

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

ОДОБРЕНО УМС ИЯФИТ

Протокол № 01/0821-573.1

от 31.08.2021 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
ОСНОВЫ ТЕОРИИ ДЕФЕКТОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

Направление подготовки
(специальность)

[1] 22.03.01 Материаловедение и технологии
материалов

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/В	СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экс./зач./КР/КП
5	2	72	16	16	0		13	0	Э
Итого	2	72	16	16	0	0	13	0	

АННОТАЦИЯ

В курсе изложены основы теории дефектов кристаллической структуры. Дается классификация дефектов кристаллической структуры.

Рассматриваются точечные дефекты. Излагаются представления об образовании и подвижности точечных дефектов, их отжиге; энергии образования вакансий и междоузельных атомов; искажениях кристаллической решетки; источниках и стоках точечных дефектов; комплексах точечных дефектов.

Рассматриваются линейные дефекты кристаллического строения твердых тел. Излагаются современные представления об образовании и механизмах размножения дислокаций; их движении; силах, действующих на дислокации; процессах взаимодействия между дислокациями, а также между дислокациями и точечными дефектами, дислокационных структурах.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель освоения учебной дисциплины состоит в том, чтобы перед чтением курсов, непосредственно связанных с изучением материалов, ввести студентов в основы теории дефектов кристаллической структуры.

Данный курс необходим для понимания влияния дефектов кристаллической структуры на свойства металлов, их фазовые превращения при нагреве и радиационном воздействии, изменения структуры при обработке и эксплуатации.

В задачи дисциплины входит установление зависимостей между дефектной структурой и механическими и физическими свойствами материалов

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Для изучения дисциплины необходимы компетенции, сформированные у обучающихся в результате освоения математических и физических дисциплин, химии.

Данная дисциплина является базой для изучения специальных дисциплин «Физическое материаловедение», «Функциональные и конструкционные материалы», «Реакторные материалы», «Методы исследования реакторных материалов», «Нanomатериалы и нанотехнологии», «Физические свойства твердых тел», «Материалы с особыми физическими свойствами».

Знание ее содержания необходимо при выполнении работ по курсовому и дипломному проектированию, НИРС, а также при практической работе.

3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
научно-исследовательский			
участие в работе группы специалистов при выполнении экспериментов и обработке их результатов по созданию, исследованию и выбору материалов, оценке их технологических и служебных качеств путем комплексного анализа их структуры и свойств, физико-механических, коррозионных и других испытаний	методы и средства испытаний и диагностики, исследования и контроля качества материалов, пленок и покрытий, полуфабрикатов, заготовок, деталей и изделий, все виды исследовательского, контрольного и испытательного оборудования, аналитической аппаратуры, компьютерное программное обеспечение для обработки результатов и анализа полученных данных, моделирования поведения материалов, оценки и прогнозирования их эксплуатационных характеристик	ПК-1 [1] - способен использовать в исследованиях и расчетах знания о методах исследования, анализа, диагностики и моделирования свойств материалов, физических и химических процессах, протекающих в материалах при их получении, обработке и модификации <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011	З-ПК-1[1] - знать основные методы исследования, анализа, диагностики и моделирования свойств материалов, физических и химических процессах, протекающих в материалах при их получении, обработке и модификации; ; У-ПК-1[1] - уметь использовать в исследованиях и расчетах знания о методах исследования, анализа, диагностики и моделирования свойств материалов, физических и химических процессах, протекающих в материалах при их получении, обработке и модификации; ; В-ПК-1[1] - владеть навыками исследования, анализа, диагностики и моделирования свойств материалов, физических и химических процессах, протекающих в

			материалах при их получении, обработке и модификации.
сбор данных о существующих типах и марках материалов, их структуре и свойствах применительно к решению поставленных задач с использованием баз данных и литературных источников	основные типы современных конструкционных и функциональных неорганических (металлических и неметаллических) и органических (полимерных и углеродных) материалов, композитов и гибридных материалов, сверхтвердых материалов, интеллектуальных и наноматериалов, пленок и покрытий	ПК-1.2 [1] - способен применять знания об основных типах современных материалов, принципах выбора материалов для заданных условий эксплуатации с учетом требований технологичности, экономичности, надежности и долговечности, экологических последствий их применения при проектировании высокотехнологичных процессов <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011	З-ПК-1.2[1] - знать основные типы современных материалов, а также подходы к выбору материалов для заданных условий эксплуатации; У-ПК-1.2[1] - уметь выбрать материал для заданных условий эксплуатации; В-ПК-1.2[1] - владеть основными подходами при выборе материалов для заданных условий эксплуатации
сбор данных о существующих типах и марках материалов, их структуре и свойствах применительно к решению поставленных задач с использованием баз данных и литературных источников	основные типы современных конструкционных и функциональных неорганических (металлических и неметаллических) и органических (полимерных и углеродных) материалов, композитов и гибридных материалов, сверхтвердых материалов, интеллектуальных и наноматериалов, пленок и покрытий	ПК-2 [1] - способен использовать на практике современные представления о влиянии структуры на свойства материалов, их взаимодействии с окружающей средой, полями, частицами и излучениями <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011	З-ПК-2[1] - знать основные представления о структуре материалов и влиянии структуры на свойства материалов, их взаимодействии с окружающей средой, полями, частицами и излучениями; ; У-ПК-2[1] - уметь анализировать влияние структуры материалов на их свойства, а также ее эволюцию при взаимодействии с окружающей средой, полями, частицами и излучениями; ; В-ПК-2[1] - владеть практическими навыками анализа

