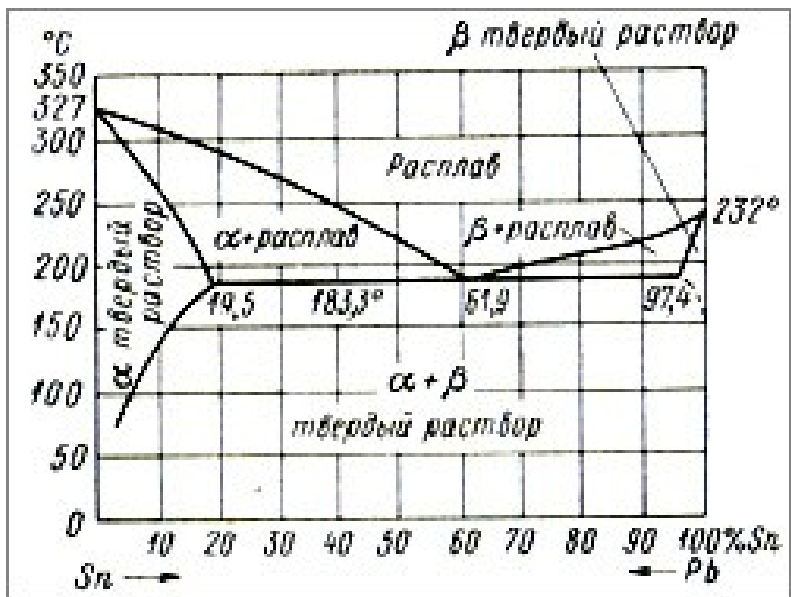
1. Координационное число, ионный радиус.
2. Описать последовательность фазообразования при кристаллизации сплава 20/80. Рассчитать структурные составляющие сплава.

MgO-SiO₂



Вариант 2

1. Кристаллические классы.
2. Описать последовательность фазообразования при кристаллизации сплава 80/20. Рассчитать структурные составляющие сплава.



Контрольная работа 4 - типовые задания:

Вариант 1

Описать последовательность фазообразования при кристаллизации сплавов 40/60, 80/20. Рассчитать структурные составляющие.

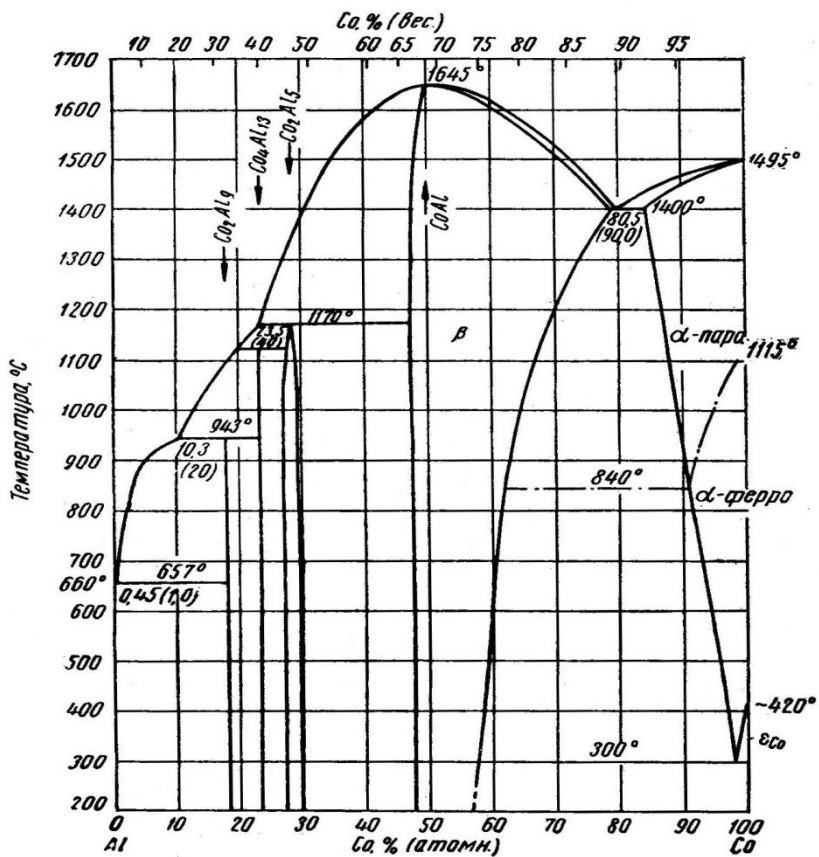


Диаграмма фазового равновесия Al — Co

Вариант 2

Описать последовательность фазообразования при кристаллизации сплавов 40/60, 80/20. Рассчитать структурные составляющие.

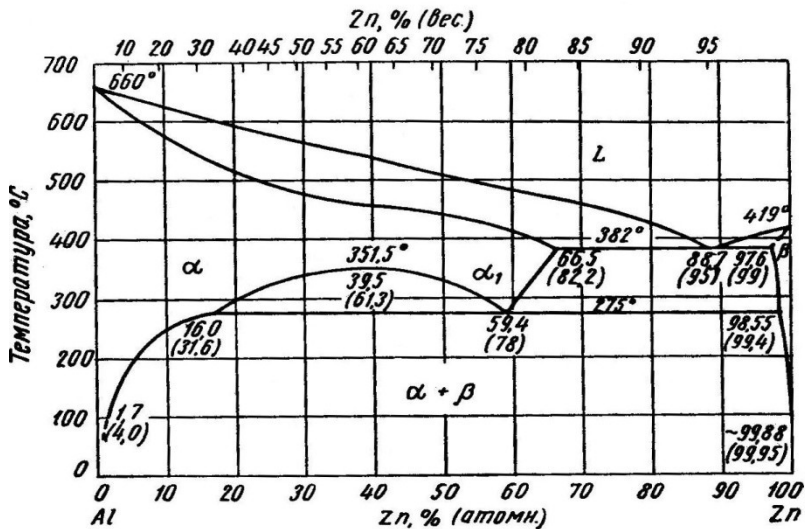


Диаграмма фазового равновесия Al—Zn. В скобках даны весовые проценты

Вариант 3

Описать последовательность фазообразования при кристаллизации сплавов 20/80, 40/60. Рассчитать структурные составляющие.

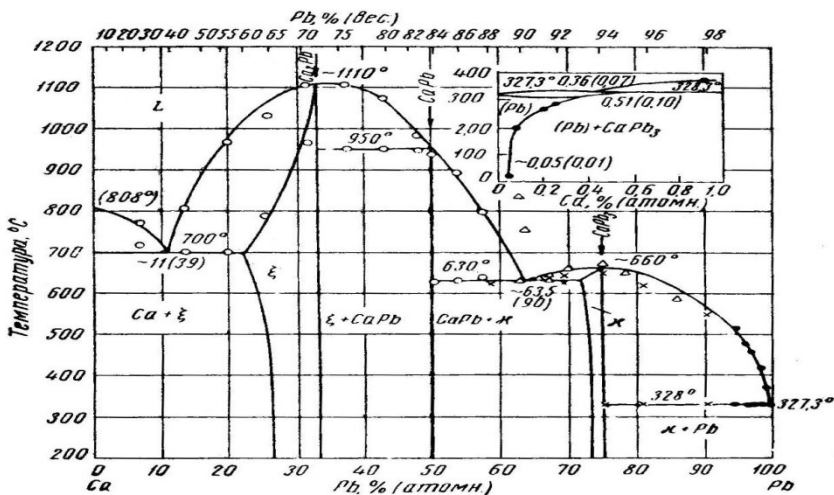


Диаграмма фазового равновесия Ca—Pb

Вариант 4

Описать последовательность фазообразования при кристаллизации сплавов 10/90, 80/20. Рассчитать структурные составляющие.

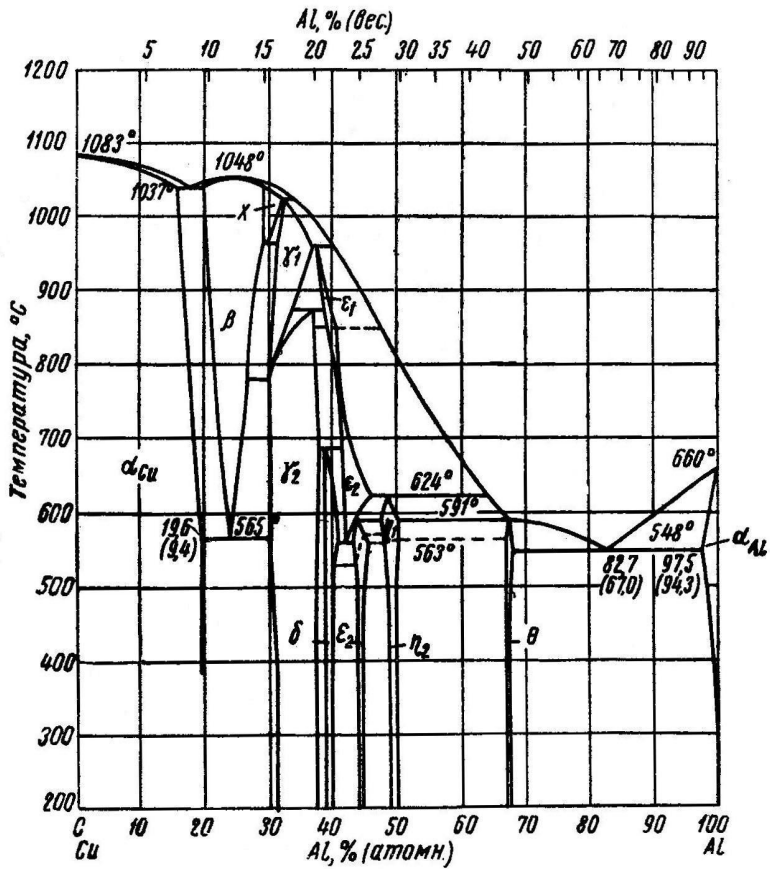


Диаграмма фазового равновесия Cu — Al. В скобках даны весовые проценты

Вариант 5

Описать последовательность фазообразования при кристаллизации сплавов 0,5% C, 5,0% C. Рассчитать структурные составляющие.

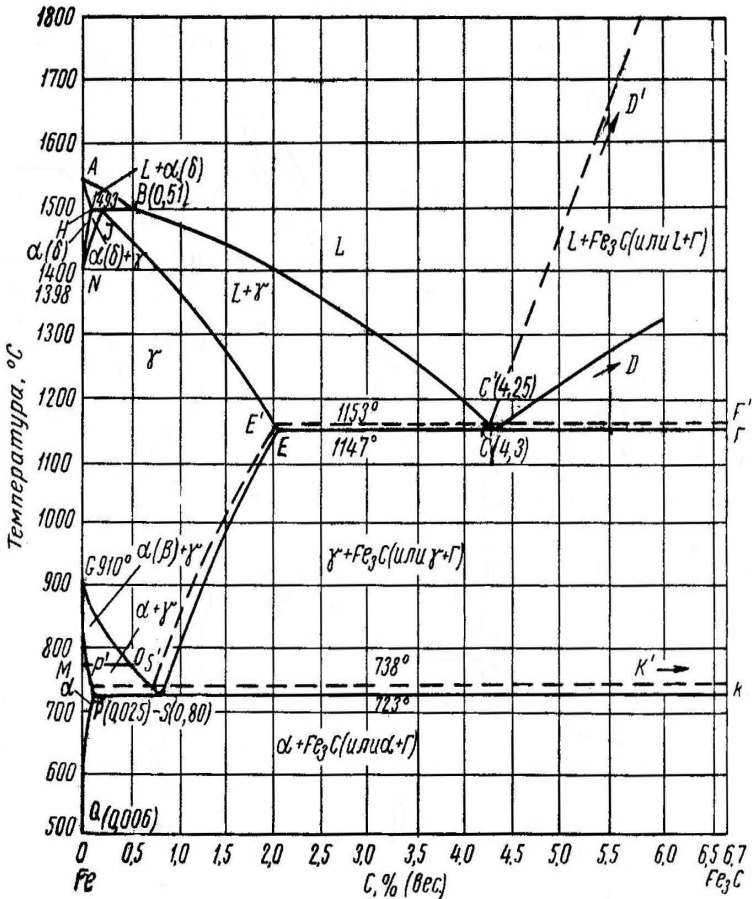


Диаграмма фазового равновесия Fe—C, стабильного (Fe—C) и метастабильного (Fe—Fe₃C)

Вопросы к зачету

1. Периодическая система, электронное строение.

2. Ионная, ковалентная, металлическая связи в материалах – свойства: электрические, магнитные, прочностные, теплопроводящие.
3. Структура материалов с ионной, ковалентной и металлической связями.
4. Координационное число, ионный радиус, энергия образования решетки, энергия Маделунга.
5. Ангармоническое приближение. Постоянная Грюнайзена.
6. Теоретическая прочность. Энергия атомной связи.
7. Точечные, линейные и плоские дефекты.
8. Границы зерен, энергия, зернограничные дислокации, движение границ.
9. Полиэдры Вороного, логнормальное распределение по размерам.
10. Кристаллизация, закон Вульфа-Кюри, дендрит Чернова.
11. Правило фаз Гиббса. Диаграмма однокомпонентной системы.
12. Двухкомпонентная система, правило рычага, отсутствие растворимости, ограниченная растворимость, полная растворимость. Полная растворимость в твердом и жидком состояниях. Ликвация, гомогенизация, зонная плавка.
13. Диаграмма и микроструктура сплавов при эвтектическом превращении.
14. Диаграмма и микроструктура сплавов при перитектическом превращении.
15. Диаграмма и микроструктура сплавов при наличии химического соединения.
16. Диаграмма и микроструктура сплавов при ограниченной сплавляемости в жидком виде, синтектическое превращение.
17. Уравнение Шредера-Вант-Гоффа, дисперсионное твердение.
18. Фазовые переходы 1-го и 2-го рода. Параметр порядка.
19. Типы твердых растворов.
20. Электронные соединения, сигма-фазы, фазы внедрения, химические соединения, фазы Лавеса.
21. Мартенситное превращение.
22. Диаграммы при аллотропическом превращении, полиморфизм.
23. Эвтектоидные и перитектоидные превращения на диаграммах.
24. Макроскопические свойства сплавов с различным типом диаграмм (твердость, электросопротивление).
25. Диаграммы растяжения/сжатия пластичных и хрупких материалов.

26. Возврат, полигонизация, рекристаллизация (обработки, собирательная, вторичная).

Вопросы к экзамену

1. Ионная, ковалентная, металлическая связи в материалах – свойства: электрические, магнитные, прочностные, теплопроводящие. Структура материалов с ионной, ковалентной и металлической связями.
2. Координационное число, ионный радиус, энергия образования решетки, энергия Маделунга.
3. Зонная структура твердых тел. Функции Блоха, эффективная масса, энергия Ферми, поверхность Ферми.
4. Элементы симметрии, операции симметрии, точечные и пространственные группы. Типы сингоний. Обозначения кристаллографических осей и плоскостей.
5. Примитивная ячейка, кристаллографическая элементарная ячейка. Решетки Бравэ. Кристаллические классы. Ячейка Вигнера-Зейтца.
6. Обратная решетка. Зона Бриллюэна.
7. Модули Юнга, сдвига, всестороннего сжатия. Коэффициент Пуассона.
8. Точечные, линейные и плоские дефекты. Упругое поле дефекта, ядро дефекта, энергия дефекта.
9. Границы зерен, энергия границ. Полиэдры Вороного, логнормальное распределение по размерам.
10. Диаграммы растяжения/сжатия пластичных и хрупких материалов, диаграммы истинных и условных напряжений, системы скольжения ГПУ, ГЦК, ОЦК, линии Чернова, зуб текучести, сдвиг и двойникование. Влияние температуры на пластическую деформацию.
11. Деформация поликристалла, микроструктура и текстура, сверхпластичность. Возврат, полигонизация, рекристаллизация.
12. Кристаллизация, линейная скорость роста, переохлаждение, критический радиус, скорость образования зародышей, гомогенное и гетерогенное зарождение. Закон Вульфа-Кюри, дендрит Чернова.
13. Структура жидкости. Радиальная функция распределения. Типы жидкостей.

