



ВНИИНМ  
РОСАТОМ

Акционерное общество  
«Высокотехнологический научно-исследовательский институт  
неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара»  
(АО «ВНИИНМ»)

**УТВЕРЖДАЮ**

Генеральный директор

АО «ВНИИНМ»

Л.А. Карпюк

2022 г.



**ПРОГРАММА**

КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА ПО СПЕЦИАЛЬНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ

**2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов**

(технические науки)

Москва 2022

## **Часть 1. ОСНОВНАЯ ПРОГРАММА**

### **1. Виды связи в твердых телах. Электронное строение металлов**

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

### **2. Твердые растворы**

Твердые растворы замещения, внедрения и вычитания. Упорядоченные твердые растворы. Промежуточные фазы внедрения. Сверхструктуры.

### **3. Фазы. Диаграммы состояния**

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. Отклонения от равновесия при кристаллизации сплавов в системах разного типа.

### **4. Кристаллическое строение металлов**

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

### **5. Дефекты кристаллического строения**

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. Типы границ зерен (наклона, кручения, смешанного типа). Высокоугловые границы. Миграция границ и зернограничное проскальзывание. Двойники. Кристаллография и механизм деформационного двойникования.

### **6. 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 переходы I и II рода. Гомогенный и гетерогенный механизмы зарождения. Сдвиговое (бездиффузионное) и нормальное (диффузионное) 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. Структурные изменения при старении (кластеры, зоны Гинье-Престона, промежуточные метастабильные фазы, модулированные структуры). Когерентные, частично когерент-

ные и некогерентные выделения. Формы выделений. Непрерывный и прерывистый распад.

## **7. Плавка и литье металлических материалов.**

### **Кристаллизация металлов**

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.

## **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. Обработка металлов давлением**

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

## **10. Сварка**

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

## **11. Термическая обработка и ее виды**

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 холод-

ной 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.

## **12. 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.

## **13. Технология термической обработки**

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

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.

## **14. 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 коррозионной стойкости металлических материалов.

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

Поверхность. Методы обработки и исследования: Методы функциональной обработки поверхности; Методы исследования поверхности.

### **15. 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.

### **16. Влияние облучения на структуру и свойства металлов и сплавов**

Механизмы образования точечных дефектов при различных видах воздействия (закалка, пластическая деформация, ударная волна, облучение).

Особенности процессов атомных смещений при электронном, протонном, нейтронном и  $\gamma$ -облучении. Упругое соударение. Пороговые энергии смещения, каскады атомных соударений первично выбитых атомов (ПВА). Эволюция каскадов с повышением энергии ПВА.

Механизм накопления и отжига радиационных дефектов в металлах при температурах I–IV стадий возврата. Радиационный отжиг в дефектов. Взаимодействие собственных дефектов с примесями.

ТЭМ – исследования облучённых материалов. (ТЭМ – трансмиссионная электронная микроскопия). Дислокации, дислокационные петли, кластеры. Структурные изменения в облучённых материалах при отжиге.

Влияние дефектов на макроскопическое поведение облучённых материалов – упрочнение, охрупчивание, радиационный рост, набухание, ползучесть.

Радиационное упрочнение металлов и сплавов. Параметры, характеризующие упрочнение кристаллических тел. Низкотемпературное радиационное охрупчивание (НТРО). Сдвиг порога хладноломкости стали вследствие облучения.

Высокотемпературное радиационное охрупчивание (ВТРО). Зернограничный характер разрушения при ВТРО. Влияние легирования на эффект ВТРО. Влияние примесей на эффект ВТРО. Тритиевый трюк. Современные представления о механизме ВТРО.

Радиационное набухание металлов и сплавов. Факторы, определяющие набухание: температура облучения; доза повреждения; скорость повреждения. Механизмы набухания.

Изменение структуры материалов при облучении.

Влияние самооблучения на структуру и свойства делящихся материалов.

Накопление продуктов ядерных реакций в материалах при нейтронном облучении.

Имитация влияния реакторного облучения на ускорителях заряженных ча-

стиц. Корреляция различного вида облучений.

