

**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  
«Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»**

Составлена для аспирантов ИПСМ РАН, обучающихся по направлению  
22.06.01 «Технологии материалов», профиль «Металловедение и термическая обработка  
металлов и сплавов»

Форма обучения

очная

Составитель:

зав. лабораторией, д.т.н.

В.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.....	4
2. Место дисциплины в учебном процессе .....	4
3. Объем дисциплины и виды учебной работы.....	4
4. Содержание дисциплины.....	5
4.1. Разделы дисциплины, трудоемкость (в часах) по видам занятий .....	5
4.2. Содержание разделов дисциплины.....	6
4.3. Самостоятельная работа .....	10
5. Текущая и промежуточная аттестация. Фонд оценочных средств.....	10
5.1. Организация текущего контроля освоения материала .....	10
5.2. Промежуточная аттестация.....	13
6. Материальное обеспечение дисциплины.....	14
7. Учебная литература для самостоятельной работы.....	14
7.1. Основная литература .....	14
7.2. Дополнительная литература .....	14
Приложение 1.....	15

## 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 22.06.01 «Технологии материалов» (уровень подготовки кадров высшей квалификации), утвержденным приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 30 июля 2014 г. N 888, 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)», Уставом ИПСМ РАН и положениями, регламентирующими работу аспирантуры ИПСМ РАН, паспортом специальности 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» и программой - минимумом кандидатского экзамена по специальности, разработанной экспертным советом Высшей аттестационной комиссии по металлургии и металловедению при участии «МАТИ» – Российского государственного технологического университета им. К.Э. Циолковского.

### 1. Цель и задачи изучения дисциплины

**1.1. Цель изучения дисциплины** – формирование у аспирантов фундаментальных знаний в области металловедения и термической обработки металлов и сплавов, углубленных представлений о зависимости между составом, структурой и свойствами металлов, сплавов и закономерностях их изменения под воздействием внешних факторов: тепловых, химических, механических, электромагнитных и радиоактивных.

### 1.2. Основные задачи изучения дисциплины

В результате изучения дисциплины аспирант должен **знать:**

- современные представления о структуре, физических и механических свойствах металлических материалов;
- физические основы и методы исследований микроструктуры и физико-механических свойств металлических материалов;
- основы теории термической обработки металлов и сплавов;
- основы теории прочности и пластичности металлов и сплавов;
- тенденции развития современного материаловедения и связанные с этим передовые технологии.

Аспирант должен **уметь:**

- формулировать перспективные задачи исследования на основе анализа развития методов и подходов современного материаловедения при создании новых конструкционных и функциональных материалов, а также методов их получения и обработки;
- подбирать совокупность экспериментальных и теоретических методов для решения конкретных задач исследования микроструктуры и свойств материалов;
- самостоятельно разрабатывать методики теоретического и экспериментального изучения микроструктуры и физико-механических свойств металлов и сплавов;

- разбираться в принципах работы и возможностях современного оборудования, предназначенного для исследования и микроструктуры и свойств металлических материалов;

- выполнять теоретические и экспериментальные исследования в области металловедения и термической обработки с использованием современных методов.

Аспирант должен **приобрести навыки:**

- владения методологией теоретических и экспериментальных исследований в области металловедения и термической обработки металлов и сплавов;

- изучения современных достижений в области исследований и разработок новых перспективных материалов, методов их получения и обработки;

- использования современных достижений в области новых материалов и методов их получения и обработки 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);

- способности планировать и решать задачи собственного профессионального и личного развития (УК-6);

**общепрофессиональных:**

- способности и готовности теоретически обосновывать и оптимизировать технологические процессы получения перспективных материалов и производство из них новых изделий с учетом последствий для общества, экономики и экологии (ОПК-1);

- способности и готовности разрабатывать технические задания и программы проведения расчетно-теоретических и экспериментальных работ (ОПК-9);

**профессиональных:**

- способности использовать знания и передовые отечественные и зарубежные достижения в области металловедения и термической обработки металлов и сплавов при проведении экспериментальных и расчетно-теоретических научных исследований, нацеленных на разработку перспективных материалов и технологических процессов, обеспечивающих получение полуфабрикатов и деталей с улучшенными физико-механическими свойствами (ПК-1);

- способности к самостоятельной постановке актуальных задач в области разработки перспективных материалов и технологических процессов, нацеленных на получение полуфабрикатов и деталей с улучшенными физико-механическими свойствами (ПК-2).