14. Восходящая диффузия, спинодальный распад, образование модулированных структур, критерии возникновения спинодального распада.
15. Мартенситное превращение. Сверхупругость. Эффект памяти формы.
16. Диаграмма сплавов при полной растворимости в твердом и жидком состояниях. Ликвация, гомогенизация, зонная плавка.
17. Диаграмма и микроструктура сплавов при эвтектическом превращении в отсутствие растворимости и при наличии частичной растворимости в твердой фазе.
18. Диаграмма и микроструктура сплавов при перитектическом превращении.
19. Диаграмма и микроструктура сплавов при наличии химического соединения или промежуточной фазы, конгруэнтное и неконгруэнтное плавление.
20. Диаграмма и микроструктура сплавов при ограниченной сплавляемости в жидком виде, синтектическое превращение.
21. Предельные случаи диаграмм безвариантных равновесий.
22. Диаграммы при аллотропическом превращении, полиморфизм. Эвтектоидные и перитектоидные превращения на диаграммах.
23. Упорядочение твердых растворов с переходами первого и второго рода на диаграммах. Магнитные переходы.
24. Линии ограниченной растворимости на диаграммах, уравнение Шредера-Вант-Гоффа, дисперсионное твердение.
25. Типы твердых растворов, замещения, внедрения, вычитания. Точка Курнакова, антифазные области (границы).
26. Промежуточные фазы, электронные соединения, сигма-фазы, фазы внедрения, химические соединения, фазы Лавеса.
27. Структура и фазовые переходы в чистом железе. Фазы системы железо-углерод, структура графита и цементита, феррита и аустенита.
28. Диаграмма равновесия железо-углерод, стабильная, метастабильная.
29. Стали – малоуглеродистые, высокоуглеродистые. Чугуны, доэвтектические, заэвтектические. Серый и белый чугун.
30. Термическая обработка стали, перлит, сорбит, тростит, бейнит, мартенсит.
31. Кинетика распада аустенита, с-диаграммы, отжиг, нормализация, закалка. Отпуск стали, три стадии и изменение микроструктуры.

32. Структура и свойства технического железа при старении. Закалочное старение. Деформационное старение, линии Чернова.
33. Химико-термическая обработка, микроструктура при цементации и обезуглероживании.
34. Термическая обработка чугуна, углерод отжига, графитизация.
35. Концентрационный треугольник, правило рычага, правило центра тяжести в диаграммах тройных систем.
36. Диаграммы легированных сталей с открытой, расширенной, ограниченной и замкнутой гамма-областью.
37. Классы легированных сталей. Микроструктура, фазовый состав.
38. Марганцевая и хромистая стали.
39. Никелевая и кремнистая стали.
40. Медь и ее сплавы. Латунь и бронзы.
41. Алюминий и его сплавы. Старение алюминиевых сплавов, зоны Гинье-Престона.
42. Магний и его сплавы. Литейные и деформируемые сплавы магния.
43. Титан и его сплавы.
44. Никель и его сплавы. К-состояние. Инвар и элинвар.
45. Цинк и его сплавы. Олово, свинец и их сплавы.

Литература

а) основная учебная литература:

1. Степанов В.А. Фазовые равновесия в сплавах. - Обнинск: Полипринт, 2012. - 54 с.
2. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. Физическая химия. М.: Металлургия, 1987. - 688 с.
3. Б. Г. Лившиц. Металлография М: Металлургия, 1971, 422 с.
4. Физическое материаловедение. Учебник для вузов в 6 томах. Под ред. Б.А.Калина. М.: МИФИ, 2007.
5. В.Г.Малынкин, Е.В.Кочубей. Лабораторный практикум по курсу “Фазовые равновесия и структурообразование”. Обнинск. ИАТЭ. 2004, 76с.
6. В.Г.Малынкин. Лабораторный практикум по курсу “Материаловедение”. Обнинск. 1993.

б) дополнительная учебная литература:

1. Термическая обработка в машиностроении: Справочник/ Под ред. Ю.М.Лахтина, А.Г.Рахштадта.- М.: Машиностроение, 1980.- 783 с.
2. Б.Н.Арзамасов и др. Материаловедение. М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана. 2001, 648 с.
3. С.П.Соловьев, В.С.Хмелевская. Физико-технические основы материаловедения. Учебное пособие. Обнинск. 1990. 99 с.
4. С.П.Соловьев, В.С.Хмелевская. Механические, коррозионные и радиационные свойства материалов для ядерных энергетических установок. Учебное пособие. Обнинск. 1991. 174 с.

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

1. http://www.nanometer.ru/library_list.html - Библиотека материаловедения
2. <http://www.iumrshq.org> - Международный союз материаловедов (IUMRS)
3. http://www.nait.ru/journals/index.php?p_journal_id=2 – Издательство «Наука и технологии», ежемесячный научно-технический журнал «Материаловедение»
4. Теория и компьютерное моделирование в материаловедении и в физике конденсированного состояния. Входит в систему РИНЦ. Доступен полнотекстовый архив с 2011 года: <http://lettersonmaterials.com/ru/Readers/Volumes.aspx>

КРИСТАЛЛОГРАФИЯ, РЕНТГЕНОГРАФИЯ И ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ

Цель изучения дисциплины:

- понимание основных закономерностей геометрической и физической кристаллографии, основанных на проявлении симметрии в строении кристаллов и в их физических свойствах;
- приобретение навыков выбирать и использовать методы анализа состава и структуры материалов; необходимые приемы обработки экспериментальных результатов микроструктурных, дифракционных и спектрографических измерений и их анализ.

Содержание дисциплины, структурированное по разделам (темам)

1 семестр

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
Кристаллография		
1	Геометрия кристаллического пространства	<p>Предмет, роль и место физической кристаллографии в системе наук о материалах. Основные определения и понятия кристаллографии. Идеальное кристаллическое пространство и его свойства. Кристаллическая решётка и кристаллическая структура, способы их описания. Примитивная и непримитивная кристаллические элементарные ячейки, их основные характеристики (параметры), базис. Индексы узлов, узловых рядов и плоскостей. Понятие о структуре реальных кристаллов. Ячейка Вигнера-Зейтца. Обратная решетка кристалла. Зона Бриллюэна. Примеры построения векторов обратной решётки и зоны Бриллюэна для примитивной кубической, ОЦК и ГЦК решеток. Первая и вторая основные теоремы решетчатой кристаллографии. Основные формулы структурной (геометрической) кристаллографии. Условие параллельности узлового ряда и плоскости. Зона плоскостей, ось зоны, закон зон. Преобразование координат точек и индексов плоскостей при изменении кристаллографического базиса. Сравнительная характеристика излучений, используемых для экспериментального определения структуры кристаллов.</p>

		<p>Построение Эвальда для описания дифракции волн на кристаллической решётке. Векторное уравнение для (необходимого) условия дифракции. Условия Лауэ и уравнение Вульфа-Брэгга. Кристаллографические проекции. Градусные сетки. Применение метода кристаллографических проекций для представления структуры кристаллов.</p>
2	<p>Точечная симметрия твёрдых тел</p>	<p>Симметрия конечных фигур и молекул, основные способы ее описания. Точечная (закрытая) симметрия кристаллов. Первичные преобразования точечной симметрии и их комбинации. Преобразования симметрии как преобразования координат. Примеры (тождественное, плоскости симметрии, повороты, инверсия). Матричные представления операций точечной симметрии. Операции первого и второго рода. Определение элементов матрицы операции симметрии. Нахождение матриц операций симметрии для ряда частных случаев. Точечные операции симметрии, относительно которых инвариантна бесконечная кристаллическая решётка. Элементарные углы поворотов и порядки осей симметрии кристаллических решёток. Основные положения теории кристаллографических групп. Таблицы умножения (квадраты Кели) группы. Изоморфизм и гомоморфизм групп. Точечная симметрия и группа симметрии. Основные элементы и операции точечной симметрии. Способы их обозначения. Стандартные обозначения элементов симметрии конечных фигур и точечных кристаллографических групп на стереографической проекции. Порождающие элементы симметрии. Основные способы умножения операций точечной симметрии. Циклические группы,</p>

порождаемые кристаллографическими зеркальными и инверсионными поворотами. Теорема об умножении операций отражения в двух плоскостях симметрии и следствия из неё. Теорема об умножении поворотов вокруг двух пересекающихся осей симметрии (теорема Эйлера). Теорема об умножении поворотов вокруг двух пересекающихся осей симметрии 2-го порядка и следствия из неё. Теорема об умножении отражения в плоскости и поворота вокруг оси симметрии 2-го порядка и следствия из неё. Некубические кристаллографические точечные группы симметрии с одной поворотной и зеркально-поворотной осью. Некубические кристаллографические точечные группы симметрии с двумя генераторами. Некубические кристаллографические точечные группы симметрии с тремя генераторами. Кубические кристаллографические точечные группы симметрии. Особое направление в кристаллическом пространстве и его порядок. Кристаллографические категории, системы и сингонии. Элементы и группы симметрии равностороннего треугольника, тетрагональной пирамиды, тетраэдра, куба, октаэдра, пентагон-додекаэдра, икосаэдра, сферы, цилиндра, конуса. Тетраэдрический, октаэдрический и икосаэдрический наборы осей симметрии. Кристаллы триклинной и моноклинной сингоний. Кристаллы ромбической и тетрагональной сингоний. Кристаллы гексагональной и кубической сингоний. Принципы обозначения точечных групп (международные и по Шенфлису). Влияние точечной симметрии кристалла на геометрию кристаллической решётки. Кристаллографическая и кристаллофизическая системы координат.

		<p>Выбор (установка) кристаллографической системы координат для каждой сингонии. Предельные группы точечной симметрии. Общие представления о симметрии физических свойств и явлений. Взаимосвязь различных характеристик кристаллов с их точечной симметрией. Физические свойства кристаллов как скаляры, векторы и тензоры (примеры). Симметрия составных фигур. Суперпозиция групп симметрии. Принцип Кюри.</p> <p>Простые формы кристаллов.</p>
3	Пространственная симметрия кристаллических структур	<p>Пространственная симметрия кристаллов. Решётки Бравэ. Соотношения между примитивными и центрированными элементарными ячейками Бравэ. Операторный метод описания операций симметрии кристаллического пространства. Произведение операторов, обратный оператор. Операции симметрии атомных структур кристаллов. Зеркальные и скользящие отражения. Графические изображения зеркальных и скользящих плоскостей симметрии. Обычные и винтовые повороты. Графические изображения винтовых осей симметрии. Инверсионные и зеркальные повороты. Умножение операций пространственной симметрии кристаллических структур. Пространственные (фёдоровские) группы симметрии кристаллических структур. Символы пространственных групп. Графики пространственных групп.</p>
4	Основы кристаллохимии	<p>Типы, энергия, радиус действия, направление химической связи в кристаллах. Принцип, виды и симметрия плотнейших упаковок. Полиэдрический метод описания кристаллических структур. Координационные числа и координационные многогранники. Координаты, число,</p>

	<p>симметрия и максимальные размеры октаэдрических пустот в плотнейших упаковках. Координаты, число, симметрия и максимальные размеры тетраэдрических пустот в плотнейших упаковках.</p> <p>Структурные типы кристаллов химических элементов. Структурные типы соединений с формулами AX, A₂X, AX₂, AmBnSk (перовскита, шпинели). Полиморфизм. Изоморфизм. Морфотропия. Аллотропные модификации углерода. Твердые растворы. Структурные характеристики аморфных твёрдых тел. Структура жидких кристаллов.</p>
--	---

2 семестр

	Рентгенография	
1.	Взаимодействие рентгеновских лучей с веществом и техника рентгенографии	Природа рентгеновских лучей. Спектры рентгеновского излучения. Поглощение рентгеновских лучей веществом. Явления, сопровождающие прохождение рентгеновских лучей через вещество. Регистрация рентгеновского излучения.
2.	Рассеяние рентгеновских лучей кристаллами	Рассеяние свободным электроном. Когерентное рассеяние атомами. Обратная решетка. Связь размера и формы узла обратной решетки с размерами и формой кристалла. Рассеяние рентгеновских лучей элементарной ячейкой. Правила погасания.
3.	Основные методы рентгеноструктурного анализа	Построение Эвальда. Метод Лауэ. Метод вращения. Метод поликристалла. Рентгеновская дифрактометрия. Индексирование рентгенограмм. Прецизионные измерения периодов решетки.
4.	Интенсивность дифракционных максимумов	Интегральная интенсивность отражения от поликристалла. Угловой множитель интенсивности. Абсорбционный множитель. Влияние тепловых колебаний на интенсивность максимумов. Структурный множитель интенсивности. Множитель повторяемости.
5.	Исследование	Определение типа твердого раствора.

	твердых растворов	Построение диаграмм фазового равновесия. Анализ состава твердого раствора. Изучение упорядочения твердого раствора. Анализ термической обработки стали.
6.	Анализ структурных дефектов при деформации	Рентгеноанализ макронапряжений. Рентгеноанализ микронапряжений. Классификация кристаллических дефектов по эффектам на рентгенограммах. Анализ формы линий.
7.	Рентгенографический анализ текстур	Классификация текстур. Рентгеноанализ аксиальных текстур. Построение полюсных фигур.
8.	Применение дифракции электронов и нейтронов в структурном анализе	Особенности рассеяния электронов и нейтронов веществом. Основные области использования электронографии и нейтронографии.

3 семестр

Микроскопия		
1.	Электронно-оптические и другие микроскопические методы изучения состава и структуры	Эмиссионная электронная микроскопия. Электронный и ионный проекторы. Принципы некоторых специальных методов микроскопии: туннельная, атомно-силовая, рентгеновская дифракционная и абсорбционная микроскопия. Методы изучения элементного состава микрообъемов: микрорентгеноспектральный анализ, Оже-спектроскопия, масс-спектроскопия вторичных ионов.
2.	Просвечивающая электронная микроскопия	Устройство электронного микроскопа. Особенности формирования контраста в электронном микроскопе. Анализ точечных электронограмм. Анализ структурных несовершенств с помощью просвечивающей электронной микроскопии.
3.	Растровая электронная микроскопия	Устройство растрового электронного микроскопа. Растровая электронная микроскопия: принцип формирования изображения, контраст и разрешение,

		изображение во вторичных, отраженных и поглощенных электронах)
4.	Сканирующая зондовая микроскопия	Основные этапы развития СЗМ. Техника сканирующей зондовой микроскопии. Формирование и обработка СЗМ изображений. Методы сканирующей зондовой микроскопии.
5.	Специальные рентгеновские методы анализа структуры	Диффузное рассеяние рентгеновских лучей. Изучение структуры аморфных твердых и жидких сплавов. Анализ ближнего порядка в твердых растворах. Изучение микронеоднородности вещества с помощью малоуглового рассеяния рентгеновских лучей и нейтронов.

Контрольная работа 1 - Геометрия кристаллического пространства и точечная симметрия кристаллов, типовые вопросы и задания:

1. Идеальное кристаллическое пространство и его свойства.
2. Кристаллическая решётка и кристаллическая структура, способы их описания.
3. Примитивная и непримитивная кристаллические ячейки, их основные характеристики (параметры).
4. Индексы узлов, узловых рядов и узловых плоскостей кристаллической решётки.
5. Первая основная теорема решётчатой кристаллографии.
6. Ячейка Вигнера-Зейтца, обратная решётка, зона Бриллюена.
7. Построение ячеек обратной решётки для ОЦК и ГЦК кристаллов.
8. Вторая основная теорема решётчатой кристаллографии.
9. Формула для расчёта межплоскостного расстояния для любой кристаллической решётки.
10. Формулы для периода идентичности узлового ряда, угла между рядами, угла между двумя плоскостями, угла между плоскостью и узловым рядом.
11. Условие параллельности узлового ряда и плоскости.
12. Зона плоскостей, ось зоны, закон зон.
13. Преобразование координат точек и индексов плоскостей при изменении кристаллографического базиса.
14. Построение Эвальда для описания дифракции волн на кристаллической решётке.