## **Часть 2. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА кандидатского экзамена по специальности 2.6.1**

### **Металлы и сплавы, используемые в атомной технике**

#### **1. Сплавы на основе железа и никеля**

Требования к конструкционным материалам, применяемым в реакторостроении. Классификация сталей и сплавов. Принципы выбора материала для оболочек ТВЭЛов.

Ядерно-физические свойства сталей и сплавов.

Механические свойства сталей и сплавов различных классов.

Коррозионное поведение сплавов в различных теплоносителях: вода под давлением, водяной пар, расплавленные жидкие металлы: (*Li, Na, Pb, Pb-Bi*). Коррозия под напряжением. Межкристаллитная коррозия. Перенос масс.

Совместимость конструкционных материалов с ядерным топливом.

Технологии производства, термомеханической обработки и сварки нержавеющих сталей и высоконикелевых сплавов.

#### **2. Сплавы на основе циркония**

Цирконий в ядерной энергетике. Ядерные свойства циркония. Циркониевые компоненты ТВС реакторов на тепловых нейтронах с водяным теплоносителем. Условия эксплуатации. Требования к изделиям.

Производство циркония реакторной чистоты. Примеси в цирконии и их влияние на свойства. Требования к химическому составу циркония реакторной чистоты.

Основы легирования циркония для работы в реакторах. Влияние легирующих элементов на свойства циркония. Фазовые диаграммы состояния с примесными и легирующими элементами. Коммерческие сплавы и их модификации для активных зон реакторов.

Основные технологические процессы изготовления изделий из сплавов. Требования к изделиям. Влияние режимов и параметров основных технологических операций на свойства изделий.

Эксплуатационные характеристики изделий и их зависимость от состава, структурно-фазового состояния и внутриреакторных условий:

- равномерная и очаговая коррозия;
- гидрирование;
- радиационный рост и ползучесть;
- механические свойства;
- структурно-фазовое состояние.

Поведение в условиях LOCA. Проблема устойчивого к авариям «толерантного топлива» и пути ее решения.

Влияние наводороживания на структуру, механические свойства и гидридное растрескивание циркониевых сплавов.

### 3. Титан и его сплавы

Области применения титана и его сплавов.

Структурная классификация титановых сплавов. Диаграммы состояния двойных титановых сплавов.

Принципы легирования титана. Промышленные сплавы титана.

Особенности структурных превращений титановых сплавов и определение температуры полиморфного превращения по диаграммам состояния с учетом влияния  $\alpha$ - и  $\beta$ -стабилизирующих элементов и элементов внедрения.

Ядерные, физические, механические и технологические свойства титана и его сплавов.

Влияние термической и термомеханической обработки на структуру и свойства сплавов титана.

Закономерности формирования структуры в процессе многооперационной обработки титановых сплавов.

Коррозионная стойкость титановых сплавов. Виды коррозионного разрушения титановых сплавов в различных условиях эксплуатации.

### 4. Материалы термоядерных реакторов (ТЯР)

Реакции термоядерного синтеза. Энергетика. Магнитное и инерциальное удержания плазмы.

Условия работы материалов ТЯР. Критерии оценки работоспособности материалов в условиях ТЯР.

Материалы для первой стенки и blankets. Термомеханические напряжения. Нейтронная нагрузка. Воздействие плазмы. Взаимодействие конструкционных материалов с изотопами водорода. Влияние изотопов водорода на функциональные свойства материалов.

Возможности использования различных материалов в конструкциях энергетических ТЯР. Малоактивируемые конструкционные материалы. Теплоносители.

Сплавы ванадия. Феритно-мартенситные стали. Композиционные материалы. Бериллий.

Тритий-воспроизводящие материалы.

Материалы для магнитной системы.

### 5. Уран и его сплавы

Способы получения урановых материалов. Способы выплавки и восстановления урана и его сплавов. Плотность, теплоемкость, тепло- и электропроводность, термическое расширение урана и его сплавов. Структурные характеристики, физические и механические свойства урана и его сплавов.