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

Дисциплина «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» преподается в 3-й и 4-й годы обучения аспиранта и относится к дисциплинам вариативной части, обязательной для профиля «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Данная дисциплина базируется на следующих дисциплинах первых двух уровней высшего образования по направлению «Технологии материалов»: металлография, физика металлов, кристаллография, дефекты кристаллического строения металлов, теория терми-

ческой обработки металлов и сплавов, пластическая деформация металлов и сплавов, термодинамика.

Знания, умения и навыки, приобретенные в результате изучения дисциплины «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов», 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 еди- ниц	Год, кол-во часов	
		3	4
Общая трудоемкость дисциплины	144 / 4	72	72
Аудиторные занятия	36 / 1	18	18
Лекции	36 / 1	18	18
Самостоятельная работа	72 / 2	54	18
Контроль	36 / 1		36
Вид итогового контроля		зачет	кандидатский экзамен

### 4. Содержание дисциплины

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

№	Название раздела	Всего часов	Аудиторные часы				
			Лекции	Семи- нары	Практиче- ские заня- тия	Самостоя- тельная работа	Контроль
<b>Курс 3, семестр 2</b>							
1	Строение металлов и сплавов	8	2			6	
2	Кристаллическое строение и его дефекты	12	2			10	
3	Фазовые и структурные превращения в металлах и сплавах в твердом состоянии	14	4			10	

4	Металлургические процессы получения полуфабрикатов и изделий	14	4			10	
5	Термическая обработка	14	4			10	
6	Термомеханическая обработка. Химико-термическая обработка	10	2			8	
Итого по семестру:		72	18			54	
<b>Курс 4, семестр 1</b>							
7	Технология термической обработки	10	4			6	
8	Упругая и пластическая деформация. Разрушение	8	4			4	
9	Методы исследования и контроля структуры и свойств металлов	10	6			4	
10	Промышленные сплавы (основы легирования и термической обработки, свойства, области применения)	8	4			4	
Итого по семестру:		72	18			18	36
<b>Итого по дисциплине:</b>		144	36			72	36

## 4.2. Содержание разделов дисциплины

### 1. Строение металлов и сплавов

Основные типы связи атомов в твердых телах. Металлическая связь. Электронное строение и физические свойства металлов. Поверхность Ферми и зоны Бриллюэна.

Твердые растворы замещения, внедрения и вычитания. Упорядоченные твердые растворы. Электронные соединения, фазы Лавеса,  $\sigma$ -фазы, фазы внедрения. Отклонения от закона Вегарда.

Правило фаз. Диаграммы состояния двойных и тройных систем с непрерывным рядом твердых растворов, с эвтектическими, перитектическими и монотектическими равно-

весиями, с конгруэнтно и инконгруэнтно плавящимися промежуточными фазами, с полиморфизмом компонентов. Термодинамический анализ диаграмм состояния. Отклонения от равновесия при кристаллизации сплавов в системах разного типа.

## *2. Кристаллическое строение и его дефекты*

Основные типы кристаллических решеток. Элементарные ячейки. Индексы направлений и плоскостей в кристаллической решетке. Анизотропия свойств кристаллов.

Типы дефектов кристаллического строения. Точечные дефекты. Дислокации. Дефекты упаковки. Вектор Бюргера. Плотность дислокаций. Скольжение и переползание дислокаций. Зарождение и размножение дислокаций, источник Франка-Рида. Сила Пайерлса-Набарро. Взаимодействие дислокаций между собой и с примесными атомами. Атмосферы Коттрелла, Снука, Сузуки. Дислокационные сетки и малоугловые границы. Высокоугловые границы. Миграция границ и зернограничное проскальзывание. Двойники. Кристаллография и механизм деформационного двойникования.

## *3. Фазовые и структурные превращения в металлах и сплавах в твердом состоянии*

Механизмы миграции атомов. Законы Фика. Коэффициент диффузии. Структурно чувствительные процессы диффузии. Диффузия во внешних силовых полях.

Классификация фазовых и структурных превращений. Фазовые превращения I и II рода. Гомогенный и гетерогенный механизмы зарождения. Строение и механизм движения поверхностей раздела фаз. Сдвиговое (бездиффузионное) и нормальное (диффузионное) превращения. Термодинамический и кристаллографический анализ сдвигового (мартенситного) превращения. Механизм и кинетика сдвиговых и нормальных превращений. Эвтектоидное превращение. Механизм и кинетика эвтектоидного превращения. Диаграммы фазовых превращений (термокинетические, изотермические и др.).