15. Векторное уравнение для (необходимого) условия дифракции, условия Лауэ, уравнение Вульфа-Брэгга.
16. Кристаллографические проекции, их свойства и способы построения, градусные сетки.
17. Понятие о симметрии, точечная (закрытая) симметрия кристаллов.
18. Основные положения теории кристаллографических групп.
19. Матричный метод описания операций точечной симметрии. Операции первого и второго рода. Определение элементов матрицы операции симметрии.
20. Нахождение матриц операций симметрии: а) тождественного преобразования, б) поворота на некоторый угол вокруг одной из осей координат, в) поворота вокруг оси 2-го порядка, лежащей в координатной плоскости, г) отражения в плоскости симметрии, параллельной координатной оси, д) зеркального поворота на некоторый угол вокруг оси координат, е) инверсионного поворота на некоторый угол вокруг оси координат.
21. Точечные операции симметрии, относительно которых инвариантна бесконечная кристаллическая решётка.
22. Элементарные углы поворотов и порядки осей симметрии кристаллических решёток.
23. Циклические группы, порождаемые кристаллографическими зеркальными и инверсионными поворотами.
24. Обозначения элементов симметрии точечных кристаллографических групп на стереографической проекции.
25. Основные способы умножения операций точечной симметрии. Теорема об умножении операций отражения в двух плоскостях симметрии и следствия из неё.
26. Теорема об умножении поворотов вокруг двух пересекающихся осей симметрии (теорема Эйлера) .
27. Оси симметрии платоновых тел. Тетраэдрический, октаэдрический и икосаэдрический наборы осей симметрии.
28. Теорема об умножении поворотов вокруг двух пересекающихся осей симметрии 2-го порядка и следствия из неё.
29. Теорема об умножении отражения в плоскости и поворота вокруг оси симметрии 2-го порядка и следствия из неё.
30. Некубические кристаллографические точечные группы симметрии с одной поворотной и зеркально-поворотной осью.
31. Некубические кристаллографические точечные группы симметрии с двумя генераторами.

32. Некубические кристаллографические точечные группы симметрии с тремя генераторами.
33. Кубические кристаллографические точечные группы симметрии.
34. Особое направление в кристаллическом пространстве и его порядок. Кристаллографические категории и сингонии.
35. Кристаллы триклинной и моноклинной сингоний.
36. Кристаллы ромбической и тетрагональной сингоний.
37. Кристаллы гексагональной и кубической сингоний.
38. Принципы обозначения точечных групп (международные и по Шенфлису).
39. Влияние точечной симметрии кристалла на геометрию кристаллической решётки.
40. Выбор (установка) кристаллографической системы координат для каждой сингонии.
41. Предельные группы симметрии.
42. Суперпозиция групп симметрии. Принцип Кюри.
43. Определить базис ячеек следующих кристаллов: V , Mg .
44. Указать тип ячеек Браве для решеток этих веществ, их базис.
45. Построить примитивную ячейку для объемноцентрированной кубической решетки.
46. Построить примитивную ячейку для гранецентрированной кубической решетки.
47. Дана двумерная решетка, элементарной ячейкой которой является ромб, острый угол которого 60 град. Построить обратную решетку и первую зону Бриллюэна.
48. *Параметры ячейки:* $a = 10 \text{ \AA}$, $b = 17 \text{ \AA}$, $c = 20 \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 110^\circ$. Найти объём ячейки кристалла, параметры и объём ячейки обратной решётки.
49. Определить элементарную ячейку обратной решётки для ромбоэдрического кристалла (параметры прямой решётки: $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$) и для ромбического кристалла (параметры прямой решётки: $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$).
50. Принадлежат ли плоскости (111), (171), (212) к одной зоне?
51. Записать индексы направления в гексагональной плотноупакованной решетке, вдоль которого расположены атомы с координатами $[[2/3 \ 1/3 \ 0]]$ и $[[1/3 \ 2/3 \ 1/2]]$.
52. Вычислить углы между направлением [001] и совокупностями параллельных направлений с индексами $\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 112 \rangle$ для Mg .

53. Даны плоскости с индексами (111), (171), (312), (021), (311), (515), (133), (113), (110), (011). Определите среди перечисленных плоскостей пять, принадлежащих одной зоне.
54. Определить период идентичности вдоль направления (111) в решетке алмаза.
55. Найти индексы плоскостей, отсекающих на координатных осях отрезки 2;3;4; -3;3;2.
56. Для кубической сингонии найти индексы плоскости (hkl), в которой находятся направления $[011]$ и $[102]$.
57. Найти расстояние между плоскостями (111) для триклинного кристалла, имеющего параметры: $a = 6,64 \text{ \AA}$, $b = 8,31 \text{ \AA}$, $c = 11,18 \text{ \AA}$, $\alpha = 64.0^\circ$, $\beta = 46.3^\circ$, $\gamma = 77.4^\circ$.
58. Найти порядок оси симметрии вдоль направления $[111]$ в гранцентрированной кубической решётке.
59. Записать международной символикой точечные группы: а) D_2 , б) $C_2 v$, в) $C_3 v$, г) S_4 , д) $C_4 h$, е) $D_4 h$, ж) $C_6 h$, з) $D_6 h$, и) T_h .
60. Записать подгруппы следующих точечных групп: а) mmm , б) $6mm$, в) $4/mmm$.
61. Найти порядки следующих групп симметрии: mmm , 222 , 23 , $m\bar{3}m$.
62. Привести матричное представление точечной группы $m\bar{3}m$ и указать, каким преобразованиям соответствуют ее элементы.
63. Записать матрицы-генераторы групп: а) 222 , б) $4mm$
64. В кристалле имеются повороты вокруг координатных осей x и y , как вокруг осей 4 . Записать матричное представление точечной группы этого кристалла.
65. К кубическому кристаллу с симметрией $m\bar{3}m$ приложили одноосное напряжение растяжения. Какой симметрией будет обладать кристалл, если напряжение прикладывается вдоль направлений: а) $[001]$, б) $[111]$, в) $[110]$.
66. Излучение с длиной волны $\lambda = 4 \cdot 10^{-3} \text{ нм}$ распространяется вдоль оси $[010]$ кристаллической пластинки вольфрама. Построить узлы обратной решетки плоскости $[010]$, сферу Эвальда и определить возможные направления дифрагированных пучков.
67. Рассчитать структурный фактор для ОЦК решётки.

Контрольная работа 2 - Пространственная симметрия кристаллических структур и основы кристаллохимии, типовые вопросы и задания:

1. Решётки Бравэ.
2. Соотношения между примитивными и центрированными элементарными ячейками Бравэ.
3. Операторный метод описания операций симметрии кристаллического пространства. Произведение операторов, обратный оператор.
4. Операции симметрии атомных структур кристаллов. Зеркальные и скользящие отражения.
5. Графические изображения зеркальных и скользящих плоскостей симметрии.
6. Операции симметрии атомных структур кристаллов. Обычные и винтовые повороты.
7. Графические изображения винтовых осей симметрии.
8. Операции симметрии атомных структур кристаллов. Инверсионные и зеркальные повороты.
9. Умножение операций пространственной симметрии кристаллических структур.
10. Пространственные (фёдоровские) группы симметрии кристаллических структур. Символы пространственных групп.
11. График пространственной группы (пример).
12. Основные типы химических связей в кристаллах, их энергия, радиус действия, направленность.
13. Системы кристаллохимических радиусов.
14. Принцип плотнейшей шаровой упаковки. Двух- и трёхслойные упаковки одинаковых шаров, их симметрия.
15. Тетраэдрические и октаэдрические пустоты в плотнейших упаковках.
16. Координаты шаров и пустот в двух- и трёхслойных упаковках. Максимальные размеры пустот.
17. Плотнейшие упаковки шаров двух сортов.
18. Полиэдрический метод описания кристаллических структур.
19. Структурные типы кристаллов химических элементов (примеры).
20. Структурные типы соединений с формулой A_2X (примеры).
21. Структурные типы соединений с формулами A_2X и A_2X_2 (примеры).
22. Структурные типы перовскита и шпинели.

23. Полиморфизм (примеры).
24. Аллотропные модификации углерода.
25. Изоморфизм и морфотропия (примеры).
26. Виды твёрдых растворов (примеры).
27. Изобразить на чертеже винтовую ось симметрии 3 порядка.
28. Выписать подмножество пространственных групп, отвечающей точечной группе $m\bar{3}m$.
29. Вывести пространственные группы, связанные с триклинной сингонией.
30. Определить точечную группу, соответствующую пространственной группе $P 2_1 / b$.
31. Выписать симморфные пространственные группы для тетрагональной сингонии.

Вопросы для коллоквиума I (рентгенография)

Взаимодействие рентгеновских лучей с веществом и техника рентгенографии

1. Чем обусловлено свойство РЛ проникать сквозь вещество?
2. От чего зависит проникающая способность РЛ?
3. Сплошной спектр РЛ
4. Коротковолновая граница спектра РЛ
5. Возникновение характеристических РЛ
6. Чем обусловлено появление β -линий на рентгенограмме?
7. Как объяснить существование α -дублета?
8. С чем связано ослабление интенсивности первичного пучка РЛ при прохождении сквозь вещество?
9. Основной закон поглощения РЛ
10. Определите толщину полупоглощающего слоя

Рассеяние рентгеновских лучей кристаллами

11. Механизм когерентного рассеяния РЛ
12. Некогерентное рассеяние РЛ
13. Дайте определение обратной решетки
14. Как межплоскостное расстояние кристаллической решетки связано с вектором обратной решетки?
15. Дифракция РЛ от атомного ряда
16. Дифракция РЛ от атомной плоскости

17. Уравнения Лауэ

18. Сформулируйте условие отражения РЛ от атомной плоскости
Основные методы рентгеноструктурного анализа

19. Метод Лауэ

20. Метод вращения монокристалла

21. Метод Дебая-Шеррера

22. Рентгеновская дифрактометрия

23. Фокусировка по Брэггу-Брентано

Интенсивность дифракционных максимумов

24. Рассчитайте структурный множитель для упорядоченного твердого раствора Cu_3Au , $Z_{\text{Cu}}=29$, $Z_{\text{Au}}=79$.

25. Перечислите факторы, влияющие на интенсивность лучей отраженных от атомных плоскостей.

26. Интенсивность лучей, рассеянных простой решеткой.

27. Влияние размещения атомов внутри элементарной ячейки на интенсивность линий рентгенограммы.

28. Рассчитайте структурный множитель для ОЦК решетки.

29. Рассчитайте структурный множитель для ГЦК решетки.

30. Атомная функция рассеяния и атомный множитель интенсивности.

31. Температурный множитель интенсивности.

32. Множитель повторяемости

33. Угловой множитель интенсивности

34. Интегральная интенсивность отражения

35. Абсорбционный множитель интенсивности

Вопросы для коллоквиума 2 (рентгенография)

Исследование твердых растворов

1. Как с помощью рентгеноструктурного анализа определить тип твердого раствора?

2. Опишите рентгенографическую методику построения границы растворимости

3. Рентгеноанализ стали при термической обработке

4. Параметры упорядочения

5. Определите тип твердого раствора, образующегося в однофазной аустенитной марганцовистой стали с 12,3% Mn и 1,34% (по массе) C имела плотность $\rho=7,83$ г/см³. Период

кристаллической решетки $a=3,630 \text{ \AA}$. $A_c=12$; $A_{Fe}=55,84$;
 $A_{Mn}=54,93$

6. Рентгеноанализ упорядоченных твердых растворов

Анализ структурных дефектов при деформации.

7. Рентгеноанализ макронапряжений
8. Уширение рентгеновских максимумов
9. Рентгеноанализ микронапряжений

Рентгенографический анализ текстур

10. Текстуры, виды текстур
11. Рентгеноанализ аксиальной текстуры
12. Явление рассеяния текстуры
13. Построение полюсных фигур

Вопросы для коллоквиума 3 (микроскопия)

Электронно-оптические и другие микроскопические методы изучения состава и структуры

1. Какую информацию об исследуемом объекте можно получить из Оже-спектров?
2. Применение метода ВИМС для исследования твердых тел.
3. Распыление и послойный анализ в методе ВИМС
4. Оже - переходы: система обозначений (переходы KL_1L_1 ; KL_1L_2 , энергии Оже - электронов
5. Количественный анализ с помощью Оже - спектроскопии.
6. Устройство ионного проектора.
7. Устройство электронного микроскопа.
8. Принцип работы просвечивающего электронного микроскопа.
9. Принцип работы растрового электронного микроскопа.
10. Основы микрорентгеноспектрального анализа материалов.
11. Области применения микрорентгеноспектрального анализа материалов.
12. Получение изображения в рентгеновских лучах.
13. Основы сканирующей зондовой микроскопии.
14. Принцип работы сканирующих зондовых микроскопов.

Вопросы для коллоквиума 4 (микроскопия)

Просвечивающая электронная микроскопия.

1. Устройство электронного микроскопа.
2. Контраст и формирование изображения в электронном микроскопе.

3. Просвечивающая электронная микроскопия: светлопольные изображения.
4. Просвечивающая электронная микроскопия: темнопольные изображения.
5. Объекты исследования в просвечивающем электронном микроскопе.
6. Анализ точечных электронограмм.
7. Анализ структурных несовершенств с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

Растровая электронная микроскопия

1. Устройство растрового электронного микроскопа.
2. Процессы взаимодействия электронов зонда с веществом.
3. Область взаимодействия электронов зонда с веществом.
4. Растровая электронная микроскопия: принцип формирования изображения.
5. Растровая электронная микроскопия: контраст и разрешение.
6. Изображение во вторичных электронах.
7. Изображение в отраженных электронах.
8. Изображение в поглощенных электронах.

Сканирующая зондовая микроскопия

1. Устройство и принцип работы СЗМ.
2. Принцип работы сканирующих зондовых микроскопов.
3. Формирование и обработка СЗМ изображений.
4. Возможности атомно-силовой микроскопии.
5. Преимущества атомно-силовой микроскопии.

Специальные методы рентгеновского анализа структуры

1. Применение диффузного рассеяния рентгеновских лучей в структурных исследованиях.
2. Изучение структуры аморфных твердых и жидких сплавов.
3. Анализ ближнего порядка в твердых растворах.

