

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем сверхпластичности металлов  
Российской академии наук**

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ИПСМ РАН

Р.Р. Мулюков

2015 г.



**Рабочая программа учебной дисциплины  
«Дефекты кристаллического строения металлов»**

Составлена для аспирантов ИПСМ РАН, обучающихся по направлению  
03.06.01 «Физика и астрономия»,  
профиль «Физика конденсированного состояния»

Форма обучения

очная

Составитель

зам. директора по научной работе, д.т.н.

Р.М. Имаев

Программа обсуждена и одобрена на заседании ученого совета ИПСМ РАН,  
протокол № 11-15 от 02 июля 2015 г.

Уфа 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1. Цель и задачи курса.....	3
1.1. Цель и задачи изучения дисциплины.....	3
1.2. Основные задачи изучения дисциплины.....	3
1.3. Компетенции, формируемые дисциплиной.....	3
2. Место дисциплины в учебном процессе .....	4
3. Объем дисциплины и виды учебной работы.....	4
4. Содержание дисциплины.....	4
4.1. Разделы дисциплины, трудоемкость (в часах) по видам занятий .....	4
4.2. Содержание разделов дисциплины.....	5
4.3. Самостоятельная работа .....	6
5. Текущая и промежуточная аттестация. Фонд оценочных средств.....	6
5.1. Организация текущего контроля освоения материала .....	6
5.2. Промежуточная аттестация.....	8
6. Материальное обеспечение дисциплины.....	9
7. Учебная литература для самостоятельной работы.....	9
7.1. Основная литература .....	9
7.2. Дополнительная литература .....	9

## **Введение**

Настоящая учебная программа составлена в соответствии с Федеральным законом «Об образовании в Российской Федерации» от 29.12.2012 г. № 273-ФЗ, Приказом Министерства образования и науки РФ от 19.11.2013 №1259 «Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре)», федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» (уровень подготовки кадров высшей квалификации), утвержденным приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 30 июля 2014 г. N 867, с изменениями, утвержденными Приказом Минобрнауки России от 30.04.2015 г. № 464 «О внесении изменений в федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации)», паспортом специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», Уставом ИПСМ РАН и положениями, регламентирующими работу аспирантуры ИПСМ РАН.

### **1. Цель и задачи изучения дисциплины**

**1.1. Цель изучения дисциплины** – формирование у аспирантов фундаментальных знаний о внутреннем строении реальных кристаллических материалов, о видах, структуре и свойствах различных дефектов кристаллического строения, определяющих свойства металлов и сплавов.

#### **1.2. Основные задачи изучения дисциплины**

В результате изучения дисциплины аспирант должен знать:

- роль дефектов кристаллического строения в физических и механических свойствах твердых тел;
- математические методы физики дефектов кристаллического строения;
- перспективы развития физики дефектов кристаллического строения и ее применений в описании свойств металлов и сплавов.

Аспирант должен уметь:

- анализировать механические и физические свойства твердых тел с использованием представлений о дефектах их кристаллического строения;
- использовать дислокационную теорию для объяснения процессов, происходящих при пластической деформации, фазовых превращениях и разрушении материалов;
- пользоваться литературой по методам исследований дефектов кристаллического строения.
- использовать передовые отечественные и зарубежные достижения в области физики дефектов кристаллического строения при проведении научных исследований.

Аспирант должен приобрести навыки:

- владения методологией теоретических и экспериментальных исследований в области физики дефектов кристаллического строения;
- изучения современных достижений в области физики дефектов кристаллов;
- использования современных достижений в области физики дефектов в исследовательской работе.

#### **1.3. Компетенции, формируемые дисциплиной:**

Дисциплина участвует в формировании следующих компетенций:

### **универсальных -**

– способности к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);

### **профессиональных -**

– готовности использовать знания и передовые отечественные и зарубежные достижения в области физики конденсированного состояния при проведении научных исследований и разработке перспективных материалов с определенными свойствами, методов их обработки, конструкций, приборов и устройств на их основе (ПК-2).

## **2. Место дисциплины в учебном процессе**

Дисциплина «Дефекты кристаллического строения металлов» преподается во 2-й год обучения аспиранта и относится к дисциплинам вариативной части для профиля «Физика конденсированного состояния», изучаемым по выбору аспиранта.

Данная дисциплина базируется на следующих дисциплинах первых двух уровней высшего образования по направлению «Физика и астрономия»: кристаллография, физика твердого тела.