			эволюции структурно-фазового состояния материалов при взаимодействии с окружающей средой, полями, частицами и излучениями и влияния этой эволюции на свойства материалов.
--	--	--	---

4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование чувства личной ответственности за научно-технологическое развитие России, за результаты исследований и их последствия (B17)	1.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования чувства личной ответственности за достижение лидерства России в ведущих научно-технических секторах и фундаментальных исследованиях, обеспечивающих ее экономическое развитие и внешнюю безопасность, посредством контекстного обучения, обсуждения социальной и практической значимости результатов научных исследований и технологических разработок. 2.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования социальной ответственности ученого за результаты исследований и их последствия, развития исследовательских качеств посредством выполнения учебно-исследовательских заданий, ориентированных на изучение и проверку научных фактов, критический анализ публикаций в профессиональной области, вовлечения в реальные междисциплинарные научно-исследовательские проекты.
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование ответственности	Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для

	за профессиональный выбор, профессиональное развитие и профессиональные решения (B18)	формирования у студентов ответственности за свое профессиональное развитие посредством выбора студентами индивидуальных образовательных траекторий, организации системы общения между всеми участниками образовательного процесса, в том числе с использованием новых информационных технологий.
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование научного мировоззрения, культуры поиска нестандартных научно-технических/практических решений, критического отношения к исследованиям лженаучного толка (B19)	1.Использование воспитательного потенциала дисциплин/практик «Научно-исследовательская работа», «Проектная практика», «Научный семинар» для: - формирования понимания основных принципов и способов научного познания мира, развития исследовательских качеств студентов посредством их вовлечения в исследовательские проекты по областям научных исследований. 2.Использование воспитательного потенциала дисциплин "История науки и инженерии", "Критическое мышление и основы научной коммуникации", "Введение в специальность", "Научно-исследовательская работа", "Научный семинар" для: - формирования способности отделять настоящие научные исследования от лженаучных посредством проведения со студентами занятий и регулярных бесед; - формирования критического мышления, умения рассматривать различные исследования с экспертной позиции посредством обсуждения со студентами современных исследований, исторических предпосылок появления тех или иных открытий и теорий.

5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практ. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>5 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8		Кл-6 (10), Т-4 (5), КР-6 (10)	25	КИ-8	
2	Часть 2	9-16		Кл-15, Т-12, КР-13	25	КИ-15	
	<i>Итого за 5 Семестр</i>		16/16/0		50		
	Контрольные мероприятия за 5 Семестр				50	Э	

* – сокращенное наименование формы контроля

** – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
Т	Тестирование
Кл	Коллоквиум
КИ	Контроль по итогам
Э	Экзамен

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>5 Семестр</i>	16	16	0
1-8	Часть 1	8	8	
1	Тема 1 Классификация дефектов. Вакансии: равновесная концентрация, энергия образования.	Всего аудиторных часов		
		2	2	
		Онлайн		
2	Тема 2 Подвижность вакансий, энергия миграции вакансий. Самодиффузия	Всего аудиторных часов		
		2	2	
		Онлайн		

3	Тема 3 Междоузельные атомы: энергия образования междоузельного атома, подвижность и энергия миграция междоузельного атома.	Всего аудиторных часов		
		2	2	
		Онлайн		
4	Тема 4 Искажение кристаллической решетки при образовании точечных дефектов.	Всего аудиторных часов		
		2	2	
		Онлайн		
5 - 6	Тема 5 Комплексы точечных дефектов: равновесная концентрация комплексов, энергия связи комплексов, подвижность комплексов	Всего аудиторных часов		
		Онлайн		
7 - 8	Тема 6 Экспериментальные исследования точечных дефектов. Методы определения энергии образования и миграции точечных дефектов.	Всего аудиторных часов		
		Онлайн		
9-16	Часть 2	8	8	
9	Тема 7 Линейные дефекты. Краевая и винтовая дислокации. Контур и вектор Бюргерса. Основные свойства дислокаций	Всего аудиторных часов		
		2	2	
		Онлайн		
9	Тема 8 Скольжение дислокаций. Сила Пайерлса-Набарро.	Всего аудиторных часов		
		2	2	
		Онлайн		
10	Тема 9 Переползание дислокаций. Скорость движения дислокаций. Пластическая деформация как движение дислокации.	Всего аудиторных часов		
		2	2	
		Онлайн		
10	Тема 10 Упругие свойства дислокаций. Поля напряжений винтовой и. краевой дислокаций. Энергия дислокации.	Всего аудиторных часов		
		2	2	
		Онлайн		
11	Тема 11 Силы, действующие на дислокацию. Взаимодействие между дислокациями, взаимодействие дислокаций с точечными дефектами..	Всего аудиторных часов		
		Онлайн		
12	Тема 12 Дислокационные реакции. Полные и частичные дислокации в ГЦК и ГПУ решетках. Энергетический критерий дислокационных реакций.	Всего аудиторных часов		
		Онлайн		
13	Тема 13 Тетраэдр Томпсона в ГЦК решетке. Стандартная бипирамида в ГПУ решетке. Пересечение дислокаций, движение дислокации с порогами	Всего аудиторных часов		
		Онлайн		
14	Тема 14 Дислокационные структуры. Скопление дислокаций. Стенка дислокации. Плотность дислокаций. Субзеренные границы.	Всего аудиторных часов		
		Онлайн		
15	Тема 15	Всего аудиторных часов		