Упорядочение твердого раствора. Дальний и ближний порядок. Изменение свойств сплавов при упорядочении. Образование и распад метастабильных фаз. Распад пересыщенного твердого раствора. Спинодальный распад. Термодинамика образования промежуточных фаз. Структурные изменения при старении (кластеры, зоны Гинье-Престона, промежуточные метастабильные фазы, модулированные структуры). Когерентные, частично когерентные и некогерентные выделения. Формы выделений. Непрерывный и прерывистый распад.

## *4. Металлургические процессы получения полуфабрикатов и изделий*

Виды технологии литейного производства. Структура и свойства жидких металлов. Гомогенное и гетерогенное зарождение кристаллов, критический размер зародыша. Концентрационное переохлаждение. Эвтектическая кристаллизация. Влияние скорости кристаллизации на строение сплавов. Строение металлического слитка. Модифицирование структуры литых сплавов. Образование метастабильных фаз при кристаллизации. Бездиффузионная кристаллизация. Металлические стекла. Методы получения монокристаллов из расплава. Металлургия гранул.

Способы обработки металлов давлением. Влияние температуры, схемы и степени деформации на сопротивление деформации, структуру и свойства металлов и сплавов.

Виды сварки металлов и сплавов. Структура и свойства сварных соединений.

## *5. Термическая обработка*

Классификация видов термической обработки. Гомогенизационный отжиг. Изменение структуры и свойств сплавов при гомогенизационном отжиге.

Дорекристаллизационный и рекристаллизационный отжиги. Отдых. Полигонизация. Первичная, собирательная и вторичная рекристаллизация. Механизм и кинетика отжига, полигонизации и рекристаллизации, влияние на них предшествующей пластической деформации, примесей, температуры и продолжительности отжига. Параметры полигонизованной и рекристаллизованной структур. Критическая степень деформации. Диаграммы рекристаллизации. Закономерности и природа изменения механических и физических свойств при отжиге после холодной деформации. Текстура деформации, первичной, собирательной и вторичной рекристаллизации, механизм ее образования. Анизотропия свойств текстурованных металлов.

Отжиг для уменьшения остаточных напряжений. Механизм снижения остаточных напряжений при нагревании.

Фазовые превращения при нагреве. Структурная наследственность.

Закалка без полиморфного превращения. Изменение структуры и свойств при закалке.

Закалка с полиморфным превращением. Микроструктура и субструктура мартенсита. Упрочнение и изменение пластичности при закалке на мартенсит. Критическая скорость охлаждения при закалке, прокаливаемость.

Бейнитное превращение. Строение бейнита. Изотермическая закалка.

Старение. Природа упрочнения при старении. Влияние температуры и продолжительности старения на механические и физические свойства сплавов. Перестаривание, ступенчатое старение. Влияние температуры нагрева под закалку и скорости охлаждения на формирование структуры и свойств сплавов при старении.

Отпуск. Изменение микроструктуры, субструктуры и фазового состава при отпуске. Обратимая и необратимая отпускная хрупкость.

#### *6. Термомеханическая обработка. Химико-термическая обработка*

Термомеханическая обработка. Структурные изменения при пластической деформации. Динамическая полигонизация и динамическая рекристаллизация. Возврат и рекристаллизация после горячей деформации.

Высокотемпературная и низкотемпературная термомеханическая обработка. Термомеханическая обработка дисперсионно-твердеющих сплавов.

Химико-термическая обработка. Элементарные процессы при химико-термической обработке. Структура диффузионных слоев и ее связь с диаграммой состояния.

Азотирование, цементация, нитроцементация, алитирование, хромирование, борирование, сульфидирование, силицирование. Термоводородная обработка.

#### *7. Технология термической обработки*

Современное оборудование для закалки, отжига, отпуска, химико-термической и других видов термической обработки сталей и сплавов.

Агрегаты непрерывного отжига и закалки. Автоматизация полного цикла термической обработки.

Способы достижения высоких скоростей нагрева и охлаждения изделий при термической обработке. Внутренние напряжения и деформация изделий при термической обработке. Нагрев при термической обработке изделий в защитных средах и вакууме.

Дефекты термической обработки. Газонасыщение и его влияние на структуру и свойства сплавов. Методы борьбы с поводками и короблением.

#### *8. Упругая и пластическая деформация. Разрушение*



Диаграммы деформирования моно- и поликристаллов, многофазных сплавов. Механизмы упругой и пластической деформации. Деформационное упрочнение, влияние на него температуры и скорости деформации. Теория предела текучести. Эффект Баушингера. Упрочнение при образовании твердых растворов и при выделении избыточных фаз (когерентных и некогерентных).

Влияние размера зерна на механические свойства. Сверхпластичность. Неупругость.