Вопросы к экзамену 1 (кристаллография)

1. Предмет, роль и место физической кристаллографии в системе наук о материалах. Основные определения и понятия кристаллографии.
2. Симметрия конечных фигур и молекул, основные способы ее описания.
3. Основные элементы и операции точечной (закрытой) симметрии. Способы их обозначения. Принципы обозначения

- (международные и по Шенфлису) точечных групп симметрии кристаллов.
4. Первичные преобразования точечной симметрии и их комбинации.
 5. Матричные представления операций точечной симметрии.
 6. Сложение (умножение) элементов точечной симметрии. Порождающие элементы симметрии.
 7. Предельные группы точечной симметрии.
 8. Общие представления о симметрии физических свойств и явлений.
 9. Взаимосвязь различных характеристик кристаллов с их точечной симметрией.
 10. Основные постулаты теории групп. Таблицы умножения (квадраты Кели) группы.
 11. Изоморфизм и гомоморфизм групп.
 12. Точечная симметрия и группа симметрии.
 13. Симметрия составных фигур. Принцип Кюри.
 14. Описание структуры идеальных кристаллов. Кристаллическая решётка и базис. Индексы узлов, узловых рядов и плоскостей. Понятие о структуре реальных кристаллов.
 15. Обратная решетка кристалла. Примеры построения ее векторов и зоны Брюллиэна для примитивной кубической, ОЦК и ГЦК решеток.
 16. Основные формулы структурной (геометрической) кристаллографии.
 17. Кристаллографические проекции. Градусная сетка Вульфа.
 18. Стандартные обозначения элементов симметрии конечных фигур на стереографической проекции.
 19. Пространственная симметрия кристаллов.
 20. Первая и вторая основные теоремы решетчатой кристаллографии.
 21. Кристаллографическая и кристаллофизическая системы координат Правила установки кристаллов.
 22. Преобразования симметрии как преобразования координат. Примеры (тождественное, плоскости симметрии, повороты, инверсия).
 23. Семейство групп с единственной поворотной осью симметрии.
 24. Семейство групп с несколькими поворотными осями симметрии.
 25. Полиэдрический метод описания кристаллических структур.

26. Координационные числа и координационные многогранники.
27. Кристаллографические категории, системы и сингонии.
28. Характеристика решеток Бравэ.
29. Поворотные и винтовые оси симметрии в кристаллах. Зеркальные и скользящие отражения.
30. Структурные типы кристаллов химических элементов.
31. Структурные типы соединений с формулами $AХ$, A_2X , $AХ_2$, $A_mB_nC_k$ (перовскита, шпинели).
32. Стандартные обозначения элементов симметрии конечных фигур.
33. Простые формы кубических кристаллов.
34. Применение метода кристаллографических проекций для представления структуры кристаллов.
35. Сравнительная характеристика излучений, используемых для экспериментального определения структуры кристаллов.
36. Условия Лауэ и Вульфа-Брэгга, схема Эвальда дифракционного эксперимента.
37. Типы, энергия, радиус действия, направление химической связи в кристаллах.
38. Принцип, виды и симметрия плотнейших упаковок.
39. Координаты, число, симметрия и максимальные размеры октаэдрических пустот в плотнейших упаковках.
40. Координаты, число, симметрия и максимальные размеры тетраэдрических пустот в плотнейших упаковках.
41. Полиморфизм. Изоморфизм. Морфотропия.
42. Твердые растворы.
43. Физические свойства кристаллов как скаляры, векторы и тензоры (примеры).
44. Структура жидких кристаллов.
45. Элементы и группы симметрии равностороннего треугольника, тетрагональной пирамиды, тетраэдра, куба, октаэдра.
46. Элементы и группы симметрии пентагон-додекаэдра, икосаэдра, сферы, цилиндра, конуса.

Вопросы к экзамену 2 (рентгенография)

1. Природа рентгеновских лучей. Спектры рентгеновского излучения.
2. Природа рентгеновских лучей. Характеристическое рентгеновское излучение.
3. Индицирование рентгенограмм. Прецизионные измерения периодов решетки.
4. Природа рентгеновских лучей. Явления, сопровождающие прохождение рентгеновских лучей сквозь вещество.
5. Основной закон поглощения рентгеновских лучей веществом.
6. Классификация текстур. Рентгенографический анализ аксиальных текстур.
7. Рентготехника. Источники и детекторы рентгеновских лучей.
8. Основные методы рентгеноструктурного анализа. Обратная решетка.
9. Интегральная интенсивность отражения. Множитель Лоренца.
10. Основные уравнения дифракции рентгеновских лучей.
11. Структурный множитель интенсивности дифракционных максимумов.
12. Рассеяние рентгеновских лучей кристаллической решеткой.
13. Анализ структурных дефектов при деформации.
14. Анализ дефектов кристаллического строения по эффекту уширения линий рентгенограмм.
15. Метод Лауэ. Построение Эвальда для метода Лауэ.
16. Классификация твердых растворов. Рентгенографическое определение типа твердого раствора.
17. Метод вращения монокристалла. Построение Эвальда для метода вращения.
18. Изучение упорядочения твердых растворов. Параметр дальнего порядка.
19. Метод Дебая - Шеррера. Построение Эвальда для метода поликристалла.
20. Анализ фазового состава стали после термической обработки.
21. Выбор излучения и режима съемки.
22. Рентгеновская дифрактометрия. Фокусировка по Брэггу-Брентано.
23. Факторы, влияющие на интенсивность дифракционных максимумов.
24. Рентгенографическое определение границы растворимости.
25. Электронография. Основные принципы и области применения.
26. Нейтронография. Основные принципы и области применения.

Вопросы к экзамену 3 (электронная микроскопия)

1. Устройство и принцип действия просвечивающего электронного микроскопа.
2. Контраст и формирование изображения в просвечивающем электронном микроскопе. Объекты исследования для просвечивающей электронной микроскопии.
3. Просвечивающая электронная микроскопия: светлопольные изображения, темнопольные изображения
4. Просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения.
5. Устройство и принцип действия растрового электронного микроскопа.
6. Растровая электронная микроскопия. Формирование контраста в растровом электронном микроскопе.
7. Растровая электронная микроскопия. Взаимодействие электронного зонда с веществом.
8. Растровая электронная микроскопия. Получение изображения во вторичных и отраженных электронах.
9. Сканирующая зондовая микроскопия.
10. Атомно-силовая микроскопия.
11. Основы метода ВИМС: процессы распыления и ионизации; анализ и регистрация вторичных ионов.
12. Применение метода ВИМС для исследования твердых тел. Распыление и послойный анализ в методе ВИМС.
13. Основы метода Оже - электронной спектроскопии. Оже - переходы: система обозначений (переходы KL_1L_1 ; KL_1L_2).
14. Качественный и количественный элементный анализ с помощью Оже - спектроскопии.
15. Классификация методов исследования структуры и состава твердых тел.
16. Основы электронно-зондового микроанализа: образование и поглощение рентгеновского излучения (тормозное рентгеновское излучение, характеристическое излучение). Основные решаемые задачи.
17. Эмиссия и поглощение электронов при электронно-зондовом микроанализе: отраженные электроны; вторичные электроны; поглощенные электроны.
18. Рентгеноспектральный анализ: подготовка образца;

качественный анализ (типы линейного анализа, анализ по площадям); количественный анализ (принцип, ошибки).

19. Интерпретация изображения, ограничения и возможности метода автоионной микроскопии.
20. Диффузное рассеяние рентгеновских лучей.
21. Изучение структуры аморфных твердых и жидких сплавов.
22. Изучение микронеоднородности вещества с помощью малоуглового рассеяния рентгеновских лучей и нейтронов.

Литература

а) основная учебная литература:

1. Физическое материаловедение: Учебник для вузов: в 7 т. /Под общей ред. Б.А. Калина. – Том 3. Методы исследования структурно-фазового состояния материалов/ Н.В. Волков, В.И. Скрытный, В.П. Филиппов, В.Н. Яльцев. – М.: МИФИ, 2012. – 800 с. 50 экз.
2. С.П.Соловьев. Физическая кристаллография. Учебное пособие для студентов специальности 070900 – Обнинск: ИАТЭ,1998, 169 с. (30 экз. в библи.).
3. Чупрунов Е.В., Хохлов А.Ф., Фадеев М.А.. Основы кристаллографии. М.: Издательство Физико-математической литературы, 2004, 500 с.
4. Чупрунов Е.В., Хохлов А.Ф. Задачи по кристаллографии. М.: Издательство Физико-математической литературы, 2003, 208 с.
5. Уманский Я.С. Рентгенография металлов и полупроводников. - М.: изд-во "Металлургия". - 1969. - 496 с.
6. С.С.Горелик, Л.Н.Расторгуев, Ю.А.Скаков. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: МИСиС, 2002.-360с.
7. Металловедение и термическая обработка стали. Справочник под ред. М.Л.Бернштейна и А.Г.Рахштадта. М.: Металлургия. 1991. Т.1, 352 с. (5 экз. в библи.)
8. Д. Брандон, У. Каплан. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. Москва: Техносфера, 2004. – 384с.

б) дополнительная учебная литература:

1. Я.С.Уманский, Ю.А.Скаков, А.Н.Иванов, Л.Н.Расторгуев. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия. 1982. 631 с.
2. Русаков А.А. Рентгенография металлов. М.: Атомиздат, 1977,

480 с.

3. Русаков А.А., Яльцев В.Н. Основы рентгенографии металлов. Ч.1, М.: МИФИ, 1994, 172 с.
4. Методы анализа поверхностей. Под ред. Зандерна А. - М.: Мир. - 1979. - 582с.

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

1. Международный центр дифракционных данных [Официальный сайт]. - URL: <http://www.icdd.com>
2. COD (Crystallography Open Database) - база данных кристаллических структур органических, неорганических, металло-органических соединений и минералов, за исключением биополимеров — URL: <http://www.crystallography.net>
3. Сайт Международного Союза Кристаллографов (International Union of Crystallography) - URL: <http://www.iucr.org>

МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ И ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ

Цель изучения дисциплины:

- приобретение знаний об упругости твердых тел и ознакомление с теоретическими основами механики деформируемого тела
- определение и описание стадий пластической деформации материалов;
- приобретение знаний об особенностях пластической деформации кристаллов и сплавов.
- применение феноменологических, математических и численных моделей для описания и прогнозирования явлений упругой и пластической деформации и разрушения материалов, использование феноменологических, математических и численных (альтернативных) моделей для описания и прогнозирования явлений упругой и пластической деформации, разрушения материалов.

Содержание дисциплины, структурированное по разделам (темам)

Семестр 1

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
Название раздела		
1	Упругость твердых тел	Тензор дисторсии и деформации, девиатор деформации, тензор напряжений, закон Гука. Уравнение равновесия деформируемого тела. Модули упругости, связь между модулями упругости. Упругий гистерезис.
2	Неупругость твердых тел	Неупругость: магнитоstriction, микропластичность, эффект Снука. Изменение модулей упругости с температурой. Плавление, правило Линдемана. Решеточная единица энергии.
3	Пластическая деформация	Упругое поле дислокации Тензор плотности дислокаций. Дисклинации, когерентные межфазные границы. Энергия и упругое поле дефектов в изотропной среде. Диаграммы условных и истинных напряжений. Энергия пластической деформации. Модуль упрочнения. Пластичные и хрупкие материалы. Диаграммы растяжения/сжатия пластичных и хрупких материалов. Критерий устойчивости деформации. Свободная энергия и флуктуации пластической деформации. Структуры пластического течения материалов.

Семестр 2

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
Название раздела		
4	Пластическая деформация кристаллов	Кристаллы: вакансии, дислокации (краевая, винтовая), скорость переползания и скольжения, источник Франка-Рида. Кристаллы: дефекты упаковки. границы зерен.

		<p>Системы скольжения ГПУ, ГЦК, ОЦК монокристаллов. Геометрия скольжения. Закон Шмида. Стереографический треугольник. Механизмы и стадии упрочнения металлов. Эффект Баушингера. Сдвиговая деформация и стадии упрочнения ГЦК кристаллов. Сдвиговая деформация кристаллов - ОЦК Сдвиговая деформация ГПУ кристаллов. Двойникование в гексагональных и кубических кристаллах. Условия деформации металлов по механизмам дислокационному и двойникования Сдвиговые (мартенситные) полиморфные превращения. Сверхупругость и память формы. Деформация твердых растворов, эффект Портевена – Ле-Шателье. Деформация упорядоченных твердых растворов. Сверхструктурные дислокации.</p>
5	Деформация поликристалла	<p>Упругая деформация поликристалла. Упрочнение поликристалла соотношение Петча-Холла. диаграмма деформации поликристалла. Системы скольжения - схемы Закса и Тэйлора. Скорость деформации. Зуб текучести и полосы Людерса при быстрой деформации. Ударная волна и пластическая волны деформации. Микроструктура металлов при импульсной деформации. Горячая деформация. Деформация и напряжение рекристаллизации, статическая и динамическая рекристаллизация. Сверхпластичность.</p>
6	Ползучесть	<p>Стационарная ползучесть Дорна, Харпера-Дорна, Набарро-Херринга и Кобла. Три стадии ползучести и карты механизмов деформации стационарной ползучести. Третья стадия ползучести. Длительная прочность. Ползучесть от внутренних сил. Метод Работнова.</p>

Семестр 3

№	Наименование раздела /темы	Содержание
---	----------------------------	------------

	дисциплины	
	Название раздела	
7	Вязко-хрупкий переход	Вязко-хрупкое разрушение, критерий Гриффитса. Вязкость разрушения и ударная вязкость. Механизмы вязко-хрупкого перехода характера разрушения. Хладостойкость сталей.
8	Деформация соединений	Деформация и ползучесть интерметаллидов и фаз внедрения. Механические свойства аморфных металлов. Модуль упругости двухфазной системы, вилка Хилла. Деформация и напряжения от частиц фазы в двухфазной системе. Диаграммы деформации двухфазной системы.

Контрольная работа 1 - Упругость твердых тел, типовые задания:

Задание 1

Коэффициент Пуассона железа 0,28, $G=80$ ГПа. Найти значения остальных модулей упругости.

Задание 2

Для алюминия $G=28$ ГПа, $E=26$ ГПа. Рассчитать коэффициент Пуассона.

Задание 3

Коэффициент Пуассона вольфрама 0,3, $G=130$ ГПа. Найти значения остальных модулей упругости.

Задание 4

Рассчитать решеточную единицу энергии Gb^3 ванадия, если $G=50$ ГПа, параметр ОЦК решетки $a=0,287$ нм.

Задание 5

Рассчитать решеточную единицу энергии Gb^3 никеля, если $G=77$ ГПа, параметр ГЦК решетки $a=0,352$ нм.

Задание 6

Изотропный материал испытывает упругую деформацию $\epsilon=3 \cdot 10^{-2}$ вдоль направления x . Расписать тензор деформации, найти относительное изменение объема, если коэффициент Пуассона $\mu=0,3$.

Задание 7

Изотропный материал испытывает упругую деформацию $\epsilon=210^{-2}$ вдоль направления y , расписать тензор деформации, найти

относительное изменение объема, если коэффициент Пуассона $\mu = 0,35$.

Задание 8

Выразить характеристическую температуру Дебая T_D через модуль Юнга E и плотность ρ .

Контрольная работа 2 - Неупругость твердых тел, типовые задания:

Задание 1

Оценить частоту Снука, если коэффициент диффузии $10^{-18} \text{ м}^2/\text{с}$.

Задание 2

Оценить коэффициент диффузии, если частота Снука равна 2 Гц.

Задание 3

Модуль Юнга железа 205 ГПа, а никеля 220 ГПа. Во сколько раз отличаются их коэффициенты рассеяния энергии за цикл упругой циклической деформации за счет перемагничивания при одинаковых амплитудах деформации?

Задание 4

Как изменится скорость звука $c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ при увеличении температуры от 0 К до $T_{пл}$?

Задание 5

Для Fe-C при 300 К частота Снука равна 1 Гц, энергия активации диффузии С 1 эВ. Найти частоту Снука при 600 К.

Контрольная работа 3 - Пластическая деформация кристаллов, типовые задания:

Задание 1

Найти отношение V/b^3 , где V – объем, занимаемый одним атомом, b – кратчайшее межатомное расстояние для ОЦК решетки.

Задание 2

Найти отношение V/b^3 , где V – объем, занимаемый одним атомом, b – кратчайшее межатомное расстояние для ГЦК решетки.

Задание 3

Найти отношение V/b^3 , где V – объем, занимаемый одним атомом, b – кратчайшее межатомное расстояние для ГПУ решетки с плотной упаковкой (с отношением осей $c/a = \sqrt{\frac{8}{3}} = 1,633$).

