

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

« 07 » сентября 2025 г.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА-МИНИМУМ
кандидатского экзамена по специальности
1.3.8. Физика конденсированного состояния
по физико-математическим наукам

Специализация: **Основы металловедения и термической
обработки**

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 закаливании. 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. Низкоуглеродистые экономнолегированные стали для судостроения и трубной промышленности. Связь структурно-фазового состояния с комплексом механических свойств.

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. Количественная металлография. Статистическая

обработка результатов измерения. Использование программных комплексов для количественной оценки параметров микроструктуры.

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, ДООЭ, 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 разрушению. 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.2.- М.: Металлургия, 1984.- с. 355 - 686. Structure of metals/C.S.Barret, T.V.Massalski, 3d rev.ed(Oxford ets).
2. **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.
3. **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.
4. **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.

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.2. - М.: Металлургия, 1966. - с.741-1274.

6. 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.

7. Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. - М.: Наука, 1977. - 236 с.: ил.

8. 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.

9. Кузьмичев Д.А., Радкевич И.А., Смирнов А.Д. Автоматизация экспериментальных исследований : [Учеб. пособие для вузов] / М.: Наука, 1983. - 391 с. : ил.;

10. 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.

11. Малышев К. А.

Фазовый наклеп аустенитных сталей //Труды Института физики металлов АН СССР. – 1968. – №. 27. – С. 385-400.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. Приборы и методы физического металловедения/ Под ред. Ф.Вейнберга; Пер. с англ.; Предисл. В.Н.Колесникова. - М.: Мир, 1974. - 364с.

16. 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").

17. Соколков Е. Н., Садовский В. Д.

Высокотемпературная термомеханическая обработка металлов и сплавов
//ФММ. – 1965. – Т. 19. – №. 2. – С. 226.

18. **Уманский Я.С.**

Рентгенография металлов: Учеб. для металлург. вузов и фак. - М.: Металлургиздат, 1960. - 448 с.: ил.; 1 л. граф.

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. **Штейнберг С.С.**

Металловедение. - Т.1: Общее металловедение. - Свердловск-М.-Л.: Металлургиздат, 1934. - 264 с.

22. **Штейнберг С.С.**

Металловедение. - Т.2: Железо - сталь - чугун. - Свердловск - М.-Л.: Металлургиздат, 1933. - 336 с.

23. **Штейнберг С.С.**

Металловедение. - Т.3: Специальные стали. - Свердловск-М.: ОНТИ, 1935. - 264 с.

24. **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. **Специальные стали / Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. - М.: Металлургия, 1985. - 408 с.**

2. **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.

3. **Новиков И.И.**

Теория термической обработки металлов: Учеб. для вузов по спец. "Металловедение, оборуд. и технология терм. обраб. металлов". 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1986. - 480 с.: ил.

4. **Рыбин В.В.**

Большие пластические деформации и разрушение металлов. - М.: Металлургия, 1986. - 224 с.

5. **Садовский Виссарион Дмитриевич, Фокина Елена Александровна**
Остаточный аустенит в закаленной стали / Отв. ред. В.М.Счастливец; АН СССР. УНЦ. Ин-т физики металлов. - М.: Наука, 1986. - 112 с.: ил.