Хрупкое и вязкое разрушение. Схемы зарождения трещин. Распространение трещин при хрупком и вязком разрушении. Природа хладноломкости. Порог хладноломкости. Строение изломов.

Ползучесть. Механизмы и стадии ползучести. Релаксация напряжений. Кратковременная и длительная прочность. Влияние состава и структуры сплавов на ползучесть.

Усталостная прочность. Диаграммы усталости. Механизм усталости. Факторы, влияющие на усталостную прочность. Контактная усталость. Износ.

#### *9. Методы исследования и контроля структуры и свойств металлов*

Методы изучения микроструктуры. Световая микроскопия. Методы количественной металлографии. Электронная микроскопия (метод реплик, дифракционная микроскопия фольг, сканирующая микроскопия, микродифракция). Рентгеноструктурный и электронографический анализ. Микрорентгеноспектральный анализ. Локальный анализ состава по электронным спектрам.

Методы измерения физических свойств (термический анализ, калориметрия, дилатометрия, измерение плотности, резистометрия, магнитный анализ и др.). Методы определения коррозионных свойств.

Механические свойства металлов и сплавов. Методы их измерения. Статические и динамические испытания. Испытания на ползучесть, длительную прочность и релаксацию напряжений. Усталостные испытания.

#### *10. Промышленные сплавы (основы легирования и термической обработки, свойства, области применения)*

Стали. Классификация стали по структуре, составу, назначению. Чугуны и их классификация. Модифицирование чугунов.

Алюминий и его сплавы. Титан и его сплавы. Медь и ее сплавы. Никель и его сплавы. Магний и его сплавы. Сплавы на основе тугоплавких металлов.

Сплавы с особыми физическими свойствами: высоким и низким электросопротивлением, магнитно-твердые и магнитно-мягкие стали и сплавы, сплавы с особыми упругими и тепловыми свойствами. Сверхпроводящие сплавы. Сплавы с эффектом запоминания формы и сверхупругости.

### **4.3. Самостоятельная работа**

В курсе запланировано 72 часа на самостоятельную работу аспирантов, которая включает в себя самостоятельную проработку и расширенное изучение материала, систематизацию, закрепление знаний, выполнение заданий и подготовку к сдаче кандидатского экзамена.

## 5. Текущая и промежуточная аттестация. Фонд оценочных средств

### 5.1. Организация текущего контроля освоения материала

Текущий контроль знаний по дисциплине «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» осуществляется в виде устных или письменных опросов по вопросам пройденных тем с периодичностью через 3-4 занятия с использованием вопросов для текущего контроля, а также выполнение заданий, направленных 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. Типы межатомной связи. Электронное строение металлов и металлические свойства.
2. Кристаллическое строение металлов. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Примеры кристаллических структур, отвечающих плотным упаковкам атомов.
3. Кристаллические и аморфные твердые тела. Трансляционная инвариантность. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка.
4. Элементы симметрии кристаллов: повороты, отражения, инверсия, инверсионные повороты, трансляции. Классификация решеток Бравэ.
5. Строение фаз. Связь строения фазы с типом межатомной связи. Правило фаз Гиббса.
6. Двойные, тройные диаграммы состояния.
7. Понятие об обратной решетке и его применение.
8. Точечные дефекты, их образование и диффузия. Законы Фика.
9. Линейные дефекты. Роль дислокаций в пластической деформации. Барьер Пайерлса-Набарро.
10. Распространение волн в кристаллах. Основы дифракционного анализа. Соотношение Вульфа-Брэгга.
11. Классификация фазовых и структурных превращений.
12. Нормальное и сдвиговое (бездиффузионное) фазовые превращения. Стабильные и метастабильные фазы.
13. Термодинамика процессов кристаллизации и твердофазного превращения. Представления о критическом зародыше. Кинетика фазовых превращений.
14. Неупорядоченные и упорядоченные твердые растворы.
15. Скорость кристаллизации и строение металлических слитков.
16. Дендритная и зональная ликвация.
17. Моно- и поликристаллы.
18. Способы обработки металлов давлением.
19. Виды сварки металлов и сплавов. Структура и свойства сварных соединений.
20. Микроструктурные изменения при холодной пластической деформации.