Задание 4

Рассчитать плотность энергии пластической деформации твердого тела, если при деформации плотность дислокаций оказалась 10^{12} см⁻². Считать $G=10^{10}$ Па, $b=0,15$ нм. Сравнить с плотностью энергии вакансий при их максимальной концентрации – 10^{-3} .

Задание 5

Считая предел прочности - $G/100$, рассчитать максимальную плотность дислокаций.

Задание 6

Механизм упрочнения при обходе частиц дислокациями $\tau_{кр}=Gb/l$, (l – расстояние м/у частицами). Рассчитать упрочнение при максимальной плотности дислокаций,

Задание 7

Механизм упрочнения при обходе частиц дислокациями $\tau_{кр}=Gb/l$, (l – расстояние м/у частицами). Рассчитать зависимости упрочнения от плотности дисперсных выделений.

Задание 8

Найти расстояние (в единицах межатомного расстояния) между примесями в химически (99,99%) и технически (99,9%) чистом железе. Полагая, что упрочнение при деформации определяется источниками Франка-Рида, определить отношение величин упрочнения в химически и технически чистом железе.

Контрольная работа 4 - Деформация поликристалла, типовые задания:

Задание 1

Рассчитать плотность энергии границ, полагая $d=10$ мкм, $G=10^{10}$ Па, $b=0,15$ нм. Сравнить с плотностью энергии вакансий и дислокаций при их максимальной концентрации.

Задание 2

Какое время нагружения t позволяет избежать размножение дислокаций при их плотности 10^6 см⁻² и скорости 1 м/с?

Задание 3

Как меняются плотность ρ и объемный модуль упругости K свинца с давлением p при изотермическом сжатии, если постоянная Грюнайзена $\gamma=2,74$?

Задание 4

Выразить соотношение скоростей соударения образца металла с массивной плитой, необходимых для его плавления и кипения, через отношение температур плавления и кипения.

Задание 5

Какая работа совершается на единицу длины дислокации при ее сжатии до нерасщепленного состояния, если безразмерная энергия дефекта упаковки $\epsilon_{ду}$?

Задание 6

Если при скорости растяжения 10^{-4} с^{-1} в каждом зерне размером 1 мкм движется только одна дислокация, за какое время она достигнет границы?

Типовые вопросы для коллоквиума 2 - Вязко-хрупкий переход

1. Критерий Гриффитса.
2. Вязкость разрушения и ударная вязкость.
3. Вязко-хрупкий переход.
4. Хладостойкость сталей.
5. Коэффициент концентрации напряжений и критический коэффициент интенсивности напряжений.
6. Масштабный фактор.

Типовые вопросы для коллоквиума 2 - Деформация соединений

1. Деформация и ползучесть интерметаллидов и фаз внедрения.
2. Механические свойства аморфных металлов.
3. Модуль упругости двухфазной системы, вилка Хилла.
4. Деформация и напряжения от частиц фазы в двухфазной системе
5. Диаграммы деформации двухфазной системы.

Вопросы к зачету 1

1. Тензор дисторсии и деформации
2. Девиатор деформации
3. Тензор напряжений
4. Закон Гука.
5. Уравнение равновесия деформируемого тела.
6. Модули упругости, связь между модулями упругости.
7. Упругий гистерезис.
8. Магнитострикция, микропластичность
9. Эффект Снука.
10. Изменение модулей упругости с температурой.
11. Плавление, правило Линдемана.
12. Решеточная единица энергии.
13. Упругое поле дислокации

14. Тензор плотности дислокаций.
15. Дисклинации, когерентные межфазные границы.
16. Энергия и упругое поле дефектов в изотропной среде.
17. Диаграммы условных и истинных напряжений.
18. Энергия пластической деформации.
19. Модуль упрочнения.
20. Пластичные и хрупкие материалы. Диаграммы растяжения/сжатия пластичных и хрупких материалов.
21. Критерий устойчивости деформации.
22. Свободная энергия и флуктуации пластической деформации.
23. Структуры пластического течения материалов.

Вопросы к зачету 2

1. Кристаллы: вакансии, дислокации (краевая, винтовая), скорость переползания и скольжения, источник Франка-Рида.
2. Кристаллы: дефекты упаковки, границы зерен.
3. Системы скольжения ГПУ, ГЦК, ОЦК монокристаллов.
4. Геометрия скольжения. Закон Шмида.
5. Стереографический треугольник.
6. Механизмы и стадии упрочнения металлов.
7. Эффект Баушингера.
8. Сдвиговая деформация и стадии упрочнения ГЦК кристаллов.
9. Сдвиговая деформация кристаллов - ОЦК
10. Сдвиговая деформация ГПУ кристаллов.
11. Двойникование в гексагональных и кубических кристаллах.
12. Условия деформации металлов по механизмам дислокационному и двойникования.
13. Сдвиговые (мартенситные) полиморфные превращения.
14. Сверхупругость и память формы.
15. Деформация твердых растворов, эффект Портевена – Ле-Шателье.
16. Деформация упорядоченных твердых растворов. Сверхструктурные дислокации.
17. Упругая деформация поликристалла.
18. Упрочнение поликристалла соотношение Петча-Холла.
19. Диаграмма деформации поликристалла.
20. Системы скольжения - схемы Закса и Тэйлора.
21. Скорость деформации. Зуб текучести и полосы Людерса при быстрой деформации.

22. Ударная волна и пластическая волны деформации.
23. Микроструктура металлов при импульсной деформации.
24. Горячая деформация.
25. Деформация и напряжение рекристаллизации, статическая и динамическая рекристаллизация.
26. Сверхпластичность.
27. Стационарная ползучесть Дорна
28. Стационарная ползучесть Харпера-Дорна
29. Стационарная ползучесть Набарро-Херринга и Кобла.
30. Три стадии ползучести и карты механизмов деформации стационарной ползучести.
31. Третья стадия ползучести. Длительная прочность.
32. Ползучесть от внутренних сил.
33. Метод Работнова.

Вопросы к экзамену

1. Тензор дисторсии и деформации, девиатор деформации, тензор напряжений, закон Гука.
2. Уравнение равновесия деформируемого тела.
3. Модули упругости, связь между модулями упругости.
4. Упругий гистерезис. Неупругость: магнитоstriction, микропластичность, эффект Снука.
5. Изменение модулей упругости с температурой.
6. Плавление, правило Линдемана. Решеточная единица энергии.
7. Упругое поле дислокации Тензор плотности дислокаций.
8. Дисклинации, когерентные межфазные границы.
9. Энергия и упругое поле дефектов в изотропной среде.
10. Диаграммы условных и истинных напряжений.
11. Энергия пластической деформации. Модуль упрочнения.
12. Пластичные и хрупкие материалы. Диаграммы растяжения/сжатия пластичных и хрупких материалов.
13. Критерий устойчивости деформации. Свободная энергия и флуктуации пластической деформации. Структуры пластического течения материалов.
14. Кристаллы: вакансии, дислокации (краевая, винтовая), скорость переползания и скольжения, источник Франка-Рида.
15. Кристаллы: дефекты упаковки, границы зерен.
16. Системы скольжения ГПУ, ГЦК, ОЦК монокристаллов.

17. Геометрия скольжения. Закон Шмида. Стереографический треугольник.
18. Механизмы и стадии упрочнения металлов. Эффект Баушингера.
19. Сдвиговая деформация и стадии упрочнения ГЦК кристаллов.
20. Сдвиговая деформация кристаллов - ОЦК
21. Сдвиговая деформация ГПУ кристаллов.
22. Двойникование в гексагональных и кубических кристаллах.
23. Условия деформации металлов по механизмам дислокационному и двойникования.
24. Сдвиговые (мартенситные) полиморфные превращения. Сверхупругость и память формы.
25. Деформация твердых растворов, эффект Портевена – Ле-Шателье.
26. Деформация упорядоченных твердых растворов. Сверхструктурные дислокации.
27. Упругая деформация поликристалла.
28. Упрочнение поликристалла соотношение Петча-Холла.
29. Диаграмма деформации поликристалла. Системы скольжения - схемы Закса и Тэйлора.
30. Скорость деформации. Зуб текучести и полосы Людерса при быстрой деформации.
31. Ударная волна и пластическая волны деформации. Микроструктура металлов при импульсной деформации.
32. Горячая деформация. Деформация и напряжение рекристаллизации, статическая и динамическая рекристаллизация.
33. Сверхпластичность.
34. Стационарная ползучесть Дорна, Харпера-Дорна, Набарро-Херринга и Кобла.
35. Три стадии ползучести и карты механизмов деформации стационарной ползучести.
36. Третья стадия ползучести. Длительная прочность.
37. Ползучесть от внутренних сил. Метод Работнова.
38. Вязко-хрупкое разрушение, критерий Гриффитса.
39. Вязкость разрушения и ударная вязкость.
40. Механизмы вязко-хрупкого перехода характера разрушения.
41. Хладостойкость сталей.
42. Деформация и ползучесть интерметаллидов и фаз внедрения.
43. Механические свойства аморфных металлов.

44. Модуль упругости двухфазной системы, вилка Хилла.
45. Деформация и напряжения от частиц фазы в двухфазной системе
46. Диаграммы деформации двухфазной системы.

Литература

а) основная учебная литература:

1. Зуев Л.Б., Данилов В.И. Физические основы прочности материалов: Учебное пособие / Зуев Л.Б., Данилов В.И. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2013.- 376 с.
2. Реслер И., Хардерс Х., Беккер М. Механическое поведение конструкционных материалов. Пер.в нем. Учебное пособие / Реслер И., Хардерс Х., Беккер М. - Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011.- 504 с.
3. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц Теоретическая физика т.7. Теория упругости, М.: Наука, 1987, 248 с.
4. М.А.Штремель Прочность сплавов Часть 2. Учебник для ВУЗов. М.: МИСиС, 1997, 527 с.

б) дополнительная учебная литература:

1. Чернышева Т.А. Литые дисперсно-упрочненные алюмоматричные композиционные материалы: изготовление, свойства, применение / Чернышева Т.А., Курганова Ю.А., Кобелева Л.И., Болотова Л.К. – Ульяновск: УлГТУ, 2012.- 295 с.
2. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / Под ред. В. Э. Вильдемана. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 204 с.
3. Б. Г. Лившиц. Металлография М: Металлургия, 1971, 422 с.
4. Физическое материаловедение. Учебник для вузов в 6 томах. Под ред. Б.А.Калина. М.: МИФИ, 2007.
5. В.Г.Малынкин. Лабораторный практикум по курсу “Материаловедение”. Обнинск. 1993.

ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Цель изучения дисциплины:

освоение закономерностей формирования микроструктуры при образовании металлических фаз в условиях различных внешних воздействий, современных представлений о связи между составом

и структурой материалов, их физико-механическими свойствами; освоение принципов выбора оптимальных режимов термической, механико-термической обработки и других технологических приемов для достижения оптимального комплекса эксплуатационных свойств.

Содержание дисциплины, структурированное по разделам (темам)

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
Название раздела		
1	Атомно-кристаллическое строение твердых тел	<p>Особенности структуры и свойств металлов переходных групп. Полиморфизм. Особенности кристаллических структур В-элементов II-V групп. Правило “8-N”. Атомно-кристаллическая структура твердых растворов. Прогноз растворимости, термодинамика образования твердых растворов. Теория ограниченной растворимости элементов II-V групп в металлах группы меди.</p> <p>Упорядочение в твердых растворах. Температурная зависимость порядка. Типы сверхструктур, антифазные границы. Ближний порядок в твердых растворах. К-состояние.</p> <p>Металлические соединения. Концентрационный фактор электронной концентрации и его проявление в фазах Юм-Розери и в соединениях В-элементов. Принцип плотной упаковки и его реализация в структуре. Многогранники Франка-Каспера и плоские атомные сетки в описании структур металлических соединений. Фазы Лавеса и родственные им соединения; сигма- и сигмаподобные фазы. Соединения переходных металлов с металлоидами (никель-арсенидный тип фазы внедрения, сложные карбиды и бориды,</p>

		сложные оксиды и оксидулаты).
2	Основные принципы разработки материалов заданными свойствами	Метод создания материалов. Выбор основы сплава. Выбор легирующих элементов: принципы и подходы физики твердого тела и физико – химического анализа, классификация легирующих элементов по влиянию на механические свойства основы, обеспечению требуемой технологичности материалов и их термообработки. Принципы выбора легирующего комплекса.
3	Фазовые превращения в твердом состоянии	Общая характеристика и классификация фазовых превращений. Термодинамика фазовых превращений в твердом состоянии и вопросы зарождения новой фазы. Роль энергии упругой деформации и межфазной поверхностной энергии в формировании микроструктуры. Процессы роста. Аллотропические (бездиффузионные) фазовые превращения. Сдвиговое и “нормальное” превращение в сплавах железа; массивные превращения. Видманштеттовы структуры. Кристаллические (феноменологические) теории мартенситных превращений. Субструктура мартенситных кристаллов в сплавах на основе железа. Обратимые (термоупругое и нетермоупругое) мартенситные превращения. Механические эффекты при мартенситных превращениях (пластичность, наведенная деформацией; эффект памяти формы; псевдоупругость). Аллотропические превращения в сплавах на основе Ti; образование ω-фаз, особенности их кристаллографии. Аллотропические превращения в сплавах урана. Фазовые превращения, контролируемые диффузией. Распад пересыщенных твердых растворов. Классификация процессов распада. Непрерывное (гомогенное)

		<p>выделение из пересыщенных твердых растворов. Прерывистый (ячеистый) распад и эвтектоидное превращение. Спинодальное расслоение. Модулированные структуры. Термодинамика и кинетика процессов. Влияние дефектности структуры и пластической деформации. Растворение выделений. Возврат при старении. Коалесценция выделений. Фазовые превращения при облучении.</p>
4	Специальные стали и сплавы	<p>Термомеханическая и химико-термическая обработка (ТМО и ХТО). Особенности образования структуры при ТМО. Общие закономерности процессов ХТО. Цементация стали. Термообработка после цементации. Структура и свойства цементованных сталей. Азотирование, цианирование и силицирование стали и другие виды ХТО. Структура и свойства диффузионных слоев.</p> <p>Влияние легирующих элементов на фазовый состав и превращения в стали. Классификация легированных сталей. Высокопрочные, износостойкие, жаростойкие, жаропрочные, коррозионностойкие, холодностойкие, быстрорежущие, штамповые и другие стали. Состав, структура и термическая обработка. Жаропрочные, жаростойкие и коррозионностойкие сплавы на основе никеля. Сплавы на основе кобальта. Тугоплавкие металлы, их свойства и место в современной технике. Титан и его сплавы. Цирконий и его сплавы. Влияние легирующих элементов на структуры и свойства титана и циркония. Легкие металлы и сплавы.</p>
5	Материаловедение прецизионных сплавов	<p>Место прецизионных сплавов в современной технике. Магнитомягкие материалы. Классификация магнитомягких материалов.</p>

	<p>Роль растворимых примесей и концентрационных неоднородностей. Роль упорядочения в твердых растворах. Влияние текстуры на магнитную проницаемость, коэрцитивную силу и прямоугольность петли гистерезиса.</p> <p>Электротехническая сталь и технически чистое железо. Влияние термообработки, легирующих элементов и примесей на ее магнитные свойства. Железо-никелевые сплавы (пермаллой). Сплавы железо-никель-кобальт. Магнитотвердые материалы.</p> <p>Сплавы для изготовления прецизионных сопротивлений (манганин, константан), их структура, термообработка, основные свойства и применение. Жаростойкие сплавы для электронагревателей и нагрузочных сопротивлений. Основные требования и классификация. Термическая обработка и особенности структурно-фазовых превращений в сплавах.</p>
--	---

Контрольная работа - типовые вопросы и задания:

Вариант 1

На примере диаграммы с ограниченной растворимостью элемента Si в Al определить сплав, обладающей наибольшей жидкотекучестью и описать физические причины этого явления.