Основные сплавы урана, типы диаграмм, фазовые равновесия. Сплавы систем U-Mo, U-Zr, U-Nb, U-Al, U-Si. Способы получения и применение различных сплавов урана.

Поведение урановых материалов под облучением. Свеллинг. Радиационный рост урановых материалов. Влияние структуры и свойств урана на его поведение под облучением. Дореакторные и послереакторные испытания.

Механизмы деформации и текстуры урановых материалов. Принципы формирования структуры и свойств изделий из урановых материалов. Влияние термической и термомеханической обработки на структуру и свойства урана и

его сплавов.

Проблемы устойчивого к авариям «толерантного топлива», металлическое и дисилицидное топливо. Проблема совместимости с оболочкой твэла и пути ее решения.

Коррозионное поведение урана и его сплавов на воздухе и в воде.

## 6. Плутоний и его сплавы

Строение атома плутония. Природа межатомной связи в металлах актиноидной группы. Положение плутония в периодической системе элементов. Лантаноиды и актиноиды как металлы, их сходство и различие. Изотопы плутония.

Кристаллическая структура и аллотропические превращения плутония. Кинетика превращений.

Получение плутония, его ядерные, физические и механические свойства. Связь между кристаллической структурой и анизотропией свойств.

Влияние давления на структуру плутония. P - T – диаграмма плутония.

Влияние ЦТО через  $\alpha \leftrightarrow \beta$  превращение на структуру и свойства плутония.

Принципы легирования плутония. Диаграммы состояния плутония с алюминием, галлием, углеродом, кремнием, азотом, кислородом, водородом, марганцем, железом, кобальтом, никелем, медью, цирконием, ураном и нептунием. Фазовые превращения в сплавах плутония с алюминием, галлием, цирконием и ураном. Равновесные и нестабильные варианты диаграмм состояний плутония с алюминием и галлием.

Влияние легирующих элементов на структуру и свойства плутония. Рекристаллизация сплавов на основе  $\delta$ -плутония. Кинетика превращений в сплавах плутония с ураном, цирконием, галлием. Термическая обработка сплавов плутоний – галлий.

Влияние самооблучения на структуру и свойства плутония и его сплавов.

Коррозионное поведение плутония на воздухе при различных температурах.

Влияние реакторного облучения на плутоний и его сплавы.

Совместимость плутония и его сплавов с конструкционными материалами.

Использование плутония, его сплавов и соединений как материалов ядерного топлива.

Структура и физические свойства нептуния и трансплутониевых элементов.

## 7. Бериллий

Бериллий, кристаллическое строение: тип решётки, механизмы деформации и разрушения бериллия.

Физические основы легирования бериллия и его сплавов. Методы получения сплавов бериллия. Диаграммы состояния двойных систем бериллия с кислородом, железом, алюминием, кремнием, кальцием, магнием, титаном.

Влияние кислорода, железа, алюминия и кремния на структуру и свойства бериллия при комнатной и повышенных температурах.

Влияние термообработки на структуру бериллия. Старение.

Получение металлического бериллия. Технический, рафинированный, литой бериллий. Порошки бериллия.

Деформированный бериллий. Классификация и маркировка промышленных сортов бериллия. Механическая обработка бериллия. Ядерные, физические, хи-



мические и механические свойства изделий из бериллия.

Влияние режимов деформации на структуру и свойства изделий из бериллия. Текстура.

Коррозия бериллия в атмосферных условиях. Методы повышения коррозионной стойкости бериллия. Сплавы бериллия с повышенной коррозионной стойкостью.

Влияние облучения на структуру и свойства бериллия.

## 8. Сверхпроводящие материалы

Сущность явления сверхпроводимости. Принципиальные свойства сверхпроводников: критическое поле, температура перехода в сверхпроводящее состояние, критический ток. Фазовая диаграмма: ток – магнитное поле – температура.

Области применения. Требования к материалам для сверхпроводящих устройств. Классификация и свойства технических сверхпроводников (НТСП и ВТСП). Основные типы промышленных сверхпроводников.