	Дефекты упаковки. Энергия дефекта упаковки. Расщепление дислокации. Двойники.			
		Онлайн		

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При реализации программы учебной дисциплины используются активные и интерактивные формы обучения с применением LMS, электронных ресурсов и информационно-коммуникационных технологий. Занятия проводятся в форме чтения лекций по тематике и семинаров, охватывающих разделы учебной дисциплины.

Самостоятельная работа студентов подразумевает под собой проработку лекционного материала с использованием рекомендуемой литературы.

7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения
-------------	---------------------

Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма	Оценка по 4-ех	Оценка	Требования к уровню освоению
-------	----------------	--------	------------------------------

баллов	балльной шкале	ECTS	учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – «хорошо»	B	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		C	
70-74		D	
65-69	3 – «удовлетворительно»	E	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	F	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

Оценочные средства приведены в Приложении.

8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 539.2 Е80 Теория и моделирование структуры и характеристик точечных дефектов в твердых телах : учебное пособие для вузов, Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
2. 620 Ф50 Физическое материаловедение Т.1 Физика твердого тела, , : МИФИ, 2007

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 620 Ф50 Физическое материаловедение Т.1 Физика твердого тела, Москва: НИЯУ МИФИ, 2012

2. 669 Ш93 Прочность сплавов Ч.1 Дефекты решетки, , М.: Металлургия, 1982
3. ЭИ Ф50 Физическое материаловедение Т.1 Физика твердого тела, , : МИФИ, 2007
4. ЭИ 3-24 Дислокации в кристаллах, их движение и упругие свойства : Учебное пособие, А. Г. Залужный, М.: МИФИ, 1990
5. 539.3 3-24 Точечные дефекты кристаллического строения металлов и сплавов : Учеб. пособие, Залужный А.Г., М.: МИФИ, 1987
6. 669 Н73 Дефекты кристаллического строения металлов : , Новиков И.И., М.: Металлургия, 1983

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

1. Пакет программ Microsoft Office (мультимедийная аудитория)

LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ

Вопросы к коллоквиуму №1

1. Вакансии. Энергия образования. Равновесная концентрация вакансий.
2. Миграция вакансий. Самодиффузия.
3. Межузельные атомы. Энергия образования и энергия миграции межузельных атомов.
4. Искажение кристаллической решетки при образовании точечных дефектов.
5. Комплексы точечных дефектов. Равновесная концентрация комплексов.
6. Конфигурация и миграция комплексов точечных дефектов.
7. Источники и стоки точечных дефектов.
8. Отжиг точечных дефектов
9. Способы получения высокой концентрации точечных дефектов. Закалка.
10. Способы получения высокой концентрации точечных дефектов. Облучение
11. Экспериментальное определение энергии образования и энергии миграции точечных дефектов.

Второй раздел. Излагаются основы теории дислокаций. В этом разделе дислокации классифицируются по взаимной ориентации вектора сдвига и единичного вектора направления линии дислокации. Особое внимание необходимо уделить объяснению различия в механизмах перемещения, полях деформаций и напряжений, взаимодействия с точечными дефектами дислокаций разного типа (винтовые, краевые и смешанные). Подробно рассмотреть влияние различных факторов на пластическую деформацию кристаллов (факторы, тормозящие движение дислокаций).

Вопросы к коллоквиуму №2

1. Краевая и винтовая дислокации, контур и вектор Бюргерса
2. Скольжение краевой дислокации

3. Переползание краевой дислокации
4. Движение винтовой дислокации
5. Пластическая деформация как движение дислокаций
6. Тензор деформации и напряжения винтовой дислокации
7. Тензор деформации и напряжения краевой дислокации
8. Энергия винтовой дислокации
9. Энергия краевой дислокации
10. Силы, действующие на дислокацию
11. Силы взаимодействия между дислокациями
12. Взаимодействие точечных дефектов с дислокациями
13. Источник Франка-Рида
14. Скопление дислокаций
15. Стенка дислокаций. Дисклинации

Третий раздел. Рассматриваются механизмы образования дислокаций. В этом разделе необходимо особое внимание уделить рассмотрению источника Франка – Рида размножения дислокаций при пластической деформации.

При изложении междислокационного взаимодействия рассмотреть механизмы образования таких дислокационных структур, как стенка и скопление дислокаций; образования субструктуры.

Подробно рассмотреть использование таких геометрических образов, как тетраэдр Томпсона и стандартная бипирамида, при анализе дислокационных реакций

Вопросы к коллоквиуму №3

1. Полные и частичные дислокации. Дислокационные реакции, энергетический критерий Франка
2. Полные дислокации в ГЦК-решетке
3. Полные дислокации в ГПУ-решетке
4. Частичные дислокации Шокли в ГЦК-решетке
5. Частичные дислокации Шокли в ГПУ-решетке
6. Частичные дислокации Франка
7. Дислокационные реакции в ГЦК-решетке, тетраэдр Томпсона
8. Дислокационные реакции в ГПУ-решетке, стандартная бипирамида
3. Проведение семинарских занятий и выполнение самостоятельных работ

Проведение семинарских занятий направлено на закрепление прочитанного материала и использование его для решения практических задач.