Вариант 2

На примере диаграммы с ограниченной растворимостью элемента В в А определить сплав, обладающей наибольшей стойкостью к коррозонному растрескиванию и описать физические причины этого явления.

Вариант 3

На примере диаграммы с ограниченной растворимостью элемента В в А определить сплав, обладающей наибольшей/наименьшей склонностью к порообразованию и описать физические причины этого явления.

Вариант 4

На примере диаграммы с ограниченной растворимостью элемента В в А определить сплав, для которого термическая обработка будет наиболее эффективна.

Темы рефератов

Тема: Фазы в сплавах

1. Кристаллическая структура твердых растворов.
2. Упорядоченные твердые растворы.
3. Электронные соединения (Фазы Юм-Розери).
4. Фазы внедрения.
5. Интерметаллидные соединения типа сигма-фаз.
6. Фазы Лавеса.
7. Никель арсенидные фазы.

Тема: Фазовые превращения в твердом состоянии

1. Фазовые превращения типа зарождение-рост.
2. Спинодальный распад.
3. Теория мартенситных превращений.
4. Механические эффекты нетермоупругих мартенситных превращений.
5. Механические эффекты термоупругих мартенситных превращений.
6. Превращения в твердом состоянии кристаллографически подобные мартенситным.

Вопросы к экзамену

1. Атомно-кристаллическая структура твердых растворов и термодинамика их образования.
2. Прогноз взаимной растворимости компонентов и диаграммы состояния системы.
3. Упорядоченные твердые растворы. Термодинамика процесса упорядочения.
4. Ближний порядок в твердых растворах. К-состояние.
5. Электронные соединения (Фазы Юм-Розери).
6. Фазы Лавеса.
7. Фазы внедрения
8. Физико-химические основы создания структурно-стабильных сплавов.
9. Принципы выбора основы сплава.
10. Принципы выбора легирующих элементов

11. Классификация фазовых превращений в твердом состоянии.
12. Гомогенное превращение типа «зарождение – рост». Роль энергии упругой деформации и межфазовой (поверхностной) энергии
13. Гетерогенное превращение в твердом состоянии. Роль дефектов кристаллического строения.
14. Нормальное бездиффузионное фазовое превращение.
15. Бездиффузионное массивное превращение и его термодинамическое обоснование.
16. Мартенситное превращение и его обратимость.
17. Условия реализации нормального бездиффузионного и мартенситного превращений.
18. Феноменологическая теория мартенситных превращений.
19. Механизмы мартенситных превращений и их кинетика.
20. Микроструктура и субструктура сплавов, закаленных на мартенсит.
21. Влияние упругой и пластической деформации на кинетику мартенситных превращений.
22. Термоупругое мартенситное превращение. Использование эффекта термоупругости при создании «умных сплавов».
23. Эффект запоминания формы и сверхупругость.
24. Нетермоупругое мартенситное превращение. Применение этого явления на практике.
25. Мартенситоподобные фазовые превращения.
26. Диффузионные фазовые превращения.
27. Непрерывный распад пересыщенных твердых растворов.
28. Прерывистый (двухфазный) распад твердых растворов.
29. Коллоидное равновесие и коалесценция частиц при выделении.
30. Растворение частиц второй фазы и его механизмы.
31. Спинодальный распад пересыщенных твердых растворов. Условия реализации этого процесса.
32. Рекристаллизационный отжиг, назначение и режимы отжига. Изменение структуры и свойств холоднодеформированного металла при нагреве.
33. Композиты, армированные частицами.
34. Коррозионностойкие стали. Состав, структура и термическая обработка. Межкристаллитное растрескивание и стабилизация сталей.
35. Волокнистые и слоистые композиты.

36. Жаростойкость. Состав, структура и термическая обработка жаростойких сталей.
37. Реостатные сплавы и сплавы для нагревательных элементов.
38. Жаропрочность. Состав, структура и термическая обработка жаропрочных сталей.
39. Классификация видов термической обработки сталей. Виды т/о не связанные с фазовыми превращениями.
40. Перлитное превращение в стали. Диаграммы изотермического распада аустенита.
41. Электротехническая сталь. Влияние примесей, т/о на ее магнитные свойства.
42. Высокопрочные стали. Состав, структура и термическая обработка. Твердые сплавы.
43. Влияние химических элементов на полиморфизм и превращения в железе.
44. Инструментальные стали с пониженной прокаливаемостью. Состав, структура и термическая обработка.
45. Инвары и элинвары. Состав, структура, области применения.
46. Быстрорежущие стали. Состав, структура и термическая обработка.
47. Возврат и рекристаллизация.
48. Инструментальные стали с повышенной прокаливаемостью. Состав, структура и термическая обработка.
49. Основные принципы создания магнитотвердых и магнитомягких материалов.
50. Тугоплавкие металлы.
51. Износостойкие стали. Состав, структура и термическая обработка.
52. Холодостойкие стали. Состав, структура и термическая обработка.
53. Массивные превращения.

Литература

а) основная учебная литература:

1. Физическое материаловедение: Учебник для ВУЗОВ. В 6 т./Под общей ред.Б,А,Калина.- М.:МИФИ, 2012.

2. Колачев Б.А., Ильин А.А., Егорова Ю.Б. Физическое материаловедение. – М.: ИЦ МАТИ, 2007, 458 с.
3. Д.К. Белашенко. Компьютерное моделирование жидких аморфных веществ. М.: МИСиС, 2005. – 480с.
4. В.Г. Вакс. Межатомные взаимодействия и связь в твердых телах. М.: Издат, 2002. – 256с.

б) дополнительная литература

1. Физическое материаловедение. В 3-х томах под ред. Р.Кана и П.Хаазена М.: Металлургия, 1987. – 624 с. (3 экз. в библи.).
2. Мартин Дж., Доерти Р. Стабильность микроструктуры металлических систем / Пер.с англ. Под ред. В.Н.Быкова. М.: Атомиздат, 1978. - 280 с.
3. Высокоскоростное затвердевание расплава (теория, технология и материалы) / Васильев В.А., Митин Б.С. и др. / под ред. Б.С.Митина. М.: СП ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ, 1998. – 400 с.
4. Трушин Ю.В. Физическое материаловедение. – СПб.: Наука, 2000. – 286 с (10 экз. в библи.).
5. Уманский Я.С., Скаков Ю.А. Физика металлов. М.: Атомиздат, 1978, 352 с.
6. Урсу И. Физика и технология ядерных материалов.- М.:Энергоатомиздат.1988.- 480

ОБЩЕЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВ

Цель изучения дисциплины:

освоение физико-химических основ технологических процессов получения материалов различного типа и назначения с учетом современных представлений о взаимосвязи структурно-фазового состояния и свойств твердых тел, методов получения материалов с различной морфологией или в различном структурно-фазовом состоянии, влияния параметров процессов на структуру и свойства этих материалов, выбора оптимальных технологических приемов, в том числе с помощью радиационно-пучковых технологий, для достижения требуемого комплекса свойств.

Содержание дисциплины, структурированное по разделам (темам)

1 семестр

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
1.	Кристаллизация металлических материалов	
1.1.	Кинетика кристаллизации	Структура расплавленных металлов. Функция радиального распределения. Теория гомогенного и гетерогенного образования зародышей. Кинетика кристаллизации. Кинетика движения межфазной границы (теория роста кристаллов). Концентрационное переохлаждение. Перераспределение примесей и морфология поверхности раздела кристалл-расплав. Кристаллизация двухфазных сплавов
1.2.	Управление структурой при кристаллизации	Управление структурой при кристаллизации. Модифицирование. Нормальная кристаллизация. Зонная плавка. Основные методы получения и типы металлических состояний, возникающих в процессе быстрой кристаллизации. Критерии (термодинамический, морфологический и др.) образования быстрозакаленных сплавов.
1.3	Структура металлических стекол	Критерии стеклования. Структура металлических стекол. Свободный объем, релаксация, особенности диффузии в металлических стеклах. Термическая стабильность металлических стекол.
2.	Дефекты кристаллического строения	
2.1.	Точечные дефекты	Дефекты решетки - их поле и энергия. Классификация дефектов решетки. Точечные дефекты. Вакансия. Ее энергия и энтропия. Равновесная концентрация вакансий. Подвижность вакансий и самодиффузия. Происхождение и сток неравновесных вакансий. Взаимодействие вакансий с

		<p>примесью.</p> <p>Прямые и косвенные методы измерения концентрации и подвижности вакансий.</p> <p>Группы вакансий и межузельные атомы. Их конфигурация и подвижность.</p> <p>Рождение точечных дефектов при облучении.</p>
2.2.	Линейные дефекты (дислокации)	<p>Дислокации. Определение, контур и вектор Бюргерса, его знак. Краевые и винтовые дислокации. Геометрические свойства дислокаций: непрерывность, ветвление; дислокационные реакции; аннигиляция. Поле напряжений дислокации. Ядро дислокации. Энергия дислокации. Системы скольжения в различных решетках; базисный тетраэдр Томпсона. Действие внешних сил на дислокацию. Кривизна дислокации. Потеря устойчивости и размножение дислокаций от источника. Упругое взаимодействие параллельных и скрещивающихся дислокаций; дислокационный диполь. Поперечное скольжение; двойное поперечное скольжение; ступеньки. Пересечение дислокаций и образование ступенек. Сток вакансий на дислокацию. Переползание. Неконсервативное движение дислокаций со ступеньками.</p> <p>Взаимодействие дислокации с атомом примеси. Атмосфера Коттрелла. Подвижность дислокаций.</p>
2.3	Взаимодействие дислокаций	<p>Упругое взаимодействие параллельных и скрещивающихся дислокаций; дислокационный диполь. Поперечное скольжение; двойное поперечное скольжение; ступеньки. Пересечение дислокаций и образование ступенек. Сток вакансий на дислокацию. Переползание. Неконсервативное движение дислокаций со ступеньками.</p>

		Взаимодействие дислокации с атомом примеси. Атмосфера Котрелла. Подвижность дислокаций.
2.4	Поверхностные дефекты кристаллического строения	Расщепление дислокаций. Дефекты упаковки и их энергия. Расщепление дислокаций под напряжением. Влияние энергии дефекта упаковки на поперечное скольжение и переползание дислокаций. Реакции между расщепленными дислокациями; сидячие дислокации.

2 семестр

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
3.	Технологии материалов	
3.1.	Понятие технологии, её место и значение в научно-техническом прогрессе	Национальные критические технологии. Технологии двойного назначения. Общая характеристика технологии получения материалов; традиционные и «высокие» технологии
3.2	Технология получения чугуна	Производство чугуна и другого металлизированного сырья. Общая характеристика устройства доменной печи и состав сырьевых материалов. Физико-химические процессы при получении чугуна в доменных печах и общая характеристика восстановителей. Продукты доменного производства и их применение. Технология прямого восстановления железа из руд.
3.3	Технологии получения стали	Производство стали. Физико-химические процессы при выплавке стали в кислородных конверторах, мартеновских и электропечах. Технология разлива и формирования слитков. Строение слитков спокойной, полуспокойной и кипящей стали. Дефекты стального слитка. Вредные примеси в стали, источники их поступления

		и влияние на физико-химические свойства. Методы повышения качества стали (модифицирование, микролегирование, ЭСП, ВВП, ЭЛП и ПДП).
4.	Металлургия цветных металлов	
4.1.	Металлургия меди	Физико-механические основы получения черновой меди из сульфидных руд. Плавка руд и концентратов на штейн. Конвертирование медных штейнов. Рафинирование меди.
4.2.	Металлургия никеля	Выплавка штейна и файнштейна из оксидных и сульфидных никелевых руд. Рафинирование черного никеля.
4.3	Металлургия алюминия	Физико-химические основы получения глинозема выщелачиванием. Технология получения алюминия электролизом глинозема. Рафинирование черного алюминия вторичным электролизом, хлорированием и т.д
4.4	Металлургия титана	Физико-химические основы технологических процессов получения титана магниитермическим методом. Вакуумный переплав титановой губки. Рафинирование титана методом транспортных реакций.
5	Металлургия тугоплавких металлов	Роль тугоплавких элементов в современной технике, их химические, физико-механические и технологические свойства. Физико-химические основы восстановления тугоплавких металлов из оксидов водородом, кальцием. Восстановление тугоплавких металлов из галоидных соединений. Электрохимические методы получения тугоплавких металлов. Получение чистых тугоплавких металлов. Физико-химические основы плавки тугоплавких металлов в вакууме (ЭЛП, ВДП). Получение тугоплавких металлов методом транспортных реакций.

6	Получение литейных заготовок	Физические основы литейного производства. Литейные свойства сплавов. Основные этапы образования отливок: заполнение формы расплавом, затвердевание, охлаждение. Влияние теплового, химического и механического взаимодействия металла и литейной формы на возникновение дефектов в отливках. Внутренние напряжения в отливках. Одновременная и направленная кристаллизация. Принципы управления структурой отливок и контроль их качества. Специальные способы литья.
7	Производство заготовок давлением	Классификация методов обработки материалов давлением. Физико-механические основы прокатки, прессования, волочения. Сравнительный анализ структуры и свойств заготовок, полученных различными способами. Влияние температуры нагрева и скорости деформации. Основные группы профилей и особенности их получения. Сущность процессовковки и объемной штамповки. Структура поковок и штамповок. Горячая и холодная штамповка. Применение. Новые и специальные методы обработки металлов давлением (обработка в состоянии сверхпластичности, гидроэкструзия, накатывание рифлений, резьб и т.д.).
8	Получение материалов методом порошковой металлургии	Виды и свойства металлокерамических материалов. Схема технологического процесса порошковой металлургии. Смешивание порошков. Холодное и горячее прессование порошков. Спекание прессованных заготовок. Отделка и обработка спеченных заготовок. Дефекты и контроль качества изделий.
9	Основы обработки	Физико-механические основы обработки металлов резанием, режимы резания,

	<p>металлов резанием</p>	<p>геометрия срезанного слоя металла, силы в процессе резания. Физические явления, сопровождающие процесс резания. Износ и стойкость режущего инструмента. Инструментальные материалы.</p> <p>Основные способы обработки резанием: точение, фрезерование, сверление, строгание, протяжка и области их применения. Инструмент и оборудование. Показатели качества обработки резанием и его контроль. Методы повышения качества обработки.</p> <p>Обработка поверхности деталей абразивным инструментом. Физическая сущность шлифования и основные схемы этого процесса. Сведения об абразивном инструменте. Самозатачиваемость. Технологические требования к конструкциям деталей, обрабатываемым на шлифовальных станках.</p> <p>Отделочные операции. Понятие о методах отделки поверхностей притиркой, абразивно-жидкостной обработкой, обработкой абразивными методами, хонингованием, суперфинишированием.</p> <p>Объемное и поверхностное упрочнение пластической деформацией (наклеп дробью, обкатывание роликом и т.д.). Повышение износо- и коррозионной стойкости деталей напылением и наплавкой поверхностей.</p>
--	---------------------------------	--

3 семестр

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
10.	Основы технологии сварки	
10.1.	Физические основы сварки плавлением	Сварка плавлением. Виды сварки. Физическая сущность и схемы процессов, протекающих при сварке. Особенности кристаллизации сварочной

		<p>ванны.</p> <p>Свариваемость металлов и сплавов. Понятие о свариваемости. Классификация материалов по их свариваемости. Сварка углеродистых, низколегированных конструкционных сталей и высоколегированных нержавеющей и жаропрочных сталей различного класса.</p>
10.2	Структура и свойства сварных соединений	<p>Структура и свойства сварных соединений. Возникновение напряжений и деформации при сварке, их зависимость от теплового режима сварки и химического состава металла. Способы минимизации напряжений и деформаций конструктивными и технологическими приемами. Дефекты сварных соединений и контроль их качества. Области применения различных видов сварки.</p> <p>Пайка металлов и сплавов. Сущность процесса спайки. Типы паяных соединений и их свойства. Пайка твердыми и мягкими припоями. Области применения пайки.</p>
10.3	Сварные соединения сталей, разнородных по составу и структурному классу	<p>Сварка низко- и среднелегированных закаливающихся сталей; сварка ферритных и полуферритных сталей; сварка перлитных и аустенитных сталей. Принципы выбора присадочного материала. Особенности сварки чугунов, алюминиевых, медных и титановых сплавов. Сварка тугоплавких металлов (Mo, Nb, Zr, Ti).</p>
11	Технологии нанесения металлических покрытий	
11.1	Процессы и операции нанесения металлических покрытий из расплавов	<p>Общая схема процесса; нанесение покрытий окунанием в расплавленные среды, лужение, цинкование, серебрение; нанесение покрытий оплавлением порошковых композиций; формирование покрытий наплавкой</p>

		концентрированными источниками энергии (электрическая дуга, газовое пламя, плазма, электронные пучки).
11.2.	Процессы операции газотермического напыления покрытий из порошков металлов	и Процессы и операции газотермического напыления покрытий из порошков металлов: методы напыления и их классификация, обобщенная схема процесса, способы и особенности плазменного, дуговой и высокочастотной металлизации, особенности напыления чистых металлов, композиционных покрытий.
12	Электрофизические и электрохимические методы обработки поверхностей деталей	Размерная обработка электрофизическими и электрохимическими методами. Физическая сущность электроэрозионных методов обработки: электроискрового, электроимпульсного, анодномеханического и электроконтактного. Эффективность этих методов, технологические возможности и области применения. Электронный метод обработки. Метод обработки плазменной струей. Электрохимические методы обработки: прошивание отверстий, электроабразивная и электроалмазная размерные обработки.