21. Интенсивная пластическая деформация и ее применение для получения ультрамелкозернистых материалов.
22. Классификация видов термической обработки.
23. Предназначение различных видов отжига.
24. Температура рекристаллизации, дорекристаллизационный и рекристаллизационный отжиг.
25. Закономерности и природа изменения механических и физических свойств при отжиге после холодной деформации.
26. Формирование текстуры при различных видах деформационного воздействия. Анизотропия свойств текстурированных металлов.
27. Полиморфизм в металлах. Механизмы полиморфных превращений.
28. Закалка без полиморфного превращения. Изменение структуры и свойств при закалке.
29. Закалка с полиморфным превращением. Микроструктура и субструктура мартенсита.
30. Механизмы бейнитного превращения. Строение бейнита.
31. Микроструктурные изменения при старении и отпуске. Механизмы упрочнения при старении. Деформационное старение.
32. Термомеханическая обработка. Структурные изменения при ТМО. Динамический возврат и рекристаллизация.
33. Низко- и высокотемпературная ТМО. ТМО сталей.
34. Химико-термическая обработка. Виды химико-термической обработки.
35. Технологии термической обработки. Автоматизация полного цикла термической обработки.
36. Дефекты термической обработки: пережог, перегрев, газонасыщение, коробление.
37. Диаграммы деформирования моно- и поликристаллов. Механизмы упругой и пластической деформации. Деформационное упрочнение, влияние на него температуры и скорости деформации.
38. Теория предела текучести. Соотношение Холла-Петча.
39. Структура и свойства мелко- и ультрамелкозернистых металлов и сплавов.
40. Нанокристаллические материалы: основные способы получения и свойства таких материалов.
41. Сверхпластичность: феноменология, механизмы сверхпластической деформации, применение.
42. Хрупкое и вязкое разрушение. Работа разрушения. Природа хладноломкости ОЦК металлов и сплавов.
43. Хрупко-вязкий переход в упорядоченных сплавах. Природа и влияние на него структурных и внешних факторов.
44. Ползучесть. Механизмы и стадии ползучести. Сопротивление ползучести.
45. Усталостная прочность. Механизмы усталостного разрушения. Факторы, влияющие на усталостную прочность.
46. Основные принципы, лежащие в основе современных методов микроструктурного анализа: световой и электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа.
47. Современные методы измерения физических свойств металлов и сплавов.
48. Методы измерения механических свойств металлов и сплавов. Статические и динамические испытания. Существующие ГОСТы на проведение испытаний.

49. Классификация сталей по составу, структуре и назначению. Основные виды термической обработки сталей в зависимости от их назначения.
50. Чугуны и их классификация. Обработка и свойства чугунов.
51. Алюминий и его сплавы. Термоупрочняемые и термонеупрочняемые алюминиевые сплавы. Обработка и применение алюминиевых сплавов.
52. Магниевого сплавы: классификация, способы обработки, применение.
53. Титановые сплавы. Классификация и применение титановых сплавов. Термическая и термомеханическая обработка титановых сплавов.
54. Никелевые сплавы. Основы теории жаропрочности никелевых сплавов. Способы обработки и применение жаропрочных никелевых сплавов.
55. Жаропрочные и сверхжаропрочные сплавы: алюминиды, силициды и проч.
56. Сплавы с особыми физическими свойствами: сверхупругие, сверхпроводящие, с эффектом памяти формы, магнитно-твердые, магнитно-мягкие и др.

#### *Задания для оценки степени сформированности компетенций*

Для демонстрации степени сформированности универсальных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций при изучении дисциплины аспирант самостоятельно выполняет письменное задание, в котором проводит анализ современного состояния, теоретического, методического и инструментального обеспечения, перспектив развития области технологии материалов, к которой относится направление его научных исследований, уровня своих знаний об этой области и направлениях и путях их пополнения по следующей схеме.

1. Дается критический обзор и анализ современного состояния проблемы, различных идей в этой области, их обоснованности в свете современных представлений в области металловедения и термической обработки и сплавов, выдвигаются собственные идеи о возможных путях объяснения, применения явлений (компетенция УК-1).

2. Проводится анализ теоретической обоснованности, степени оптимизации методов и подходов, используемых в данной области (компетенция ОПК-1).

3. Выдвигаются идеи о необходимости и возможностях новых подходов к расчетно-теоретическим и экспериментальным исследованиям проблемы, основанные на знаниях в области металловедения и термической обработки металлов и сплавов (компетенция ПК-1).

4. Выдвигаются идеи о возможности постановки новых задач в области разработки перспективных материалов и технологических процессов, нацеленных на получение полуфабрикатов и деталей с улучшенными физико-механическими свойствами, основанные на знаниях в области металловедения и термической обработки металлов и сплавов (компетенция ПК-2).

5. В соответствии с предложенными в пп. 3 и 4 идеями разрабатывается проект технического задания и программы проведения предполагаемых расчетно-теоретических и экспериментальных работ (ОПК-9).