Знания, умения и навыки, приобретенные в результате изучения дисциплины «Дефекты кристаллического строения металлов», используются в научно-исследовательской работе аспиранта и подготовке диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

## **3. Объем дисциплины и виды учебной работы**

Вид учебной работы	Всего часов / зачетных единиц	Год
		2
Общая трудоемкость дисциплины	108 / 3	108
Аудиторные занятия	36 / 1	36
Лекции	36 / 1	36
Практические занятия	-	-
Самостоятельная работа	72 / 2	72
Вид итогового контроля		зачет

## **4. Содержание дисциплины**

### **4.1. Разделы дисциплины, трудоемкость (в часах) по видам занятий**

№	Название раздела	Всего часов	Аудиторные часы			Самостоятельная работа
			Лекции	Семинары	Практические занятия	
1	Введение. Точечные дефекты	12	4			8

2	Дислокации в теории упругости	12	4			8
3	Дислокации в типичных металлических структурах	12	4			8
4	Образование дислокаций, их взаимодействие друг с другом и другими дефектами кристаллической решетки	12	4			8
5	Системы дислокаций	12	4			8
6	Дисклинации	12	4			8
7	Структура большеугловых границ зерен	12	4			8
8	Дефекты в границах зерен	12	4			8
9	Процессы в границах зерен	12	4			8
	Итого	72	36			72

## 4.2. Содержание разделов дисциплины

### 1. Введение. Точечные дефекты

Введение. Место физики дефектов в системе наук о материалах. Роль дефектов кристаллической решетки в формировании свойств материалов. Геометрическая классификация дефектов кристаллического строения. Предпосылки появления теории дефектов. Точечные дефекты. Виды точечных дефектов. Термодинамика точечных дефектов. Миграция точечных дефектов. Точечные дефекты и элементарные механизмы диффузии в кристаллах. Источники и стоки точечных дефектов. Поведение вакансий при отжиге и закалке. Методы определения концентрации вакансий, энергии их образования и миграции. Радиационные дефекты.

### 2. Дислокации в теории упругости

Основные типы дислокаций и виды их движения. Краевая дислокация, ее скольжение и переползание. Винтовая дислокация. Ее скольжение, поперечное скольжение. Смешанные дислокации. Призматические дислокации. Контур и вектор Бюргерса. Плотность дислокаций. Упругие свойства дислокаций: поля деформаций, напряжений. Энергия дислокации. Сила, действующая на дислокацию. Упругое взаимодействие параллельных краевых дислокаций. Упругое взаимодействие параллельных винтовых дислокаций. Методы выявления дислокаций в металлах.

### 3. Дислокации в типичных металлических структурах

Полные и частичные дислокации. Критерий Франка. Дефекты упаковки. Частичные дислокации Шокли и Франка. Стандартный тетраэдр Томпсона и дислокационные реакции в ГЦК решетке. Вершинные дислокации и дислокации Ломер-Коттрелла. Стандартная бипирамида и дислокационные реакции в ОЦК решетке. Дислокационные реакции в ОЦК решетке. Поперечное скольжение и переползание растянутых дислокаций. Двойникующая дислокация.

#### *4. Образование дислокаций, взаимодействие их друг с другом и другими дефектами кристаллической решетки*

Пересечение дислокаций. Пересечение единичных дислокаций. Пересечение дислокаций с порогами. Пересечение растянутых дислокаций. Взаимодействие дислокаций с примесными атомами. Атмосферы Коттрелла, Снука и Сузуки. Геликоидальные дислокации. Образование дислокаций. Источники Франка-Рида и Бардина Херринга. Торможение дислокаций. Сила Пайерлса. Торможение дислокаций при их взаимодействии с другими дислокациями, границами зерен, дисперсными частицами, атомами примесей и легирующих элементов.

#### *5. Системы дислокаций*

Дислокационные скопления. Малоугловые стенки и сетки дислокаций. Поля напряжений дислокационных систем. Экранировка поля напряжений дислокаций. Формула Франка.

#### *6. Дисклинации*

Дисклинации как разновидность дислокаций Вольтера. Упругое поле и энергия дисклинаций. Полные и частичные дисклинации. Дисклинационные диполи, мультиполи. Связь между дисклинациями, дислокациями и границами зерен. Образование частичных дислокаций при пластической деформации.

#### *7. Структура большеугловых границ зерен*

Геометрические и микроскопические параметры большеугловых границ зерен. Разориентировка зерен и их описание. Элементы геометрической теории границ зерен. Решетка совпадающих узлов и полная решетка наложений. Дислокационные, дисклинационные и атомные модели строения границ зерен. Современные методы исследования структуры границ зерен.