С этой целью предлагаются задачи по определению равновесной концентрации точечных дефектов и их комплексов; по определению параметров самодиффузии; по анализу сил, действующих на дислокации при различных напряженных состояниях и при междислокационном взаимодействии; по анализу дислокационных реакций.

В рамках самостоятельной работы студентам периодически предлагается проработка отдельных глав рекомендованных учебников и учебных пособий.

Домашние задания:

1 – 4 недели

Классификация дефектов в кристаллах. Виды точечных дефектов. Вакансии и межузельные атомы. Искажение кристаллической решетки, вызываемое точечными дефектами.

Термодинамика точечных дефектов. Энергии образования вакансий и межузельных атомов. Подвижность точечных дефектов. Источники и стоки точечных дефектов.

- Физическое материаловедение. Том 1. Физика твердого тела. МИФИ. Москва 2007 г. Стр. 151-171

- М. А. Штремель «Прочность сплавов. Дефекты решетки». Москва, Металлургия. 1982 г. С. 3-52

- И. И. Новиков, К. М. Розин «Кристаллография и дефекты кристаллической решетки». Металлургия. 1990 г. С. 127 - 137

- А. Г. Залужный «Точечные дефекты кристаллического строения металлов и сплавов». Учебное пособие. МИФИ 1987 г. С. 1-20

5 – 6 недели.

Комплексы точечных дефектов. Энергия связи комплексов. Равновесная концентрация комплексов вакансий. Конфигурация комплексов. Подвижность комплексов.

Получение высокой концентрации точечных дефектов. Методы закалки, деформации, облучения. Методы определения энергий образования и миграции точечных дефектов.

- Физическое материаловедение. Том 1. Физика твердого тела. МИФИ. Москва 2007 г. Стр. 171 – 201

- М. А. Штремель «Прочность сплавов. Дефекты решетки». Москва, Металлургия. 1982 г. С. 52-75

- И. И. Новиков, К. М. Розин «Кристаллография и дефекты кристаллической решетки». Москва, Металлургия. 1990 г. С. 137 - 147

- А. Г. Залужный «Точечные дефекты кристаллического строения металлов и сплавов». Учебное пособие. МИФИ 1987 г. С. 21-58

7 – 8 недели.

Линейные дефекты. Краевая и винтовая дислокации. Контур и вектор Бюргерса. Основные свойства дислокаций. Силы Пайерлса - Набарро. Скольжение и переползание краевой дислокации. Движение винтовой дислокации. Смешанные дислокации и их движение.

- Физическое материаловедение. Том 1. Физика твердого тела. МИФИ. Москва 2007 г. Стр. 201-230

- М. А. Штремель «Прочность сплавов. Дефекты решетки». Москва, Металлургия. 1982 г. С. 75 - 144

- И. И. Новиков, К. М. Розин «Кристаллография и дефекты кристаллической решетки». Москва, Металлургия. 1990 г. С. 148- 180

- А. Г. Залужный «Дислокации в кристаллах, их движение и упругие свойства». Учебное пособие. МИФИ 1990 г. С. 3 – 31

9 – 12 недели.

Упругие свойства дислокаций. Тензоры деформации и напряжения. Поле и ядро дислокации. Энергия дислокации. Силы, действующие на дислокацию. Силы взаимодействия между дислокациями. Взаимодействие дислокаций с точечными дефектами. Атмосферы Коттрелла, Снука, Сузуки. Взаимодействие дислокаций с вакансиями и межузельными атомами. Электрическое взаимодействие дислокаций с атомами примеси. Торможение дислокаций в твердых растворах внедрения и замещения. Торможение дислокаций частицами фазовых выделений. Торможение дислокаций границами зерен и субзерен.

- Физическое материаловедение. Том 1. Физика твердого тела. МИФИ. Москва 2007 г. С. 230-255

- М. А. Штремель «Прочность сплавов. Дефекты решетки». Москва, Металлургия. 1982 г. С. 101 - 137

- И. И. Новиков, К. М. Розин «Кристаллография и дефекты кристаллической решетки». Москва, Металлургия. 1990 г. С. 183 -193, 257 -273

- А. Г. Залужный «Дислокации в кристаллах, их движение и упругие свойства». Учебное пособие. МИФИ 1990 г. С. 31-67

13 – 14 недели.

Образование дислокаций.

Механизмы образования дислокаций. Размножение дислокаций при пластической деформации (источник Франка-Рида). Скопление дислокаций. Стенка дислокаций. Дислокации. Системы субграниц.

- Физическое материаловедение. Том 1. Физика твердого тела. МИФИ. Москва 2007 г. С. 255 – 278

- М. А. Штремель «Прочность сплавов. Дефекты решетки». Москва, Металлургия. 1982 г. С. 175 - 218

- И. И. Новиков, К. М. Розин «Кристаллография и дефекты кристаллической решетки». Москва, Металлургия. 1990 г. С. 264 -303

- А. Г. Залужный «Дислокации в кристаллах, их движение и упругие свойства». Учебное пособие. МИФИ 1990 г. С. 67 -91

15 -18 недели.