6. Проводится анализ уровня собственных знаний аспиранта, обоснование перечня разделов программы аспирантуры, которые необходимо ему дополнительно и более углубленно самостоятельно изучить для успешного решения поставленных перед ним задач исследования (компетенция УК-6).

7. На основе выполненной работы делаются выводы.

Письменная работа позволит оценить степень сформированности компетенций аспиранта для выполнения поставленных задач исследования.

## 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 6-го семестра и кандидатского экзамена по специальности 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» в конце 7-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 отрабатывает пропущенные занятия и выполняет задания.

*Зачет* проводится в письменно-устной форме. Аспиранту выдается задание в виде двух вопросов из пройденных за семестр разделов программы кандидатского экзамена по специальности 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов». Зачет проводится в аудитории, время на написание и подготовку к ответам 60 минут.

Оценка «зачтено» выставляется, если аспирант при ответе демонстрирует содержание тем учебной дисциплины, владеет основными понятиями, имеет основательные представления о развитии современного материаловедения, методах исследования металлов и сплавов, фундаментальных соотношениях между структурой и свойствами металлов и сплавов.

Если аспирант при ответе демонстрирует плохое знание значительной части основного материала в области металловедения и термической обработки металлов и сплавов, не информирован или слабо разбирается в темах данной дисциплины, ему выставляется оценка «не зачтено».

*Кандидатский экзамен* проводится в письменно-устной форме. Аспиранту выдается задание в виде билета, составленного из трех вопросов программы кандидатского экзамена по специальности 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов». Экзамен проводится в аудитории, время на написание и подготовку к ответам 90 минут.

Оценка за письменно-устный кандидатский экзамен выставляется по 5-балльной системе экзаменационной комиссией, созданной приказом по ИПСМ РАН. Отдельно выставляется оценка за ответ на каждый из вопросов. На основе выставленных оценок формируется общая оценка за экзамен.

При оценивании ответов выявляются: уровень понимания теоретических основ металловедения и термической обработки металлов и сплавов, знание соотношений между основными свойствами и структурой различных металлов и сплавов, умение обосновать применение тех или иных экспериментальных методов исследований, умение оперировать специальными терминами, принятыми в дисциплине, понимание их смысла.

Оценка «отлично» выставляется при правильном и полном ответе, правильно использующем специальную терминологию и умении отвечать на дополнительные вопросы, непосредственно связанные с темой билета. При этом допускаются небольшие неточности не принципиального характера.

Оценка «хорошо» выставляется при правильном и практически полном ответе, правильно использующем специальную терминологию. При этом допускаются негрубые ошибки в ответе на вопросы билета и в ответах на дополнительные вопросы, непосредственно связанные с темой билета.

Оценка «удовлетворительно» выставляется при неполном ответе, содержащем ошибки в использовании специальной терминологии и понимании принципиальных во-

просов, отсутствии ответов на дополнительные вопросы, непосредственно связанные с темой билета.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется при ответе с грубыми ошибками на все вопросы, незнании специальной терминологии.

Программа кандидатского экзамена по дисциплине приведена в Приложении 1.

## **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. Федотов А.К. Физическое материаловедение. В 3 частях. Часть 2. Фазовые превращения в металлах и сплавах. Высшая школа, 2012. 446 с.
2. Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения. М. Бинوم. Лаборатория знаний, 2009. - 400 с.
3. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. и др. Материаловедение: Учебник для вузов. Под общей редакцией Арзамасова Б.Н., Мухина Г.Г. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, 2003. - 648 с.
4. Гуляев А.П., Гуляев А.А. Металловедение: Учебник для вузов. - М.: Альянс, 2011. - 642 с.
5. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. Учебник // М.: Металлургия, 1986, 480 с.
6. Арзамасов В.Б., Черепяхин А.А. Материаловедение: учебник для вузов. - М.: Экзамен, 2009. - 350 с.

### **7.2. Дополнительная литература**

1. Новиков И.И., Розин К.М. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки. Учебник // М.: Металлургия, 1990, 335 с.
2. Колачев Б.А. и др. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов: Учебник. // М.: Металлургия, 1992, 271 с.
3. Ильин А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. – М.: Наука, 1994. – 303 с.

**ПРОГРАММА**  
**кандидатского экзамена по специальности**  
**05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»**

В основу настоящей программы положены следующие дисциплины: физика и химия материалов (раздел металлические материалы), кристаллография и дефекты кристаллического строения, теория и технология термической обработки, теория гетерогенных сред, моделирование материалов, физические методы исследования, механические свойства металлов. Программа разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии по металлургии и металловедению при участии «МАТИ» – Российского государственного технологического университета им. К.Э. Циолковского.