Ниобий – титановые сплавы: фазовая диаграмма и центры пиннинга. Процесс изготовления композиционных проводников на основе ниобий-титанового сплава.

Сверхпроводники на основе интерметаллидов со структурой А-15. Особенности фазовых диаграмм – ниобий – олово, медь – олово, ниобий – медь – олово. Кристаллическая структура и центры пиннинга. Методы изготовления. Диффузионный отжиг, кинетика роста и особенности морфологии микроструктуры сверхпроводящей фазы при термообработке. Контроль качества сверхпроводников.

Классификация ВТСП соединений. Кристаллическая структура и фазовый состав ВТСП-1. Анизотропия свойств. Механизмы сверхпроводимости ВТСП. Критические токи ВТСП-1 и их зависимость от магнитного поля. Методы получения ВТСП-1.

Особенности метода получения и свойства объемной керамики на основе  $YBaCuO$ .

Методы получения и свойства высокоточных длинномерных ленточных проводников ВТСП 2-го поколения на основе  $Y-123$ , факторы, определяющие их критическую плотность тока и свойства.

Композиционные проводники на основе диборида магния ( $MgB_2$ ) и оксидов, методы получения и факторы, определяющие их критическую плотность тока. Области применения.

## ЛИТЕРАТУРА К ОСНОВНОЙ ПРОГРАММЕ

1. Бочвар А.А. Основы термической обработки сплавов: учебник для вузов/А.А. Бочвар.– Изд.5-е, испр. и доп. – М.; Л.: Metallurgizdat, 1940. – 298 с.
2. Бочвар А.А. Metalловедение: Учебник для металлургических и технологических спец. вузов/А.А. Бочвар. – Изд.5-е, перераб. и доп. – М.: Metallurgizdat, 1956. – 494 с.
3. Штейнберг С.С. Metalловедение/С.С. Штейнберг. – М., 1961. – 508 с.
4. Бернштейн М.Л. Структура деформированных металлов/М.Л. Бернштейн. – М.: Metallургия. – 1977. – 432 с.
5. Рекристаллизация металлов и сплавов. 2-е изд. Горелик С.С. М. «Metallургия», 1978. 568с.
6. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. М., Metallургия, 1980.
7. Гуляев А.П. Metalловедение. Учебник. // М.: Metallургия, 1986, 541 с.
8. Физическое metalловедение. Под ред. Р. Кана, П. Хаазена, вып. 1-3. - М.: Мир.-1987.
9. Колачев Б.А. и др. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов: Учебник. // М.: Metallургия, 1992, 271 с.
10. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. и др. Materialоведение: Учебник для вузов. Под общей редакцией Арзамасова Б.Н., Мухина Г.Г. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, 648 с.
11. И.И. Новиков, В.С. Золоторевский, В.К. Портной, Н.А. Белов, Д.В. Ливанов, С.В. Медведева, А.А. Аксенов, Ю.В. Евсеев. Metalловедение. Учебник. В 2-х томах- Том I. Колл. авторов/Основы metalловедения. / Под общей ред. проф. В.С. Золоторевского - М.: Издательский дом МИСиС, 2009. - 496с.
12. И.И. Новиков, В.С. Золоторевский, В.К. Портной, Н.А. Белов, Д.В. Ливанов, С.В. Медведева, А.А. Аксенов, Ю.В. Евсеев. Metalловедение. Учебник. В 2-х томах- Том II. Колл. авторов/Термическая обработка. Сплавы. / Под общей ред. проф. В.С. Золоторевского - М.: Издательский дом МИСиС, 2009. - 528 с.
13. Физическое materialоведение: Учебник для вузов: В 8т. / Под общей ред. Б.А. Калина.-М.; НИЯУ МИФИ, 2021.