Дислокации в типичных кристаллических структурах.

Полные и частичные дислокации. Энергетический критерий Франка дислокационных реакций. Тетраэдр Томпсона и стандартная бипирамида. Расщепление дислокаций. Энергия дефекта упаковки. Скопление и перемещение расщепленных дислокаций. Двойникование. Сверхструктурные дислокации.

Образование на дислокациях порогов. Движение дислокаций с порогом. Расщепление порогов.

- Физическое материаловедение. Том 1. Физика твердого тела. МИФИ. Москва 2007 г. С. 278 -306

- М. А. Штремель «Прочность сплавов. Дефекты решетки». Москва, Металлургия. 1982 г. С. 175 - 215

- И. И. Новиков, К. М. Розин «Кристаллография и дефекты кристаллической решетки». Москва, Металлургия. 1990 г. С. 193 - 240

- А. Г. Залужный «Дислокации в кристаллах, их движение и упругие свойства». Учебное пособие. МИФИ 1990 г. С. 77 -91

I. Типовые задачи к семинарским занятиям

Точечные дефекты

Межатомные взаимодействия

1. В простой кубической решетке с периодом a представить вторую производную парного взаимодействия $\chi(r)$ через модуль всестороннего сжатия K .

2. Найти зависимость модуля всестороннего сжатия $K(e)$ от деформации $e=x/b$, используя разложение потенциала парного взаимодействия по смещениям до X . При каких деформациях e изменение модуля упругости $[k(0)-k(e)]/k(0)$ достигнет 10% ($\epsilon=0,5$).

3. Найти при каком напряжении ($\sigma_{кр}$) простая кубическая решетка с периодом b теряет устойчивость при растяжении. Потенциал $\phi(x)$ разложить до X .

4. Найти температурную зависимость амплитуды гармонических колебаний в решетке. Выразить её через объёмный модуль упругости.

5. Оценить температуру плавления $T_{пл}$ как точку потери устойчивости колебаний атома, где возвращающая сила проходит через максимум. Выразить $T_{пл}$ через модуль упругости K при постоянной Грюнайзена $\gamma=2$.

Точечные дефекты

1. Известно, что при T_1 - C_1 , а при T_2 - C_2 . Найти энергию образования и колебательную энтропию вакансии.

2. Определить равновесную концентрацию дивакансий. Известна энергия образования вакансии E_v^f и энергия связи вакансии в дивакансии B .

3. Найти предэкспоненциальный множитель D_0 для самодиффузии в ГЦК решетке в направлении $[111]$, выразив межплоскостное расстояние d , объем на один атом Ω и плотность укладки через кратчайшее межатомное расстояние.

В ОЦК-решетке в направлении $[110]$, $[100]$.

4. Энергия образования вакансии в чистом Al – E_v^f . Энергия связи вакансии с примесным атомом- B . Найдите равновесную концентрацию вакансий в разбавленном твёрдом растворе с концентрацией Zn - C . Оцените условия, при которых концентрация вакансий около атомов примеси будет больше чем в остальной решетке ($c \ll 1$).

5. При температуре T_1 коэффициент самодиффузии D_1 , при температуре T_2 - D_2 . После резкой закалки с T_3 электросопротивление образца- R_3 , с температуры T_4 - R_4 . Допуская, что всё различие электросопротивления обусловлено наличием вакансий и пропорционально их концентрации, найдите энергию миграции вакансии. Электросопротивление исходного образца- R_0 .

6. Оцените наибольший возможный вклад равновесной концентрации дивакансий в диффузию, если энергия связи $B = E_v^f/Z$ ($Z=12$), а энергия активации миграции $E_m / E_v^{2m} = 6$.

7. Выразить коэффициент диффузии вакансий D_v в простой кубической решетке через частоту колебаний атомов ν_0 и энергию миграции вакансий E_m . Сравните с коэффициентом самодиффузии.

8. Зная энергию активации самодиффузии ($E_{сд}$) и энергию активации миграции (E_m) вакансий, определить отношение равновесных концентраций вакансии при T_1 и T_2 .

9. Равновесная концентрация вакансий в золоте при T_1 - C_v1 . Стержень закаливается с температуры T_1 , а затем нагревается при температуре $T_2 \ll T_1$. При достижении равновесной концентрации стержень сокращается в размерах- $\Delta L/L=1,1 \times 10^{-4}$. Найдите σ/a .

10. Частица высокой энергии передаёт решетке в каждом столкновении одну и ту же долю α своей энергии. Повреждение решетки прекращается, когда передаваемая энергия станет ниже E_d . Найдите зависимость глубины повреждения L от первичной энергии E , если пробег между столкновениями e .

11. Отношение равновесной концентрации вакансий к равновесной концентрации дивакансий при T_1 - N_1 , при T_2 - N_2 . Определить энергию связи вакансии в дивакансии, если энергия образования вакансии равна E_v^f .

12. Определить равновесную концентрацию дивакансий. Известна энергия образования вакансии E и энергия связи вакансии в дивакансии B .

13. Энергия образования вакансий в α - Fe – E_v^f . Энергия связи вакансии с примесным атомом – B . Найти равновесную концентрацию вакансий в разбавленном твердом растворе

замещения (концентрация примеси – с). Оцените условия, при которых концентрация вакансий около атомов примеси будет больше чем в остальной решетке.

