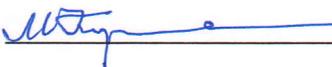


МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ имени М.Н. Михеева  
Уральского отделения Российской академии наук

СОГЛАСОВАНО  
зам. директора института  
по научной работе  
доктор физ.-мат. наук

 М.А. Коротин

« 01 » сентября 2025 г.



УТВЕРЖДАЮ  
Директор института  
академик РАН

 Н.В. Мушников

« 02 » сентября 2025 г.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА-МИНИМУМ  
кандидатского экзамена по специальности

**2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов**  
по техническим наукам

Специализация: **Методы упрочнения металлических материалов.**  
**Методы исследования фазовых превращений и**  
**структуры металлов и сплавов.**

Екатеринбург  
2025

## **Основы металловедения и термической обработки**

Полиморфизм железа, влияние на него легирующих элементов. Диаграммы состояния железо-цементит и железо-углерод. Стали и чугуны. Диаграммы состояния в двухкомпонентных системах, фазовый состав и структурное состояние. Основные операции термической обработки, их назначение и физический смысл. Отжиг, виды отжига. Гомогенизация. Нормализация. Закалка. Отпуск. Превращения переохлажденного аустенита. Изотермические и термокинетические диаграммы. Понятие о прокаливаемости и закаливаемости. Внутренние и остаточные напряжения и их устранение при отжиге. Отпускная хрупкость. Внутренняя адсорбция примесей по В.И. Архарову. Перегрев стали, его проявление и исправление. Структурная наследственность при термической обработке стали. Методы упрочнения стали: наклеп, закалка, старение. Новые методы упрочнения: термомеханическая обработка (ВТМО, НТМО, ПТМО), механико-термическая обработка, фазовый наклеп. Основные способы деформационной обработки стали (ИПД, прокатка, волочение, экструзия), деформированная структура металла. Мартенситно-старяющие стали. Трип-эффект (пластичность, связанная с развитием мартенситного превращения под действием деформации). Стали бейнитного класса. Стали аустенитного класса. Стали перлитного класса.

### **Структурные изменения при отжиге деформированных сплавов**

Классификация процессов при отжиге деформированных (наклепанных) металлов и сплавов. Изменение свойств при отжиге. Возврат. Полигонизация. Дислокационная структура малоугловых драниц. Субструктура и методы субструктурного упрочнения, рекристаллизация обработки (первичная рекристаллизация). Влияние различных факторов (состав, температура, время, степень деформации, малые примеси, посторонние частицы) на кинетику рекристаллизации. Формула А.А. Бочвара. Критическая степень деформации, Соотношение полигонизации и рекристаллизации и роль структуры дислокации (энергии дефектов упаковки). Текстуры рекристаллизации. Рост зерен. Вторичная

рекристаллизация и влияние на нее дисперсных фаз. Горячая пластическая деформация. Динамическая рекристаллизация.

### **Фазовые превращения в металлах и сплавах**

Равновесные диаграммы состояния и метастабильные состояния. Типы фазовых превращений в металлах. Кристаллизация. Физическая причина переохлаждения. Образование зародышевых центров и их диффузионный рост. Ликвация в сплавах. Выращивание монокристаллов из расплава. Зонная очистка. Аморфное состояние. Фазовые превращения в твердом состоянии. Полиморфные превращения. Распад пересыщенных твердых растворов. Старение. Эвтектоидное превращение. Упорядочение. Спинодальный распад. Образование модулированных структур. Кинетика диффузионных превращений. Массивные превращения. Бездиффузионные мартенситные превращения. Термодинамика и кинетика мартенситных превращений. Кристаллография мартенситных превращений. Ориентационные соотношения Курдюмова – Закса. Различные типы мартенсита. Термоупругий мартенсит. Эффект памяти формы. Влияние давления и магнитного поля на фазовые превращения. Магнитные превращения. Принципы термической обработки металлических сплавов.

### **Основы металлографии**

История развития металлографического метода. Работы П.П. Аносова, Д.К. Чернова, Г. Сорби, Ф. Осмонда. Методы изучения строения металлов и сплавов. Макроструктурный анализ, фрактография, понятие о зерне, границы зерен, их форма и величина. Оптический микроскоп, его основные узлы, разрешающая способность. Высокотемпературная металлография. Количественная металлография. Статистическая обработка результатов измерения.

### **Дифракционные методы изучения структуры**

Взаимодействие электронов с веществом (поглощенные, упруго-рассеянные (ПЭМ), обратно-рассеянные (СЭМ), вторичные (СЭМ), рентгеновские лучи

(ЭМА), электроны, потерявшие часть энергии (СПЭ), волны де Бройля, факторы интенсивности). Понятие об обратной решетке и дифракционная картина. ПЭМ. Основные узлы микроскопа, разрешающая способность, принципы формирования изображения, дифракционная картина.