**1. Строение металлов и сплавов**

Основные типы связи атомов в твердых телах. Металлическая связь. Электронное строение и физические свойства металлов. Поверхность Ферми и зоны Бриллюэна.

Твердые растворы замещения, внедрения и вычитания. Упорядоченные твердые растворы. Электронные соединения, фазы Лавеса,  $\sigma$ -фазы, фазы внедрения. Отклонения от закона Вегарда.

Правило фаз. Диаграммы состояния двойных и тройных систем с непрерывным рядом твердых растворов, с эвтектическими, перитектическими и монотектическими равновесиями, с конгруэнтно и инконгруэнтно плавящимися промежуточными фазами, с полиморфизмом компонентов. Термодинамический анализ диаграмм состояния. Отклонения от равновесия при кристаллизации сплавов в системах разного типа.

**2. Кристаллическое строение и его дефекты**

Основные типы кристаллических решеток. Элементарные ячейки. Индексы направлений и плоскостей в кристаллической решетке. Анизотропия свойств кристаллов.

Типы дефектов кристаллического строения. Точечные дефекты. Дислокации. Дефекты упаковки. Вектор Бюргерса. Плотность дислокаций. Скольжение и переползание дислокаций. Зарождение и размножение дислокаций, источник Франка-Рида. Сила Пайерлса-Набарро. Взаимодействие дислокаций между собой и с примесными атомами. Атмосферы Котрелла, Снука, Сузуки. Дислокационные сетки и малоугловые границы. Высокоугловые границы. Миграция границ и зернограничное проскальзывание. Двойники. Кристаллография и механизм деформационного двойникования.

**3. Фазовые и структурные превращения в металлах и сплавах в твердом состоянии**

Механизмы миграции атомов. Законы Фика. Коэффициент диффузии. Структурно чувствительные процессы диффузии. Диффузия во внешних силовых полях.

Классификация фазовых и структурных превращений. Фазовые превращения I и II рода. Гомогенный и гетерогенный механизмы зарождения. Строение и механизм движения поверхностей раздела фаз. Сдвиговое (бездиффузионное) и нормальное (диффузионное) превращения. Термодинамический и кристаллографический анализ сдвигового (мар-

тенситного) превращения. Механизм и кинетика сдвиговых и нормальных превращений. Эвтектоидное превращение. Механизм и кинетика эвтектоидного превращения. Диаграммы фазовых превращений (термокинетические, изотермические и др.).

Упорядочение твердого раствора. Дальний и ближний порядок. Изменение свойств сплавов при упорядочении. Образование и распад метастабильных фаз. Распад пересыщенного твердого раствора. Спинодальный распад. Термодинамика образования промежуточных фаз. Структурные изменения при старении (кластеры, зоны Гинье-Престона, промежуточные метастабильные фазы, модулированные структуры). Когерентные, частично когерентные и некогерентные выделения. Формы выделений. Непрерывный и прерывистый распад.

#### **4. Металлургические процессы получения полуфабрикатов и изделий**

Виды технологии литейного производства. Структура и свойства жидких металлов. Гомогенное и гетерогенное зарождение кристаллов, критический размер зародыша. Концентрационное переохлаждение. Эвтектическая кристаллизация. Влияние скорости кристаллизации на строение сплавов. Строение металлического слитка. Модифицирование структуры литых сплавов. Образование метастабильных фаз при кристаллизации. Бездиффузионная кристаллизация. Металлические стекла. Методы получения монокристаллов из расплава. Metallургия гранул.

Способы обработки металлов давлением. Влияние температуры, схемы и степени деформации на сопротивление деформации, структуру и свойства металлов и сплавов.

Виды сварки металлов и сплавов. Структура и свойства сварных соединений.

#### **5. Термическая обработка**

Классификация видов термической обработки.

Гомогенизационный отжиг. Изменение структуры и свойств сплавов при гомогенизационном отжиге.

Дорекристаллизационный и рекристаллизационный отжики. Отдых. Полигонизация. Первичная, собирательная и вторичная рекристаллизация. Механизм и кинетика отдыха, полигонизации и рекристаллизации, влияние на них предшествующей пластической деформации, примесей, температуры и продолжительности отжига. Параметры полигонизованной и рекристаллизованной структур. Критическая степень деформации. Диаграммы рекристаллизации. Закономерности и природа изменения механических и физических свойств при отжиге после холодной деформации. Текстура деформации, первичной, собирательной и вторичной рекристаллизации, механизм ее образования. Анизотропия свойств текстурированных металлов.