## ЛИТЕРАТУРА К ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЕ

### Сплавы на основе железа и никеля

1. Вотинов С.Н. Облучённые нержавеющие стали/С.Н. Вотинов, В.И. Прохоров, З.Е. Островский З.Е. – М.: Наука, 1987. - 126 с.
2. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов: [монография] В 2 кн. Кн. 1/ Ф.Г. Решетников, Ю.К. Бибилашвили, И.С. Головин и др./Под ред. Ф.Г. Решетникова. – М.: Энергоатомиздат, 1995. - 320 с.
3. Гольдштейн М.И. Специальные стали: Учебник для вузов/М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. – 2-е изд. перераб. Издание доп. – М.: МИСИ, 1999. - 408 с.
4. Физическое materialоведение: Учебник для вузов: в 8т. / Под общей ред.

Б.А. Калина. Том 6. Конструкционные материалы ядерной техники. /Б.А. Калинин, П.А. Платонов, Тузов Ю.В., И.И. Чернов, Я.И. Штромбах. – М.: НИЯУ МИФИ, 2021. - 736 с.

#### **Влияние облучения на структуру и свойства металлов и сплавов**

1. Дефекты и радиационные повреждения в металлах/М. Томпсон; Пер. с англ. – М: Мир, 1971. - 367 с.
2. Вотинов С.Н. Облучённые нержавеющие стали/С.Н. Вотинов, В.И. Прохоров, З.Е. Островский З.Е. – М.: Наука, 1987. - 126 с.
3. Залужный А.Г. Гелий в реакторных материалах / А.Г. Залужный, Ю.Н. Сокурский, В.Н. Тебус. – М.: Энергоатомиздат, 1988. - 224 с.
4. Паршин А.М. Структура, прочность и радиационная повреждаемость коррозионноустойчивых сталей и сплавов. – Челябинск: Metallurgy, 1988. - 656 с.
5. Иванов Л.И. Радиационная физика металлов и ее приложения/Л.И. Иванов, Ю.М. Платов. – М.: Интерконтакт Наука, 2002. - 299 с.
6. Воеводин В.Н. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов/В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов. – К.: Наукова Думка, 2006. - 376 с.

#### **Сплавы на основе циркония**

1. Ластман Б. Metallurgy of zirconium: per. s angl./Б. Ластман, Ф.Керзе. – Москва: Изд-во иностр. лит., 1959. - 419 с.
2. Парфёнов Б.Г. Коррозия циркония и его сплавов/ Б.Г. Парфёнов, В.В. Герасимов, Г.И. Венедиктова. – М.: Атомиздат, 1967. - 257 с.
3. Ривкин Е.Ю. Прочность сплавов циркония/Е.Ю. Ривкин, Б.С. Родченков, В.М. Филатов. – Москва: Атомиздат, 1974. - 168 с.
4. Дуглас Д. Metallurgy of zirconium/Д. Дуглас; пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1975. - 360 с.
5. Займовский А.С. Циркониевые сплавы в атомной энергетике/А.С. Займовский, А.В. Никулина, Н.Г. Решетников. – М.: Энергоиздат, 1994. - 253 с.
6. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. В 2 кн. Кн. 1/Ф.Г. Решетников, Ю.К. Бибилашвили, И.С. Головнин и др./Под ред. Ф.Г. Решетникова. – М.: Энергоатомиздат, 1995. - 320 с.
7. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. В 2 кн. Кн. 2/Ф.Г. Решетников, Ю.К. Бибилашвили, И.С. Головнин и др./Под ред. Ф.Г. Решетникова. – М.: Энергоатомиздат, 1995. - 336 с.
8. Добромислов А.В. Структура циркония и его сплавов/А.В. Добромислов, Н.И. Талуц; Рос. акад. наук. Ур. отд-ние, Ин-т физики металлов. – Екатеринбург: УрО РАН, 1997. - 228 с.
9. Waterside corrosion of zirconium alloys in nuclear power plants // International Atomic Energy Agency. Printed by the IAEA in Austria January 1998.
10. Труды регулярных международных симпозиумов «Zirconium in the nuclear Industry» ASTM (STP 1467, 2008 – пример).
11. Физическое материаловедение: Учебник для вузов. В 6 т./Под общей ред. Б.А. Калина. Том 6. Часть 1. Конструкционные материалы ядерной техники/Б.А. Калинин, П.А. Платонов, И.И. Чернов, Я.И. Штромбах. – М.: МИФИ, 2008. -