Дислокации

Упругие свойства дислокаций

1. Перечислить системы скольжения в разных кристаллических решетках

2. Определить за какое время тело увеличит свои размеры в два раза в направлении скольжения дислокации в процессе пластической деформации, если известно: $\rho = 10^{11} \text{ см}^{-2}$, $b = 3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ и скорость скольжения дислокации $v = 1 \text{ см/с}$.

3. Краевая дислокация в кристалле NaCl параллельна $[100]$, а вектор $\vec{b} = \frac{1}{2} [110]$. Вычислить объем материала (на 1 см. длины дислокации), который нужно добавить к краю экстраплоскости или убрать с него, если дислокация перемещается на 10^{-4} см . в направлении $[100]$ ($b = 3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$).

4. Вектор $\vec{b}$ краевой дислокации в ГЦК - кристалле $= \frac{b}{2} [110]$. Определить силы, действующие на дислокацию, если на кристалл действуют растягивающие напряжения σ , параллельные: а) $[110]$, б) $[111]$

5. На кристалл с ГЦК-решеткой действуют растягивающие напряжения σ . Какие силы будут действовать на дислокацию, направленную по $[001]$ с вектором $\vec{b} = \frac{b}{2} [001]$: а) по $[111]$. б) по $[100]$.

6. На кристалл с ОЦК-решеткой в плоскости (001) действуют касательные напряжения τ , направленные по $[100]$. Какие силы будут действовать а) на краевую дислокацию, параллельную $[010]$ с $\vec{b} = b[001]$. б) на правовинтовую дислокацию с $\vec{b} = \frac{b}{2} [111]$.

7. Определить силу, действующую на дислокацию (рис.). Все отрезки дислокации имеют единичную длину.





8. Определить силу взаимодействия между:

а) параллельными краевыми дислокациями (одного и разного знака)

б) параллельными правовинтовыми дислокациями

с) параллельными правовинтовой и левовинтовой дислокациями

д) параллельными краевой и винтовой дислокациями

Правовинтовая: $[00b]$, $[00]$

9. В кристалле имеются краевые дислокации, параллельные $[001]$ с вектором $\vec{b} = \frac{b}{2} [110]$. Плотность дислокаций $\rho = 10^{11} \text{ см}^{-2}$. На кристалл действуют напряжения τ , направленные по $[110]$ в пл. (001). Определить силы, действующие на дислокацию. Если под действием этих сил дислокации скользят со скоростью $v = 1 \text{ см/сек}$, определить время, за которое кристалл изменит свои размеры в два раза по направлению $[100]$. Параметр решетки $b = 3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$.

10. В кристалле с ГЦК-решеткой имеется краевая дислокация параллельная

$[110]$ с вектором $\vec{b} = \frac{b}{2} [100]$. В плоскости (001) действует сила σ_1 , параллельная $[010]$, в плоскости (100) действует сила σ_2 , параллельная $[001]$. Определить силы,

действующие на дислокацию. Указать какие силы могут вызвать скольжение дислокации. Определить деформацию кристалла в направлении $[010]$, вызванную скольжением подобных дислокаций, если

плотность дислокаций $\rho = 10^{11} \text{ см}^{-2}$, $b = 3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$, скорость перемещения $v = 1 \text{ см/с}$ и время 103 сек.

11. Кубический кристалл растягивают в направлении $[100]$. Его деформация создается краевыми дислокациями, параллельными $[001]$ и скользящими по плоскостям (110) и (1 0). Если плотность этих дислокаций ρ , величина вектора Бюргерса каждой из них b и их средняя скорость v , определите скорость деформации растяжения кристалла. Параметр решетки $4 \cdot 10^{-8} \text{ см}$, длина дислокации $5 \cdot 10^{-1} \text{ см}$.

12. Рассмотреть краевую дислокацию с вектором t вдоль $[001]$ и вектором τ , составляющем угол 45° с осями X и Y. Напряженное состояние задано на рис. Найти общее выражение для силы, действующей на единицу длины дислокации.

□

13. Даны две прямолинейные краевые дислокации со взаимно ортогональными векторами Бюргерса одинаковой величины b (рис.). Вычислите работу, необходимую для перемещения дислокации A в её плоскости скольжения от $20a$ до a . (с □ □ a)

14. В ГЦК-кристалле две параллельные краевые дислокации с вектором b . Расстояние между плоскостями скольжения этих дислокаций b . Если предположить, что одна дислокация неподвижна, то надо определить, какую работу совершают внешние силы, заставляя скользить подвижную дислокацию, изменяя расстояние между ними от $20a$ до a ($b \ll a$).

15. Краевая дислокация в ГЦК-решетке параллельная $[100]$ с вектором $\tau = b/2 \ll 0$ перемещается по направлению $[100]$ на $l = 10^{-4} \text{ см}$, затем встречает препятствие и переползает в соседнюю параллельную плоскости движения кристаллографическую плоскость и движется в ней в прежнем направлении на расстояние 10^{-2} см . Определить объем материала, который надо добавить к краю экстраплоскости или убрать с нее, чтобы реализовать данное перемещение. Параметр решетки $4 \cdot 10^{-8} \text{ см}$, длина дислокации $5 \cdot 10^{-1} \text{ см}$.