Сканирующая электронная микроскопия (МАР, РЭМ, Оже-спектроскопия, ДОЭ, рентгеноструктурный, рентгеноспектральный анализ, топографические методы). Микроскопия высокого разрешения. Методы определения симметрии, параметров решетки, фазового состава, определение ориентировки и текстуры. Особенности рассеяния рентгеновских лучей на кристаллах с дефектами, модулированных периодических структурах, упорядоченных сплавах. Микронзондовый анализ. Дифракция электронов на кристаллах. Дифракционная электронная микроскопия. Структурная и магнитная нейтронография. Электронный и ионный проекторы.

### **Физические методы исследования**

Тепловые свойства. Теплоемкость твердых тел. Термический анализ. Магнитные свойства. Доменная структура. Намагниченность. Коэрцитивная сила. Магнитометры. Магнитный структурный анализ. Электрические свойства. Метод электросопротивления в металловедении. Термоэлектрические свойства. Метод термоэлектродвижущей силы в металловедении. Дилатометрия и определение плотности. Метод ЯГР (эффект Мессбауэра). Основы метода. Особенности спектров ЯГР, ЯГР-спектрометры. Применение метода ЯГР. Внутренне трение. Понятие о релаксационном спектре. Температурная и частотная зависимость внутреннего трения. Основные методы измерения. Амплитудно-зависимое внутренне трение. Возможности использования внутреннего трения в металловедении.

### **Механические свойства металлов и сплавов**

Оценка механических свойств. Основные виды механических испытаний. Диаграмма растяжения. Характеристики прочности и пластичности. Твердость и

методы её измерения. Твердорастворное упрочнение. Разрушение металлов. Вязкое и хрупкое разрушение. Влияние скорости нагружения на сопротивление пластической деформации и разрушение. Большие пластические деформации. Ротационные моды. Сверхпластичность. Пластичность и вязкость. Испытания на удар, чувствительность к концентраторам напряжений. Влияние температуры испытания на сопротивление деформации и разрушению. Ползучесть. Дислокационный механизм деформации при ползучести. Длительная прочность, предел ползучести. Жаропрочность и жаростойкость. Релаксация напряжений. Хладноломкость металлов. Пластическая деформация монокристаллов. Особенности деформации многокомпонентных сплавов и композитов. Усталость металлов. Влияние среды на механические свойства. Основные представления о коррозии. Коррозия под напряжением. Кавитационное разрушение. Эффект Ребиндера.

### Основная литература

1. **Баррет Чарльз С., Массальский Т.Б.**

**Структура металлов: В 2-х т./ Пер.с англ.А.М.Бернштейна и С.В.Добаткина; Под ред.М.Л.Бернштейна.-Т.1.-** М.: Металлургия, 1984.- 352с.:ил.- Structure of metals/C.S.Barret,Т/В/Massalski,3d rev.ed(Oxford ets).

2. **Баррет Чарльз С., Массальский Т.Б. Структура металлов: В 2-х т./ Пер.с англ.А.М.Бернштейна и С.В.Добаткина; Под ред.М.Л.Бернштейна.-Т.2.-** М.: Металлургия, 1984.- с. 355 - 686. Structure of metals/C.S.Barret,Т.В.Massalski,3d rev.ed(Oxford ets).

3. **Бозорт Р.**

**Ферромагнетизм / Пер.с англ.; Под ред.Е.И.Кондорского и Б.Г.Лившица.** - М.: Изд-во иностр.лит., 1956. - 784 с.: ил. - Пер.изд.: Ferromagnetism/ R.Vozorth(Toronto ets.,1951). - Библиогр.: с.700-758.

4. **Гинье А.**

**Рентгенография кристаллов: Теория и практика/ Пер. с франц. Е.Н.Беловой и др.; Под ред. Н.В.Белова.** - М.: Физматгиз, 1961. - 604 с.: ил.

5. **Гудремон Э.**

**Специальные стали/ Пер. с нем. Под ред. А.С.Займовского, М.Л.Бернштейна, В.С.Меськина.** - Изд.2-е, сокр. и перераб. - Т.1. - М.: Металлургия, 1966. - 736с.: ил.