Контрольная работа 1 (Кристаллизация металлических материалов) - типовые задания (вопросы):

Вариант 1

Задача 1. Рассчитать критическую величину кубического зародыша, кристаллизующегося из расплава железа, при переохлаждениях на 10°C и 100°C, если скрытая теплота плавления $Q=15 \cdot 10^9$ Дж/м³, а поверхностная энергия $\alpha=0,204$ Дж/м².

Задача 2. Как изменится энергия в процессе сфероидизации металлического стержня длиной 100 мм и диаметром 0,02 мм, если удельная поверхностная энергия равна 0,3 Дж/м².

Вариант 2

Задача 1. Рассчитать вероятности образования равновесных зародышей жидкой фазы из водяного пара при разных степенях его пересыщения и 0°C принимая постоянную $S=1$, для воды удельная поверхностная энергия равна $0,072 \text{ Дж/м}^2$, $M=18$, $\rho=1000 \text{ кг/м}^3$.

Задача 2. За какое время закристаллизуется 30% жидкого металла, если при данном переохлаждении линейная скорость кристаллизации равна $0,5 \text{ мм/с}$, а скорость зародышеобразования равна 10^3 с^{-1} .

Вариант 3

Задача 1. Определить предельную деформацию зародыша, когда еще возможна ориентированная кристаллизация для NaCl при кристаллизации на галените: $c_{11}=4,84 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$, $c_{12}=1,37 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$, $\alpha=0,15 \text{ Дж/м}^2$, $a=0,56 \text{ нм}$.

Задача 2. Вывести уравнение, описывающее распределение растворенного вещества с коэффициентом сегрегации k в слитке длиной L после прохода зоны длиной l с постоянной скоростью, если известно, что начальное распределение вещества в слитке было однородным с концентрацией C_0 . Какова средняя степень очистки при первых 10 зонных проходах для вещества с $k=0,1$? Принять, что $L > 11l$.

Вариант 4

Задача 1. Кристалл некоего химического элемента выращен из расплава с постоянной скоростью $4,1 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$. Коэффициент диффузии вещества в расплаве равен $10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$, а коэффициент сегрегации равен $0,4$. Исходная концентрация вещества в расплаве равна $0,5 \text{ ат.}\%$, а наклон линии ликвидуса для системы раствор-растворитель равен $4^\circ\text{C/ат.}\%$. В расплаве существует постоянный температурный градиент, равный 10°C/мм , а толщина граничного диффузионного слоя равна $0,1 \text{ мм}$. Какая доля расплава должна затвердеть, чтобы в первый раз появилась зона диффузионного переохлаждения?

Задача 2. Определить распределение примеси, т.е. Зависимость концентрации примеси C от координаты x в образце, охлаждаемом с одного конца, если в начальном состоянии образец был расплавлен целиком и имел концентрацию примеси C_0 . Предполагается, что диффузия примеси в твердой фазе отсутствует, а в жидкой фазе происходит полностью. Длина образца d , коэффициент распределения равен $k=C/C_1$, где C и C_1 - концентрации примеси в твердом и жидком состояниях соответственно. Начертить график $C(x)$ при $k=0,01$; 1 ; 10 .

Вариант 5

Задача 1. Два элемента А и В образуют идеальную бинарную систему твердое тело-жидкость. Элементы характеризуются значениями скрытой теплоты плавления 2511 и 837 Дж*г/ат и температурами затвердевания 1200К и 500К соответственно. Кристалл выращен из раствора, обогащенного элементом А, с температурой на равновесной поверхности раздела, равной 1175К. Каковы состав расплава и коэффициент сегрегации элемента В для этого состава?

Задача 2. Чему равна температура разделения линий ликвидуса и солидуса для состава, полученного в задаче 1.

Вариант 5

Задача 1. В образце в твердом состоянии равномерно распределена примесь с концентрацией C_0 . Как распределяется примесь по образцу после одного прохода расплавленной зоны длиной l ?

Задача 2. Как распределяется примесь в образце после двух проходов расплавленной зоны?

Вариант 6

Задача 1. Найти предельное распределение концентрации примеси после большого числа проходов расплавленной зоны.

Задача 2. Оценить количество проходов, после которых концентрация примеси в начале образца мало отличается от предельной.

Вариант 7

Задача 1. Определить распределение концентрации примеси после одного прохода по первоначально чистому образцу, если примесь в количестве s_0 была внесена на переднем конце образца перед началом плавки.

Задача 2. Вывести уравнение для определения критической величины зародыша сферической формы при гомогенном зарождении из расплава.

Вариант 8

Задача 1. Необходимо с помощью зонного плавления ввести примесь в образец постоянного сечения (примесь в количестве s_0 была внесена на переднем конце образца перед началом плавки). Изменяя длину зоны l , добиться, чтобы примесь равномерно распределилась по образцу. Определить закон изменения длины зоны l .

Задача 2. Полиморфное превращение $\alpha \rightarrow \beta$ при температуре 1025°C. Энергия поверхности раздела α и β — фаз составляет 0,5

Дж/м², а величина ΔF_v для превращения $\alpha \rightarrow \beta$ равна $-4,185 \cdot 10^{-6}$ Дж/м³ при 1000°C и $-2,0925 \cdot 10^{-5}$ Дж/м³ при 900°C.

а) определите критический радиус $r_{\text{крит}}$ образования зародыша β -фазы из α -фазы при 1000 и 900°C, б) вычислите критическую энергию образования зародыша $\Delta F_{\text{крит}}$, которая должна быть сообщена материалу для начала реакции при этих значениях температуры.

Контрольная работа 2 (Дефекты кристаллического строения) - типовые задания (вопросы):

Вариант 1

Задача 1. При температуре вблизи точки плавления равновесная концентрация вакансий в магнии равна $7,2 \cdot 10^{-4}$. Приблизительно оцените равновесную концентрацию вакансий в магнии при комнатной температуре.

Задача 2. Покажите с помощью построения, что вектор Бюргерса прямолинейной цепочки межузельных атомов, расположенной в направлении $\langle 100 \rangle$ кубической решетки, равен нулю.

Вариант 2

Задача 1. Приблизительно оцените энергию образования вакансии в г. ц. к. металле, если экспериментально определенная равновесная концентрация вакансий при 927 °C равна $1 \cdot 10^{-5}$.

Задача 2. В образце алюминия после резкого охлаждения в воде появились дислокационные петли, число которых равно $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а средний диаметр 30 нм. Оцените концентрацию вакансий при температуре, с которой охлаждался образец.

Вариант 3

Задача 1. Пренебрегая колебательной энтропией образования вакансий, определите их равновесную концентрацию C_v в серебре в интервале температур 200 - 1200 К с шагом 200 К. Постройте график $C_v - T$.

Задача 2. В медной фольге после ядерного облучения появились дислокационные петли, число которых составило 10^{15} см^{-3} , а средний диаметр равен 40 нм. Оцените концентрацию возникающих при облучении меди точечных дефектов, конденсация которых привела к образованию дислокационных петель.

Вариант 4

Задача 1. Оцените, на сколько порядков изменится равновесная концентрация вакансий в золоте при повышении температуры с 600 до 1000 °С, если при 600 °С эта концентрация равна $9,1 \cdot 10^{-6}$.

Задача 2. Оцените (в километрах) суммарную длину всех дислокаций в 1 см^3 отожженного металла с плотностью дислокаций 10^8 см^{-2} .

Вариант 5

Задача 1. Равновесная концентрация вакансий в г. ц. к. металле при комнатной температуре равна 10^{20} . Приблизительно оцените, на сколько порядков концентрация закалочных вакансий при резком охлаждении с 927 °С будет больше равновесной их концентрации при комнатной температуре.

Задача 2. Покажите, что сила взаимодействия параллельных краевой и винтовой дислокаций равна нулю.

Вариант 6

Задача 1. Расположите элементы Al, Nb, Ni и Sn в ряд в порядке предположительного возрастания энергии образования вакансий. Дайте необходимые пояснения.

Задача 2. Изобразите дефект упаковки внедрения в г. п. решетке.

Вариант 7

Задача 1. Оцените средние расстояния между равновесными вакансиями в алюминии при 27 °С и между закалочными вакансиями при той же температуре после закалки с 627°С (при условии, что все высокотемпературные моновакансии «замораживаются» и распределены статистически равномерно).

Задача 2. Напишите в символах Томпсона возможные реакции расщепления дислокации с вектором Бюргерса DB на частичные дислокации Шокли и докажите, что эти реакции энергетически выгодны.

Вариант 8

Задача 1. Приняв энергию образования межузельного атома в меди равной 3 эВ, приблизительно оцените отношение числа вакансий и межузельных атомов в условиях термодинамического равновесия при комнатной температуре и 1000 °С.

Вариант 9

Задача 1 В опытах по параллельному измерению длины и периода решетки стержня из алюминия концентрация вакансий при 655 °С оказалась равной $4,9 \cdot 10^{-4}$, а при 620°С - $3,7 \cdot 10^{-4}$. Определите энергию и энтропию образования вакансий в алюминии

Задача 2. Напишите в символах Томпсона возможные реакции объединения дислокации Франка, находящейся в плоскости (111), с дислокациями Шокли и докажите, что эти реакции энергетически выгодны.

Темы рефератов (технологии в металлургии)

Раздел: Технологии материалов

1. Физико-химические основы получения чугунов и основные процессы, протекающие при доменной плавке.
2. Основные способы производства стали, их преимущества и недостатки.
3. Современные технологии получения сталей особо высокого качества.
4. Влияние примесей и легирующих элементов на структуру и свойства сталей.
5. Внедоменное получение железа.

Раздел: Металлургия цветных металлов

1. Пирометаллургический метод получения меди.
2. Щелочной способ получения алюминия.
3. Магнитотермический метод получения титана.
4. Получение титана высокой чистоты методом транспортных реакций.

Раздел: Металлургия тугоплавких металлов

1. Технология получения тугоплавких металлов VI подгруппы.
2. Особенности технологии получения тугоплавких металлов V подгруппы.

Темы комплексного домашнего задания (технологии в металлургии)

Получение литейных заготовок:

1. Принципы выбора рационального способа литья заготовки проектируемой детали.
2. Техничко-экономические показатели основных способов литья.
3. Литейные сплавы и их характеристика.
4. Дефекты литейных заготовок и методы их устранения.

Производство заготовок давлением:

1. Физико-механические основы обработки металлов давлением.
2. Технологический процесс прокатки и продукты прокатного производства.
3. Горячая и холодная объемная штамповка.

4. Основные операции и технологический процессковки.
Получение материалов методом порошковой металлургии:

1. Основные этапы технологии ПМ.
2. Продукты порошковой металлургии
3. Современные направления в ПМ.
4. Применение ПМ при получении материалов для реакторостроения.

Основы обработки металлов резанием:

1. Физико-механические основы обработки резанием.
2. Обработка основных поверхностей заготовок резанием
3. Методы отделочной и упрочняющей обработки.
4. Инструментальные материалы.

Комплект тестовых заданий к лабораторной работе 1

Тема: Изучение структуры и свойств сварных соединений заглушек и трубок теплообменника реактора ВВЭР-1000:

Вопрос № 1 Какова должна быть структура сварного шва на границе «заглушка-трубка теплообменника»?

- Чисто ферритной
- Чисто аустенитной
- *Аустенитно-ферритной с содержанием феррита в пределах 3-5%*
- Аустенитно-ферритной с содержанием феррита < 2 %
- Аустенитно-ферритной с содержанием феррита > 8 %

Вопрос № 2 Какие материалы используются для изготовления заглушек?

- Феррито-мартенситные стали.
- Аустенитные стали с карбидным упрочнением.
- Аустенитные стали с интерметаллидным упрочнением.
- *Аустенитные стали с упрочнением по типу твердого раствора.*
- Стали перлитного класса.

Тема: Изучение структуры и свойств сварных соединений «Ст.20-12Х18Н10Т», сваренных электродами из нержавеющей аустенитной стали:

Вопрос № 1 Какова структура металла зоны сплавления будет при сварке указанных выше сталей электродом Х25Н13?

- мартенситная
- *Изменяется от аустенитно-ферритного до аустенитного*

- феррито-мартенситная
- ферритная
- аустенитная

Вопрос № 2 Каковы принципы выбора состава электродов для сварки сталей с различной структурой ?

- *оценивается по диаграмме Шефлера*
- оценивается по диаграмме Fe-C
- оценивается по степени проплавления кромок свариваемого металла
- оценивается по скорости охлаждения сварочной ванны
- Оценивается по диаграмме Fe-Cr-Ni

Комплект тестовых заданий к лабораторной работе 2

Тема: Препарирование образцов для просвечивающей электронной микроскопии методом электролитического полирования:

Вопрос № 1 Основные преимущества метода

- высокая скорость утонения
- *отсутствие деформированного слоя в готовом образце*
- универсальность состава электролита
- низкие требования к рельефу поверхности исходного материала
- возможность применения стандартного оборудования

Вопрос № 2 Какой состав электролита используется при препарировании образцов из стали 0X18H10T

- 10% раствор щавелевой кислоты
- 4% раствор азотной кислоты в спирте
- 4% раствор азотной кислоты в воде
- *15% раствор хромового ангидрида в ортофосфорной кислоте*
- 15% раствор окиси хрома в ортофосфорной кислоте

Вопросы к зачету (кристаллизация и дефекты кристаллического строения)

1. Структура расплавленных металлов.
2. Дефекты решетки - их поле и энергия. Классификация дефектов решетки. Точечные дефекты. Вакансия. Ее энергия и энтропия.
3. Теория гомогенного образования зародышей из расплава.