16. Краевая дислокация в ГЦК решетке параллельная $\square 001$ с вектором $= b/2 \square 1 0$ перемещается по направлению $\square 0 0$ на $l = 10^{-3}$ см., затем встречает препятствие и переползает в соседнюю параллельную плоскости движения кристаллографическую плоскость и движется в ней в прежнем направлении на расстояние 10^{-2} см. Определить объем материала, который надо добавить к краю экстраплоскости или убрать с нее, чтобы реализовать данное перемещение. Параметр решетки $4 \cdot 10^{-8}$ см., длина дислокации $5 \cdot 10^{-1}$ см.

17. Краевая дислокация в ГЦК решетке параллельная $\square 10$ с вектором $= b/2 \square 110$ перемещается по направлению $\square 112$ на $l = 10^{-4}$ см., затем встречает препятствие и переползает в соседнюю параллельную плоскости движения кристаллографическую плоскость и движется в ней в прежнем направлении на расстояние 10^{-2} см. Определить объем материала, который надо добавить к краю экстраплоскости или убрать с нее, чтобы реализовать данное перемещение. Параметр решетки $4 \cdot 10^{-8}$ см., длина дислокации $5 \cdot 10^{-1}$ см.

18. Найти значение $\square_y$ нормальных напряжений двух параллельных разноименных краевых дислокаций, расположенных друг под другом на расстоянии $2b$.

Определить точки, где нормальные напряжения равны нулю, где сжимающие, где растягивающие.

19. Проанализируйте взаимодействие между двумя краевыми дислокациями, линии которых параллельны друг другу, а векторы Бюргерса ортогональны. Определите все положения равновесия по отношению к действующим силам и укажите, когда равновесие устойчивое, неустойчивое, безразличное.

20. Начертите схему плоскости, нормальной краевой дислокации в анизотропной среде. Укажите на этой плоскости линии, на которых одна из компонент $\square_x$, $\square_y$, $\square_{xy}$ обращается в нуль (дислокация параллельна оси Z , а её вектор B параллелен оси X). Укажите знаки напряжений в разных участках плоскости.

21. Найти поле касательных напряжений двух параллельных разноименных краевых дислокаций с общей плоскостью скольжения, если расстояние между ними $2b$. Сравнить закон убывания напряжения с расстоянием от центра этой системы и от одиночной дислокации при $\square \square b$ вдоль осей $x = 0$, $y = 0$ и вдоль луча $\square = \text{Const}$.

PS. $Y=Y'$, $X=2b-X'$

21. Даны две одноименные краевые дислокации, имеющие одну плоскость скольжения и отстоящие друг от друга на расстоянии $2b$. Найти выражение для определения поля деформации сдвига этой системы дислокаций. Определить деформацию сдвига в точке, лежащей на плоскости скольжения и отстоящей от одной дислокации на расстоянии $3a$, а от другой на расстоянии b . Упругие константы $\square$ и $\square$ - известны.

22. Найдите деформацию в точке непосредственно над или под краевой дислокацией. Вычислите всесторонние напряжения в точках, находящихся на $5b$ выше или ниже краевой дислокации.

Дислокационные реакции

1. Расщепление дислокации СД на дислокации Шокли (ГЦК решетка) в пл. (11).
2. Расщепление дислокации ST на две $(p+c/2)$ дислокации (ГПУ решетка)
3. Расщепление дислокации АВ на дислокации Шокли и Франка (ГЦК решетка)
4. Расщепление дислокации СВ на две p дислокации (ГПУ решетка)
5. Расщепление дислокации ВС на дислокации Шокли и вершинную (ГЦК решетка)
6. Расщепление дислокации ТА на p и $c/2$ дислокации (ГПУ решетка)
7. Проанализировать взаимодействие расщепленной дислокации АД, скользящей в