### Титан и его сплавы

1. Конструкционные материалы: Энциклопедия современной техники : в 3-х т. – Т.1: Абляция - Коррозия/глав. ред. А.Т. Туманов. – Москва: Изд-во «Советская энциклопедия», 1963. – 416 с.
2. Томашов Н.Д. Коррозия и защита титана/Н.Д. Томашов, Р.М. Альтовский. – Москва: Машгиз, 1963. - 168 с.
3. Макквилен М.К. Фазовые превращения в титане и его сплавах/М.К. Макквилен. – М.: Металлургия, 1967. - 75. с.
4. Тавадзе Ф.Н. Коррозионная стойкость титановых сплавов/ Ф.Н. Тавадзе, С.Н. Манджгаладзе. – М.: Металлургия, 1969. - 208 с.
5. Глазунов С.Г. Конструкционные титановые сплавы/С.Г. Глазунов, В.Н. Моисеев. – Москва: Металлургия, 1974. - 368 с.
6. Колачев Б.А. Физическое металловедение титана/Б.А. Колачев – М.: Металлургия, 1976. - 184с.
7. Металлография титановых сплавов/Под ред. Н.Ф. Аношкина и др. – М.: Мир: Металлургия, 1980. - 464с.
8. Ильин А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах/А.А. Ильин. – М.: Наука, 1994. - 304 с.
9. Полуфабрикаты из титановых сплавов/В.К. Александров, Н.Ф. Аношкин, А.П. Белозеров и др. – М.: ВИЛС, 1996. - 581 с.
10. Моисеев В.Н. Основные направления развития титановых сплавов для современного машиностроения/ В.Н. Моисеев//МиТОМ. - 1997. - № 7. - С. 30-34.
11. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов/ Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. - 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Мисис, 1999. - 416 с.

### Материалы термоядерных реакторов

1. Ефимов Ю.В., Барон В.В., Савицкий Е.М. Ванадий и его сплавы/Ю.В. Ефимов, В.В. Барон, Е.М. Савицкий. – М.: Наука, 1969. - 254 с.
2. Конструкционные материалы для реакторов термоядерного синтеза/Институт металлургии им. А.А. Байкова. – Москва: Наука, 1993. - 203 с.
3. Конструкционные материалы ядерных реакторов/Н.М. Бескоровайный, Б.А. Калинин, П.А. Платонов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1995. - 704 с.
4. R.L.Klueh, D.R.Harries. High-Chromium Ferritic and Martensitic Steels for Nuclear Applications. ASTM, MONO3, 2001.
2. Иванов Л.И., Платов Ю.М. Радиационная физика металлов и ее приложения/Л.И. Иванов, Ю.М. Платов. – Москва: Интерконтакт Наука, 2002. - 299 с.
5. Ядерный синтез с инерционным удержанием/ред.: Б.Ю. Шарков. – М.: Физматлит, 2005. - 262 с.
6. T.Muroga, J.M.Chen, V.M.Chernov, et all. Review of advances in development of vanadium alloys and MHD insulator coatings. Journal of Nuclear Materials 367-370 (2007) 780-787.
7. V.M.Chernov, M.V.Leonteva-Smirnova, M.M.Potapenko, et all. Structural materials for fusion power reactors – the RF R&D activities. Nuclear Fusion, 47 (2007) 839-848.
8. J.M.Chen, V.M.Chernov, R.J.Kurtz, T.Muroga. Overview of the vanadium al-

### **Уран и его сплавы**

1. Холден А.Н. Физическое металловедение урана/А.Н. Холден; пер. с англ. – Москва: Металлургиздат, 1962. - 268 с.
2. Коррозия урановых материалов /В.В. Герасимов, Коррозия урана и его сплавов, М. Атомиздат, 1965, 96 с.
3. Займовский А.С. Тепловыделяющие элементы атомных реакторов/А.С. Займовский, В.В. Калашников, И.С. Головнин. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1966. - 520 с.
4. Сокурский Ю.Н. Уран и его сплавы/Ю.Н. Сокурский, Я.М. Стерлин, В.А. Федорченко. – М.: Атомиздат, 1971. - 448 с.
5. Уманский Я.С. Физика металлов: Атомное строение металлов и сплавов: учебник для вузов/Я.С. Уманский, Ю.А. Скаков. – М.: Атомиздат, 1978. - 352 с.
6. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. В 3-х т., Машиностроение, 2001.