#### *8. Дефекты в границах зерен*

Зернограницные дислокации. Тройные стыки зерен. Дисклинации в тройных стыках. Взаимодействие границ зерен с дефектами решетки. Поглощение и испускание дислокаций границами зерен. Неравновесное состояние границ зерен.

#### *9. Процессы в границах зерен*

Зернограницное проскальзывание. Миграция границ зерен. Диффузия по границам зерен.

### **4.3. Самостоятельная работа**

В курсе запланировано 90 часов на самостоятельную работу аспирантов, которая включает в себя самостоятельную проработку и расширенное изучение материала, систематизацию, закрепление знаний, выполнение заданий и подготовку к сдаче зачета.

## **5. Текущая и промежуточная аттестация.**

### **Фонд оценочных средств**

#### **5.1. Организация текущего контроля освоения материала**

Текущий контроль знаний по дисциплине «Физика дефектов кристаллического строения металлов» осуществляется путем устных или письменных опросов по вопросам пройденных тем с периодичностью через 2 занятия с использованием вопросов для текущего контроля, а также задания, направленного на проверку сформированности компетенций при изучении дисциплины.

Объектами оценивания при текущем контроле выступают:

- учебная дисциплина - активность на занятиях, своевременность выполнения различных видов заданий, посещаемость занятий;

- степень усвоения теоретических знаний;
- степень сформированности компетенций.

*Примерный перечень вопросов для подготовки аспирантов к текущему контролю теоретических знаний*

1. Точечные дефекты. Механизмы их образования и миграции.
2. Термодинамика вакансий и межузельных атомов.
3. Комплексы точечных дефектов, их характеристики.
4. Роль точечных дефектов в диффузии в кристаллах. Элементарные механизмы диффузии.
5. Радиационные дефекты.
6. Дислокации. Контур и вектор Бюргерса. Виды дислокаций.
7. Дислокации в теории упругости: поля деформации, напряжений и энергия.
8. Силы, действующие на дислокации.
9. Скольжение и переползание дислокаций.
10. Барьер Пайерлса для движения дислокаций.
11. Механизмы зарождения дислокаций.
12. Пересечение дислокаций и образование порогов.
13. Взаимодействие дислокаций с точечными дефектами.
14. Дислокации в г.ц.к., г.п.у. и о.ц.к. кристаллах. Полные и частичные дислокации. Дефекты упаковки.
15. Дислокационные реакции. Тетраэдр Томпсона. Вершинные дислокации и дислокации Ломера-Коттрелла.
16. Дислокации в твердых растворах.
17. Сверхдислокации в упорядоченных сплавах.
18. Системы дислокаций. Дислокационные скопления.
19. Малоугловые стенки и сетки дислокаций. Экранировка поля напряжений дислокаций.
20. Формула Франка.
21. Дисклинации. Упругое поле и энергия дисклинаций.
22. Полные и частичные дисклинации.
23. Дисклинационные диполи, мультиполи.
24. Связь между дисклинациями, дислокациями и границами зерен.
25. Большеугловые границы зерен. Геометрические модели. Решетка совпадающих узлов и полная решетка наложений.
26. Дислокационные и дисклинационные модели строения границ зерен.
27. Атомные модели строения границ зерен.
28. Современные методы исследования структуры границ зерен.
29. Дефекты в большеугловых границах зерен. Зернограничные дислокации.
30. Тройные стыки зерен.
31. Дисклинации в тройных стыках зерен.
32. Взаимодействие границ зерен с дефектами решетки. Поглощение и испускание дислокаций.
33. Неравновесное состояние границ зерен.
34. Зернограничное проскальзывание.
35. Миграция границ зерен.
36. Диффузия по границам зерен.

*Задание для оценки степени сформированности компетенций*

Для демонстрации степени сформированности компетенций при изучении дисциплины аспирант самостоятельно выполняет письменное задание следующего содержания.

1. Проводит критический анализ современных научных достижений в области теоретического и экспериментального исследования дефектов кристаллического строения в металлах и формулирует нерешенные проблемы (компетенция УК-1).

2. Устанавливает связь современных достижений в области физики дефектов кристаллического строения с темой диссертационной работы аспиранта (ПК-2).

## **5.2. Промежуточная аттестация**

Промежуточная аттестация осуществляется с целью выявления степени освоения аспирантом теоретических знаний по дисциплине. Промежуточная аттестация проводится в форме зачета в конце 4-го семестра.