6. **Гудремон Э.**  
**Специальные стали/ Пер. с нем. Под ред. А.С.Займовского, М.Л.Бернштейна, В.С.Меськина. - Изд.2-е, сокр. и перераб. - Т.2. - М.: Металлургия, 1966. - с.741-1274.**
7. **Закалка стали в магнитном поле / М.А.Кривоглаз, В.Д.Садовский, Л.В.Смирнов, Е.А.Фокина; Отв.ред.К.Б. Власов; АН СССР. УНЦ. Ин-т физики металлов. - М.: Наука, 1977. - 120 с.: ил.**
8. **Штейнберг С.С.**  
**Металловедение/ Под ред. И.Н.Богачева и В.Д.Садовского. - Изд.перераб. и доп. - Свердловск: Metallurgizdat, 1961. - 598 с.**
9. **Металловедение и термическая обработка стали: Справочник / Под ред. М.Л.Бернштейна и А.Г.Рахштадта. -В 3-х т. - Изд. 3-е, перераб. и доп. - Т.1: Методы испытаний и исследования/ Б.С.Бокштейн, Ю.Г.Векслер, М.И.Виноград и др. - М.: Металлургия, 1983. - 352с.: ил.**
10. **Металловедение и термическая обработка стали: Справочник / Под ред. М.Л.Бернштейна и А.Г.Рахштадта. -В 3-х т. - Изд. 3-е, перераб. и доп. - Т.2: Основы термической обработки. - М.: Металлургия, 1983. - 352с.**
11. **Металловедение и термическая обработка стали: Справочник / Под ред. М.Л.Бернштейна и А.Г.Рахштадта. -В 3-х т. - Изд. 3-е, перераб. и доп. - Т.3: Термическая обработка металлопродукции/ М.Л. Бернштейн, Ю.М.Брунзель, С.А.Голованенко и др. - М.: Металлургия, 1983. - 215с. : ил.**
12. **Кузьмичев Д.А., Радкевич И.А., Смирнов А.Д.**  
**Автоматизация экспериментальных исследований : [Учеб. пособие для вузов] - Москва : Наука, 1983. - 391 с. : ил.**
13. **Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И.**  
**Превращения в железе и стали. - М.: Наука, 1977. - 236 с.: ил.**
14. **Лившиц Б.Г.,Крапошин В.С., Линецкий Я.Л.**  
**Физические свойства металлов и сплавов: Учеб. для металлург. спец.вузов/ Под ред.Б.Г.Лившица. - Изд.2-е, доп. и перераб. - М.: Металлургия, 1980. - 320 с.: ил.**
15. **Малышев К. А. Фазовый наклеп аустенитных сталей //Труды института физики металлов АН СССР. – 1968. – №. 27. – С. 385-400.**
16. **Приборы и методы физического металловедения/ Под ред. Ф.Вейнберга; Пер. с англ.; Предисл. В.Н.Колесникова. - М.: Мир, 1974. - 364с.**
17. **Садовский В.Д.**  
**Структурная наследственность в стали / Под ред. М.Л. Бернштейна и И.И.Новикова. - М.: Металлургия, 1973. - 205 с.: ил. - (Сер."Успехи современного металловедения").**

18. **Соколов Е. Н., Садовский В. Д. Высокотемпературная термомеханическая обработка металлов и сплавов //ФММ. – 1965. – Т. 19. – №. 2. – С. 226.**
19. **Уманский Я.С.**  
**Рентгенография металлов: Учеб. для вузов по спец."Физ.-хим. исследования металлург. процессов" и "Физика металлов".- М.: Металлургия, 1967. - 235 с.: ил.**
20. **Утевский Лев Маркович**  
**Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. - М.: Металлургия, 1973. - 583 с.:ил.**
21. **Фазовый наклеп аустенитных сплавов на железоникелевой основе / К.А.Малышев, В.В.Сагарадзе, И.П.Сорокин, Н.Д.Земцова, В.А.Теплов, А.И.Уваров; Отв. ред. В.Д.Садовский; АН СССР. УНЦ. Ин-т физики металлов. - М.: Наука, 1982. - 260 с.**
22. **Штремель М.А.**  
**Прочность сплавов. Учебное пособие для вузов. Ч. 2. Деформация. – Москва : МИСиС, 1997.527 с.**
23. **Счастливец В. М., Зельдович В. И.**  
**Физические основы металловедения. – Институт физики металлов УрО РАН. - Том. 9. - Сер. Научно-образовательная серия «Физика конденсированных сред». 2015.**

#### **Дополнительная литература**

1. **Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М.**  
**Металлофизика высокопрочных сплавов: Учеб. пособие для вузов по спец. "Физика металлов".- М.: Металлургия, 1986. - 311 с.: ил.**
2. **Новиков И.И.**  
**Теория термической обработки металлов: Учеб. для вузов по спец."Металловедение,оборуд.и технология терм.обrab. металлов". 4-е изд.,перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1986. - 480 с.:ил.**
3. **Рыбин В.В.**  
**Большие пластические деформации и разрушение металлов. - М.: Металлургия, 1986. - 224с.**
4. **Садовский В. Д., Фокина Е. А.**  
**Остаточный аустенит в закаленной стали / Отв.ред. В.М.Счастливец; АН СССР. УНЦ. Ин-т физики металлов. - М.: Наука, 1986. - 112 с.: ил.**
5. **Гольдштейн М.И. Специальные стали.**  
**Издательство: МИСИС Год: 1999.**