Отжиг для уменьшения остаточных напряжений. Механизм снижения остаточных напряжений при нагревании.

Фазовые превращения при нагреве. Структурная наследственность.

Закалка без полиморфного превращения. Изменение структуры и свойств при закалке.

Закалка с полиморфным превращением. Микроструктура и субструктура мартенсита. Упрочнение и изменение пластичности при закалке на мартенсит. Критическая скорость охлаждения при закалке, прокаливаемость.

Бейнитное превращение. Строение бейнита. Изотермическая закалка.



Старение. Природа упрочнения при старении. Влияние температуры и продолжительности старения на механические и физические свойства сплавов. Перестаривание, ступенчатое старение. Влияние температуры нагрева под закалку и скорости охлаждения на формирование структуры и свойств сплавов при старении.

Отпуск. Изменение микроструктуры, субструктуры и фазового состава при отпуске. Обратимая и необратимая отпускная хрупкость.

## **6. Термомеханическая обработка. Химико-термическая обработка**

Термомеханическая обработка. Структурные изменения при пластической деформации. Динамическая полигонизация и динамическая рекристаллизация. Возврат и рекристаллизация после горячей деформации.

Высокотемпературная и низкотемпературная термомеханическая обработка. Термомеханическая обработка дисперсионно-твердеющих сплавов.

Химико-термическая обработка. Элементарные процессы при химико-термической обработке. Структура диффузионных слоев и ее связь с диаграммой состояния.

Азотирование, цементация, нитроцементация, алитирование, хромирование, борирование, сульфидирование, силицирование. Термоводородная обработка.

## **7. Технология термической обработки**

Современное оборудование для закалки, отжига, отпуска, химико-термической и других видов термической обработки сталей и сплавов.

Агрегаты непрерывного отжига и закалки. Автоматизация полного цикла термической обработки.

Способы достижения высоких скоростей нагрева и охлаждения изделий при термической обработке. Внутренние напряжения и деформация изделий при термической обработке. Нагрев при термической обработке изделий в защитных средах и вакууме.

Дефекты термической обработки. Газонасыщение и его влияние на структуру и свойства сплавов. Методы борьбы с поводками и короблением.

## **8. Упругая и пластическая деформация. Разрушение**

Диаграммы деформирования моно- и поликристаллов, многофазных сплавов. Механизмы упругой и пластической деформации. Деформационное упрочнение, влияние на него температуры и скорости деформации. Теория предела текучести. Эффект Баушингера. Упрочнение при образовании твердых растворов и при выделении избыточных фаз (когерентных и некогерентных).

Влияние размера зерна на механические свойства. Сверхпластичность. Неупругость.

Хрупкое и вязкое разрушение. Схемы зарождения трещин. Распространение трещин при хрупком и вязком разрушении. Природа хладноломкости. Порог хладноломкости. Строение изломов.

Ползучесть. Механизмы и стадии ползучести. Релаксация напряжений. Кратковременная и длительная прочность. Влияние состава и структуры сплавов на ползучесть.

Усталостная прочность. Диаграммы усталости. Механизм усталости. Факторы, влияющие на усталостную прочность. Контактная усталость. Износ.

## **9. Методы исследования и контроля структуры и свойств металлов**

Методы изучения микроструктуры. Световая микроскопия. Методы количественной металлографии. Электронная микроскопия (метод реплик, дифракционная микроскопия фольг, сканирующая микроскопия, микродифракция). Рентгеноструктурный и электронографический анализ. Микрорентгеноспектральный анализ. Локальный анализ состава по электронным спектрам.

Методы измерения физических свойств (термический анализ, калориметрия, дилатометрия, измерение плотности, резистометрия, магнитный анализ и др.). Методы определения коррозионных свойств.

Механические свойства металлов и сплавов. Методы их измерения. Статические и динамические испытания. Испытания на ползучесть, длительную прочность и релаксацию напряжений. Усталостные испытания.

## **10. Промышленные сплавы (основы легирования и термической обработки, свойства, области применения)**

Стали. Классификация стали по структуре, составу, назначению. Чугуны и их классификация. Модифицирование чугунов.

Алюминий и его сплавы. Титан и его сплавы. Медь и ее сплавы. Никель и его сплавы. Магний и его сплавы. Сплавы на основе тугоплавких металлов.

Сплавы с особыми физическими свойствами: высоким и низким электросопротивлением, магнитно-твердые и магнитно-мягкие стали и сплавы, сплавы с особыми упругими и тепловыми свойствами. Сверхпроводящие сплавы. Сплавы с эффектом запоминания формы и сверхупругости.