Обучающийся допускается к зачету или экзамену в случае выполнения всех учебных заданий, предусмотренных настоящей программой. В случае наличия учебной задолженности (пропущенных занятий и (или) невыполненных заданий) аспирант обрабатывает пропущенные занятия и выполняет задания.

*Зачет* проводится в письменно-устной форме. Аспиранту выдается задание в виде двух из приведенного ниже перечня. Зачет проводится в аудитории, время на написание и подготовку к ответам 40 минут.

Оценка «зачтено» выставляется при правильном и достаточно полном ответе, правильно использующем специальную терминологию, и умении отвечать на дополнительные вопросы, непосредственно связанные с темой билета. При этом могут допускаться ошибки не принципиального характера.

Оценка «не зачтено» выставляется при недостаточно полном ответе, при неправильном использовании специальной терминологии, неумении отвечать на дополнительные вопросы, непосредственно связанные с темой билета, при наличии в ответе ошибок принципиального характера.

Получение зачета является необходимым условием аттестации аспиранта за второй год обучения.

*Перечень вопросов для подготовки аспирантов к промежуточной аттестации по дисциплине*

1. Точечные дефекты. Механизмы их образования и миграции. Термодинамика вакансий и межузельных атомов. Комплексы точечных дефектов.

2. Роль точечных дефектов в диффузии в кристаллах. Элементарные механизмы диффузии. Радиационные дефекты.

3. Дислокации. Контур и вектор Бюргерса. Виды дислокаций. Дислокации в теории упругости: поля деформации, напряжений и энергия.

4. Силы, действующие на дислокации. Скольжение и переползание дислокаций. Барьер Пайерлса для движения дислокаций.

5. Механизмы зарождения дислокаций. Пересечение дислокаций и образование порогов. Взаимодействие дислокаций с точечными дефектами.

6. Дислокации в г.ц.к., г.п.у. и о.ц.к. кристаллах. Полные и частичные дислокации. Дефекты упаковки. Дислокационные реакции. Тетраэдр Томпсона. Вершинные дислокации и дислокации Ломера-Коттрелла.

7. Дислокации в твердых растворах. Сверхдислокации в упорядоченных сплавах.

8. Системы дислокаций. Дислокационные скопления. Малоугловые стенки и сетки дислокаций. Экранировка поля напряжений дислокаций. Формула Франка.

9. Дисклинации. Упругое поле и энергия дисклинаций. Полные и частичные



дисклинации.

10. Дисклинационные диполи, мультиполи. Связь между дисклинациями, дислокациями и границами зерен.

11. Большеугловые границы зерен. Геометрические модели. Решетка совпадающих узлов и полная решетка наложений.

12. Дислокационные, дисклинационные и модели строения границ зерен.

13. Атомные модели строения границ зерен.

14. Современные методы исследования структуры границ зерен.

15. Дефекты в большеугловых границах зерен. Зернограничные дислокации.

16. Тройные стыки зерен. Дисклинации в тройных стыках.

17. Взаимодействие границ зерен с дефектами решетки. Поглощение и испускание дислокаций. Неравновесное состояние границ зерен.

18. Зернограничное проскальзывание.

19. Миграция границ зерен.

20. Диффузия по границам зерен.

## **6. Материальное обеспечение дисциплины**

Для проведения занятий используется аудитория, оснащенная компьютером, проектором и экраном.

## **7. Учебная литература для самостоятельной работы**

### **7.1. Основная литература**

1. Новиков И.И., Розин К.М. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки. - М.: Металлургия, 1990. - 335 с.
2. Фридель Ж. Дислокации. – М: Мир, 1967. - 643с.
3. Штремель М.А. Прочность сплавов. Часть 1. Дефекты решетки. - М: МИСИС, 1999. - 383 с.
4. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. - М.: Металлургия, 1982. - 584 с.
5. Кайбышев О.А., Валиев Р.З. Границы зерен и свойства металлов. – М.: Металлургия, 1987. – 216с.
6. Жилиев А.П., Пшеничнюк А.И. Сверхпластичность и границы зерен в ультрамелкозернистых материалах. – М.: Физматлит, 2008. – 320 с.

### **7.2. Дополнительная литература**

1. Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения. М. Бинوم. Лаборатория знаний, 2009. - 400 с.
2. Судзуки Т., Ёсиага Х., Такеути С. Динамика дислокаций и пластичность. М.: Мир, 1989. - 294 с.
3. Физическое материаловедение. – Под редакцией Р. Кана, Вып. II, Пер. с англ. - М.: Мир, 1968. - 489 с.