4. Равновесная концентрация вакансий. Подвижность вакансий и самодиффузия. Происхождение и сток неравновесных вакансий. Взаимодействие вакансий с примесью
5. Теория гетерогенного образования зародышей из расплава.
6. Прямые и косвенные методы измерения концентрации и подвижности вакансий.
7. Атомная теория роста кристаллов.
8. Дислокации. Определение, контур и вектор Бюргера, его основные характеристики. Краевые и винтовые дислокации.
9. Нормальная кристаллизация из жидкого состояния.
10. Энергия дислокации. Упругое взаимодействие параллельных краевых дислокаций
11. Зонная плавка.
12. Полные и частичные дислокации. Энергетический критерий дислокационных реакций.
13. Морфология поверхности раздела «кристалл-расплав».
14. Дефекты упаковки и их энергия. Влияние энергии дефекта упаковки на поперечное скольжение и переползание дислокаций
15. Эвтектическая кристаллизация.
16. Полные дислокации в ГЦК решетке.
17. Кинетика кристаллизации из расплавов
18. Полные дислокации в ГП решетке.
19. Дислокации и рост несовершенных кристаллов.
20. Частичные дислокации в ГЦК и ГП решетках.
21. Влияние примесей на процесс кристаллизации.
22. Стандартный тетраэдр Топсона и описание основных дислокационных реакций в ГЦК решетке в его символах.
23. Стандартная бипирамида описание основных дислокационных реакций в ГП решетке в её символах.
24. Пересечение краевых дислокаций.
25. Кристаллизация на анизотропной подкладке. Эпитаксия.
26. Взаимодействие дислокаций.
27. Пересечение растянутых дислокаций.
28. Основные методы получения металлических стёкол (аморфных материалов).
29. Критерии получения металлических стёкол.

Вопросы к экзамену 1 (технологии в металлургии)

1. Национальные критические технологии. Технологии двойного назначения. Общая характеристика технологии получения материалов; традиционные и «высокие» технологии.
2. Производство чугуна и другого металлизированного сырья.
3. Технология прямого восстановления железа из руд.
4. Производство стали. Физико-химические процессы при выплавке стали в кислородных конверторах, мартеновских и электропечах.
5. Физико-механические основы получения меди.
6. Выплавка штейна и файнштейна из оксидных и сульфидных никелевых руд.
7. Технология получения алюминия.
8. Физико-химические основы технологических процессов получения титана.
9. Роль тугоплавких элементов в современной технике, их химические, физико-механические и технологические свойства.
10. Физико-химические основы восстановления тугоплавких металлов из оксидов водородом, кальцием.
11. Получение чистых тугоплавких металлов.
12. Физические основы литейного производства.
13. Методы обработки материалов давлением.
14. Процессыковки и объемной штамповки.
15. Новые и специальные методы обработки металлов давлением (обработка в состоянии сверхпластичности, гидроэкструзия, накатывание рифлений, резьб и т.д.).
16. Виды, свойства и получение металлокерамических материалов.
17. Физико-механические основы обработки металлов резанием.
18. Обработка поверхности деталей абразивным инструментом.
19. Отделочные операции.
20. Объемное и поверхностное упрочнение пластической деформацией.

Вопросы к экзамену 2 (технологии сварки и покрытий)

1. Физическая сущность сварки.
2. Понятие о свариваемости металлов. Влияние состава на свариваемость сталей.
3. Структура сварных соединений.
4. Особенности структуры сварных соединений высоколегированных сталей.

5. Природа горячих и холодных трещин в сварных соединениях.
6. Дуговая наплавка.
7. Сварка давлением. Основные схемы и сущность процессов.
8. Контактная сварка.
9. Повышение эксплуатационных свойств изделий напылением и наплавкой поверхностей.
10. Электроосаждение покрытий и их кристаллизация.
11. Технологии нанесения покрытий методом напыления (дуговая металлизация, газоплазменное, детонационное и вакуумное напыление)
12. Методы определения эксплуатационных, технологических и физико-химических характеристик металлических и неметаллических покрытий.
13. Электроэрозионная обработка.
14. Электрохимическая обработка.
15. Сварка сталей разнородных по составу и структурному классу.
16. Методы изучения строения и свойств покрытий.
17. Лазерное напыление покрытий.
18. Лазерная сварка и резка.
19. Технологии термической обработки электролитических покрытий.
20. Структура и свойства электролитических покрытий.

Литература

а) основная учебная литература:

1. Физическое материаловедение: Учебник для вузов в 6 т./ Под общей ред. Калина Б.А /Б.А. Калинин и др.- М.: МИФИ, 2012. – 700 с.
2. Третьяков А.Ф. Технология конструкционных материалов. Курс лекций: Учебное пособие- М.:Изд-во МГТУ им.Н.Э. Баумана, 2010.-327 с.
3. Металловедение покрытий: Учебник для вузов/ И.в. Ковенский, В.В. Поветкин- М.: «СП Интернет Инжиниринг», 1999.-296 с.

б) дополнительная учебная литература:

1. Дриц М.Е., Москалев М.А. Технология конструкционных материалов и материаловедение. – М.: Высшая школа. 1990. 447 с.

2. Малынкин В.Г. Получение и обработка металлов и соединений. Курс лекций для студентов специальности "Физика металлов". Обнинск ИАТЭ. 1996. 226 с.
3. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов: Учебник / В.А.Грибков, Ф.И.Григорьев, Б.А.Калин, В.Л.Якушин /Под ред.Б.А.Калина. М.: Круглый год, 2001, 528 с.
4. В.А.Васильев, Б.С.Митин и др. Высокоскоростное затвердевание расплава (теория, технология и материалы). – М.: «СП ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ». 1998.-400 с.
5. В.В. Болдырев. Механохимия и механоактивация твердых веществ. – Успехи химии, т.75, вып.3, с.203-216

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУК О МАТЕРИАЛАХ

Цель изучения дисциплины:

- приобретение знаний о простейших математических моделях физических объектов, принципах построения, иерархии, универсальности, построении моделей из вариационных принципов;
- освоение основных видов моделирования как формы отражения, описания или имитации действительных объектов, процессов и явлений, принципов, методов и процедур их проведения.

Содержание дисциплины, структурированное по разделам (темам)

№	Наименование раздела /темы дисциплины	Содержание
1.	Название раздела	
1.	Методы физико-математического моделирования явлений, материалов и процессов	Получение моделей из фундаментальных законов природы. Построение моделей из вариационных принципов, иерархии моделей. Примеры построения аналитических моделей физических и химических процессов и явлений.

		Физико-математическое моделирование процессов тепло- масс- переноса, структурных переходов в твердых телах. Дискретное моделирование.
2.	Физико-математическое моделирование и расчет свойств полимеров, керамических композиционных материалов	Математическое моделирование структуры и физико-технических характеристик полимеров. Математическое моделирование структуры и физико-технических характеристик керамических материалов. Математическое моделирование структуры и физико-технических характеристик КМ. Физико-математическое моделирование многослойных конструкций на основе КМ. Математическое моделирование функциональных характеристик изделий из КМ.
3	Физико-математическое моделирование биологических систем	Моделирование биологических процессов. Компьютерное моделирование в биологии. Примеры.
4	Современные методы моделирования испытаний материалов и изделий различного типа и назначения	Методы физико-механических испытаний и определения, теплофизических, электрических и специальных функциональных свойств материалов и изделий. Моделирование теплосилового воздействия на конструкции, в зависимости от условий эксплуатации изделий. Моделирование исследований и испытаний материалов и изделий (элементов летательных аппаратов).

Вопросы для коллоквиума

1. Моделирование как понятие. Понятие о математической модели. Требования к математической модели. Формы представления модели.

2. Физико-математическое моделирование. Основные понятия физико-математического моделирования. Методы физического моделирования. Основные положения теории подобия.
3. Оптимизация материалов и технологических процессов. Параметры и критерии оптимизации технологического процесса (ТП). Последовательность и содержание этапов решения задач оптимизации ТП.
4. Методы исследования свойств материалов, работающих в экстремальных условиях эксплуатации. Методики исследования механических, теплофизических, электрофизических свойств. ДТА, СТА, ТМА, ДМА методы анализа.
5. Современные методы исследования микроструктурных характеристик материалов (электронные, рентгеноспектральные). Современные автоматизированные методы исследования теплофизических свойств материалов.
6. Физико-математическое моделирование процессов тепло- масс-переноса, структурных переходов в твердых телах.
7. Дискретное моделирование. Метод конечных разностей. Элементы теории перколяции. Оптимизация расчетных схем и моделей.
8. Компьютерное (виртуальное) моделирование биологических систем.
9. Физико-математическое моделирование биологических систем. Примеры.
10. Керамика и стеклокерамика. Моделирование свойств, оптимизация ТП изготовления керамических и стеклокерамических материалов.
11. Оптимизация технологических процессов изготовления керамических и стеклокерамических материалов (электрофрез, упрочнение и др.).
12. Моделирование структурных процессов при формировании (спекании) керамики и стеклокерамики.
13. Керамика и стеклокерамика в промышленности, авиа и ракетной технике. Бронекерамика. Моделирование и оптимизация многослойных бронеконструкций на основе керамических материалов.
14. Композиционные материалы (КМ). Моделирование свойств, оптимизация ТП изготовления композиционных материалов.

Темы рефератов (Моделирование и расчет свойств различных материалов)

1. Моделирование и оптимизация процесса синтеза метилфенилспиросилоксана.
2. Исследования микроструктурных характеристик керамических материалов на основе реакционно-связного нитрида кремния для оптимизации технологии изготовления.
3. Моделирование процессов теплопереноса в кварцевой керамике при одностороннем темповом нагреве.
4. Создание и оптимизация базы данных для технологического участка изготовления химических субстанций в рамках контроля и управления качеством продукции.
5. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния элемента летательного аппарата.

Вопросы к экзамену

1. Моделирование как понятие. Понятие о математической модели. Требования к математической модели. Формы представления модели.
2. Физико-математическое моделирование. Основные понятия физико-математического моделирования. Методы физического моделирования. Основные положения теории подобия.
3. Оптимизация материалов и технологических процессов. Параметры и критерии оптимизации технологического процесса (ТП). Последовательность и содержание этапов решения задач оптимизации ТП.
4. Методы исследования свойств материалов, работающих в экстремальных условиях эксплуатации. Методики исследования механических, теплофизических, электрофизических свойств. ДТА, СТА, ТМА, ДМА методы анализа.
5. Современные методы исследования микроструктурных характеристик материалов (электронные, рентгеноспектральные). Современные автоматизированные методы исследования теплофизических свойств материалов.
6. Физико-математическое моделирование процессов тепло- масс-переноса, структурных переходов в твердых телах.
7. Дискретное моделирование. Метод конечных разностей. Элементы теории перколяции. Оптимизация расчетных схем и моделей.

8. Компьютерное (виртуальное) моделирование биологических систем.
9. Физико-математическое моделирование биологических систем. Примеры.
10. Керамика и стеклокерамика. Моделирование свойств, оптимизация ТП изготовления керамических и стеклокерамических материалов.
11. Оптимизация технологических процессов изготовления керамических и стеклокерамических материалов (электрофорез, упрочнение и др.). Моделирование структурных процессов при формировании (спекании) керамики и стеклокерамики.
12. Керамика и стеклокерамика в промышленности, авиа и ракетной технике. Бронекерамика. Моделирование и оптимизация многослойных бронеконструкций на основе керамических материалов.
13. Композиционные материалы (КМ). Моделирование свойств, оптимизация ТП изготовления композиционных материалов.
14. Моделирование структуры КМ в зависимости от функционального использования. Радиопрозрачные композиционные материалы. Физико-математическое моделирование многослойных конструкций на основе КМ.
15. Термостойкие керамокомпозиционные материалы, перспективы применения, оптимизация ТП изготовления. Композиционные материалы в промышленности, авиа и ракетной технике.
16. Материалы авиа и ракетной техники (металлы, КМ, керамики, клеи, герметики), эксплуатационные характеристики. Методы моделирования и расчета изделий и конструкций из композиционных и керамических материалов авиа и ракетного назначения.
17. Примеры расчета конструкции: выбор материалов в соответствии с условиями эксплуатации изделия, моделирование и оптимизация конструкции.
18. Моделирование теплосилового воздействия на конструкции, в зависимости от условий эксплуатации изделий. Методы испытания изделий и конструкций, работающих в экстремальных условиях.
19. Методики испытаний, испытательные установки и стенды. Аэродинамические трубы, установки одностороннего нагрева, вибростенды.

Литература

а) основная учебная литература:

1. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. Идеи, методы, примеры. М.: Физматлит, 2001, 320 с. – Режим доступа <http://www.twirpx.com/file/581461/> – (Дата обращения: 14.04.2015).
2. В.М.Крылов, В.А. Холоднов. Теория и практика математического моделирования. СПб.: СПГТИ, 2007 г., 178 с. – Режим доступа <http://science.spb.ru/files/IzvetiyaTI/2008/4/Articles/03/files/assets/downloads/publication.pdf> – (Дата обращения: 14.04.2015).
3. Тарасевич Ю.Ю. Математическое и компьютерное моделирование. Вводный курс. УРСС, 2004, 152 с. – Режим доступа <http://www.twirpx.com/file/520967/> – (Дата обращения: 14.04.2015).
4. Аскадский А.А., Кондращенко В.И. Компьютерное материаловедение полимеров. М:Научный мир, 1999 г. , 544 с. – Режим доступа <http://bookre.org/reader?file=565375> – (Дата обращения: 14.04.2015).
5. Габасов Р., Кириллова Ф.М. Методы оптимизации. Мн. Изд-во БГУ, 1975, 280с. – Режим доступа <http://www.twirpx.com/file/1412715/> – (Дата обращения: 14.04.2015).
6. Михайлов Г.А., Войтишек А.В. Численное статистическое моделирование. М. Академия, 2006, 386 с. – Режим доступа <http://www.twirpx.com/file/1709213/> – (Дата обращения: 14.04.2015).
7. Гурговник И.Г. и др. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. М:Наука, 2004 г., 368 с. – Режим доступа <http://bookre.org/reader?file=1503257> – (Дата обращения: 14.04.2015).
8. Дворецкий С.И., Егоров А.Ф., Дворецкий Д.С. Компьютерное моделирование и оптимизация технологических процессов и оборудования Тамб: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003 г. 224 с. – Режим доступа <http://www.tstu.ru/book/elib/pdf/2003/dvorez.pdf> – (Дата обращения: 14.04.2015).

9. Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Под редакцией С.В. Резника. В 3-х томах. Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002 г.
10. Борисова О.М., Сальников В.Д. Химические, физико-химические и физические методы анализа. -М.: Химия,1991, - 267 с . - [Электронный ресурс] Режим доступа <http://upload.studwork.org/order/12895/elektrotekh.doc> – (Дата обращения: 14.04.2015).
11. Старченко И.Б. Математическое моделирование медицинских и биологических систем. Учебное пособие. Таганрог, 2011, 69. - [Электронный ресурс] Режим доступа <http://window.edu.ru/resource/709/76709>– (Дата обращения: 14.04.2015).
12. Б.Н. Арзамасов. Материаловедение. Часть 1,2 . М: «Машиностроение», 1986 г. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.twirpx.com/file/15488/> – (Дата обращения: 14.04.2015).

б) дополнительная учебная литература:

- 1 . С.И. Корякин, И.В. Пименов, В.К. Худяков. Способы обработки материалов. Учебное пособие. Калининград. 453 с. 1997 г . . - [Электронный ресурс] Режим доступа <http://www.twirpx.com/file/54433/> – (Дата обращения: 14.04.2015).
- 2 . А.П. Гаршин и др. Керамика для машиностроения. М: Научтехлитиздат. 384 с. 2003 г . - [Электронный ресурс] Режим доступа <http://www.twirpx.com/file/271220/> – (Дата обращения: 14.04.2015).
3. В.М.Крылов, В.А. Холоднов. Теория и практика математического моделирования. СПб.: СПГТИ, 178 с. 2007 г. - [Электронный ресурс] Режим доступа <http://www.twirpx.com/file/898926/> – (Дата обращения: 14.04.2015).