### **Плутоний и его сплавы**

1. Кутайцев В.И. Сплавы тория, урана и плутония: Сборник материалов по диаграммам состояния и кристаллическим структурам: [Справочник] В.И. Кутайцев. – Москва: Госатомиздат, 1962. - 224 с.
2. Займовский А.С. Тепловыделяющие элементы атомных реакторов/А.С. Займовский, В.В. Калашников, И.С. Головнин. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1966. - 520 с.
3. Плутоний: справочник. – Москва: Атомиздат. Т.2/ред.: О. Вик. - 1973. - 455 с.
4. Карапетьянц М.Х. Строение вещества: учеб. пособие для вузов/Карапетьянц М.Х., Дракин С.И. - 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1978. - 303 с.
5. Уманский Я.С. Физика металлов: Атомное строение металлов и сплавов: учебник для вузов/Я.С. Уманский, Ю.А. Скаков. – М.: Атомиздат, 1978. - 352 с.
6. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. В 3-х т., Машиностроение, 2001.
7. Плутоний: фундаментальные проблемы/пер. с англ. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. Т.1. – 2003. - 289 с.
8. Плутоний: фундаментальные проблемы/пер.с англ. – Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ. Т.2. – 2003. – 495 с.
9. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела/Ч. Киттель. - изд.2-е, стереотип. – М.: МедиаСтар, 2006. - 792 с.
10. Плутоний. Химия актиноидов и трансактиноидных элементов. : Пер. с англ./Д.Л. Кларк [и др.]; под ред. Б.А. Надькто; под ред. Л.Ф. Тимофеева. - Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010. - 527 с. : ил. ISBN 978-5-9515-0154-7

### **Бериллий**

1. Дарвин Дж. Бериллий: пер. с англ./Дж. Дарвин, Дж. Баддери. – Москва: Изд-во иностранная литература, 1962. -324 с.
2. Папилов И.И. Окисление и защита бериллия/И.И. Папилов. – Москва:

Металлургия, 1968. - 121 с.

3. Папилов И.И. Физическое металловедение бериллия/И.И. Папилов, Г.Ф. Тихинский. – Москва: Атомиздат, 1968. - 451 с.

4. Папилов И.И. Пластическая деформация бериллия/И.И. Папилов, Г.Ф. Тихинский. – Москва: Атомиздат, 1973. - 304 с.

5. Альтовский Р.М. Коррозия и совместимость бериллия/Р.М. Альтовский, А.С. Панов. – М.: Атомиздат, 1975. - 128 с.

6. Папилов И.И. Структура и свойства сплавов бериллия: справочник/И.И. Папилов. – М.: Энергоиздат, 1981. - 368 с.

7. Серняев Г.А. Радиационная повреждаемость бериллия/ Г.А. Серняев. – Екатеринбург: издательство «Екатеринбург», 2001. - 369 с.

### **Сверхпроводящие материалы**

1. Физико-химические основы получения сверхпроводящих материалов/Е.М. Савицкий, Ю.В. Ефимов, Я. Кружляк, К. Фишер и др.; Под науч. ред. Е.М. Савицкого и др. – Москва: «Металлургия», 1981. - 479 с.

2. Metallurgiya superprovodnykh materialov: per. s angl./pod red. T. Lyumana i D. D'yu-H'yuza, A.I. Rusinova, V.I. Tsebro. – Москва: Metallurgiya, 1984. - 359 с.