- пл. (11), с расщепленной дислокацией ДС, скользящей в пл.
(11), приводящее к образованию барьера Ломер-Коттрелла (ГЦК решетка)
8. Объединение ρ и $c/2$ дислокации (ГПУ решетка)
9. Проанализировать взаимодействие расщепленной дислокации ВС, скользящей в пл.
(11), с расщепленной дислокацией СД, скользящей в пл.
(11), приводящее к образованию барьера Ломер-Коттрелла (ГЦК решетка)
10. Объединение двух ρ -дислокации (ГПУ решетка)
11. Проанализировать взаимодействие расщепленной дислокации ВД, скользящей в пл. (11), с расщепленной дислокацией ДА, скользящей в пл.
(11), приводящее к образованию барьера Ломер-Коттрелла (ГЦК решетка)
12. Объединение двух $(\rho + c/2)$ -дислокации (ГПУ решетка)
13. Проанализировать взаимодействие расщепленной дислокации СД, скользящей в пл. (11), с расщепленной дислокацией ДА, скользящей в пл. (11), приводящее к образованию барьера Ломер-Коттрелла (ГЦК решетка)
14. . Расщепление $(\rho + c/2)$ -дислокации на дислокацию Шокли и Франка (ГПУ решетка)
15. Проанализировать взаимодействие расщепленной дислокации АД, скользящей в пл. (11), с расщепленной дислокацией ДВ, скользящей в пл.
(11), приводящее к образованию барьера Ломер-Коттрелла (ГЦК решетка)
16. Расщепление c -дислокации на две $(\rho + c/2)$ -дислокации (ГПУ решетка)
17. Проанализировать взаимодействие расщепленной дислокации АВ, скользящей в пл. (11), с расщепленной дислокацией ВС, скользящей в пл.
(11), приводящее к образованию барьера Ломер-Коттрелла (ГЦК решетка)
18. Объединение двух ρ и $c/2$ -дислокации (ГПУ решетка)
19. Проанализировать взаимодействие расщепленной дислокации АД, скользящей в пл. (11), с расщепленной дислокацией ДС, скользящей в пл.
(11), приводящее к образованию барьера Ломер-Коттрелла (ГЦК решетка)
20. Объединение двух ρ -дислокации (ГПУ решетка)
21. Проанализировать дислокационные реакции между скользящими в пересекающихся кристаллографических плоскостях расщепленными дислокациями, приводящие к образованию барьеров Ломер-Коттрелла с вершинной дислокацией $\square\square$ (ГЦК решетка)
22. Расщепление дислокации ST на две $(\rho + c/2)$ дислокации (ГПУ решетка)
23. Проанализировать дислокационные реакции между скользящими в пересекающихся кристаллографических плоскостях расщепленными дислокациями, приводящие к образованию барьеров Ломер-Коттрелла с вершинной дислокацией $\square\square$ (ГЦК решетка)
24. Расщепление дислокации СА на две ρ дислокации (ГПУ решетка)
25. Проанализировать дислокационные реакции между скользящими в пересекающихся кристаллографических плоскостях расщепленными дислокациями, приводящие к образованию барьеров Ломер-Коттрелла с вершинной дислокацией $\square\square$ (ГЦК решетка)
26. Расщепление $(\rho + c/2)$ -дислокации на дислокацию Шокли и Франка (ГПУ решетка)

3. Организация контроля

На семинарских занятиях студенты вызываются к доске для решения практических задач. Постоянно, индивидуальным опросом, проводится контроль теоретических знаний. После каждого модуля проводится коллоквиум с последующим анализом результатов работ.

Получение положительной оценки по каждому коллоквиуму является необходимым условием получения итоговой положительной оценки. В случае пропуска или получения отрицательной оценки работа должна быть переделана и сдана во время зачетной недели в конце семестра.

4. Проведение экзамена

Для допуска к экзамену необходимо выполнить с положительными оценками все проведенные в течение семестра самостоятельные работы. При условии сдачи с положительными оценками всех самостоятельных работ студент во время сдачи экзамена отвечает на экзаменационные вопросы. Перечень экзаменационных вопросов прилагается.

Вопросы к экзамену

1. Точечные дефекты. Равновесная концентрация вакансий
2. Миграция вакансий. Самодиффузия.
3. Миграция междоузельных атомов.
4. Конфигурация междоузельных атомов
5. Энергия образования и миграции вакансий
6. Энергия активации миграции междоузельных атомов
7. Получение высокой концентрации точечных дефектов закалкой
- 9
8. Комплексы точечных дефектов. Равновесная концентрация дивакансий
9. Искажение кристаллической решетки при образовании точечных дефектов
10. Энергия образования и миграции междоузельных атомов
11. Экспериментальные методы определения энергии активации миграции вакансий
12. Экспериментальные методы определения энергии образования вакансий
13. Конфигурация и миграция комплексов точечных дефектов.
14. Краевая и винтовая дислокации. Контур и вектор Бюргерса
15. Поле напряжений винтовой дислокации
16. Поле напряжений краевой дислокации.
17. Движение краевой дислокации
18. Движение винтовой дислокации
19. Упругое взаимодействие между дислокациями
20. Стенка дислокаций. Дисклинация
21. Скопление дислокаций
22. Частичные дислокации Шокли в ГПУ и ГЦК решетках
23. Силы, действующие на дислокации
24. Источники Франка-Рида образования дислокаций
25. Пластическая деформация как движение дислокаций
26. Взаимодействие дислокаций с точечными дефектами
27. Частичные дислокации Франка
28. Полные и частичные дислокации. Энергетический критерий Франка дислокационных реакций
29. Дислокационные реакции в ГЦК кристалле. Тетраэдр Томпсона
30. Дислокационные реакции в ГПУ кристалле. Стандартная бипирамида
31. Пересечение дислокаций. Движение дислокаций с порогами

ЛИТЕРАТУРА

ОСНОВНАЯ

1. Физическое материаловедение. Том 1. Физика твердого тела. МИФИ. Москва 2007 г.
2. И. И. Новиков, К. М. Розин “ Кристаллография и дефекты кристаллической решетки»
Металлургия, 1990 г.
3. М. А. Штремель “ Прочность сплавов “, ч. 1, “ Дефекты решетки”,
Металлургия, 1982г.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ

1. А. Г. Залужный “ Точечные дефекты кристаллического строения металлов и сплавов”, Москва, МИФИ, 1987г.
1. А. Г. Залужный “ Дислокации в кристаллах, их движение и упругие свойства”,
Москва, МИФИ, 1990 г.

Автор(ы):

Залужный Александр Георгиевич, д.ф.-м.н.,
профессор

Рецензент(ы):

Исаенкова М.Г.