3. Metallovedenie i tekhnologiya superprovodnykh materialov: Per. s angl./E.A. Alekseev, M.S. Vasilevskiy i dr.; pod red. S. Fonera, B. Shvarca; Pod red. V.A. Marchenko. – Москва: Metallurgiya, 1987. - 560 с.

4. Razrabotka superprovodnikov dlya magnitnoy sistema ITЭР v Ros-sii/A.K. Shikov, A.D. Nikulin, A.G. Silaev i dr. //Известия ВУЗов. Цветная металлургия. - 2003. - №1.-С.36 - 43.

5. Shikov A.K. Rossiyskie nizkotentperaturnye superprovodniki/A.K. Shikov//Natsionalnaya metallurgiya. - 2004. - №2.-С.83-9

6. Nizkotentperaturnye i vysokotentperaturnye superprovodniki i kompozity na ikh osnove/E.P. Romanov, S.V. Sudareva, E.N. Popova, T.P. Kриницина; [otv. red. B.N. Gощицкий, A.V. Dobromыслов]; Ros. Akad. Nauk. Ural. otd-nie, In-t fiziki metallov. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. - 515 с.

7. Tokonesushie lenty vtorogo pokoleniya na osnove vysokotentperaturnykh superprovodnikov/Под ред. А. Гояла; Пер. с англ.; Ред. пер. А.Р. Кауль. – М.: Издательство ЛКИ, 2009. - 432 с.

8. Физическое материаловедение: Учебник для вузов: Том 8. Сверхпроводящие материалы. /Е.А. Дергунова, М.Г. Исаенкова, Л.В. Потанина / Под общей ред. Б.А. Калина. -М.; НИЯУ МИФИ, 2021.204с.

### **ИНТЕРНЕТ РЕСУРСЫ**

1. На платформе eLIBRARY.RU (<http://elibrary.ru/>) осуществляется доступ к журналам издательств (при наличии личной регистрации пользователя на сайте E-LIBRARY):

Издательство «НАУКА». Предоставляется бесплатный доступ к коллекции из 38 журналов изд-ва «Наука» в полнотекстовом электронном виде.

Адрес для доступа: [http://elibrary.ru/projects/subscription/rus\\_titles\\_open.asp](http://elibrary.ru/projects/subscription/rus_titles_open.asp).

Издательство Elsevier. НЭИКОН предоставляет бесплатный доступ к полнотекстовым статьям из 162 специально-отобранных журналов издательства Elsevier.

Адрес для доступа: [http://elibrary.ru/projects/subscription/rus\\_titles\\_open.asp](http://elibrary.ru/projects/subscription/rus_titles_open.asp).

2. Каталог бесплатных полнотекстовых научных журналов по химии Доступ к ресурсу осуществляется по адресу: <http://www.abc.chemistry.bsu.by/current/j.htm>.

3. На сайте представлены более 500 иностранных журналов, в том числе журнал Общества по атомной энергии Японии (Atomic Energy Society of Japan). Journal of Nuclear Science and Technology.

Адрес для доступа: <http://www/jstage.jst.go.jp/browse/jnst>.

### **Программу разработали:**

Главный научный сотрудник,  
д-р физ.-мат. наук, профессор

В.М. Чернов

Начальник научно-исследовательского  
отдела, д-р техн. наук

В.А. Маркелов

Начальник научно-исследовательского  
отдела, канд. техн. наук

М.В. Леонтьева-  
Смирнова

Ведущий научный сотрудник,  
д-р техн. наук

Л.А. Тимофеева

Ведущий научный сотрудник,  
канд. техн. наук, доцент

Е.А. Дергунова

Ведущий научный сотрудник,  
канд. физ.-мат. наук

А.О. Титов

Ведущий научный сотрудник,  
канд. техн. наук, доцент

Н.И. Шипунов

---

Программа кандидатского экзамена по специальности 2.6.1 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки) одобрена и рекомендована к утверждению Научно-техническим советом АО «ВНИИНМ» протокол № 6 от 08.04.2022 года.

В разработке программы кандидатских экзаменов принимала участие

Главный научный сотрудник, д-р техн. наук

**А.В. Никулина**