

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»**

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

по научной работе

Драгунов В.К.

« ____ » _____ 2022 г.

**ПРОГРАММА ВСТУПИТЕЛЬНОГО ИСПЫТАНИЯ
ПО СПЕЦИАЛЬНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ ПРИ ПОСТУПЛЕНИИ В
АСПИРАНТУРУ**

Группа научных специальностей – 2.4. Энергетика и электротехника

Научная специальность – 2.4.4. Электротехнология и электрофизика

Москва, 2022

Введение

Программа составлена на основе дисциплин направления «Электроэнергетика и электротехника», связанных с изучением процессов преобразования электроэнергии в другие виды энергии в целях достижения определенного технологического эффекта и исследованием закономерностей передачи электромагнитной энергии в вещество в целях придания **веществу** требуемых свойств.

Программа вступительного экзамена составлена в соответствии с паспортом научной специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика.

Научно-технические основы электротехнологий

Современные проблемы использования электрической энергии для технологических процессов. Основные виды продукции с предпочтительным производством на электротехнологических установках. Классификация электротехнологических установок. Электротехнологические установки с тепловым процессом формирования требуемого качества продукции. Основные методы преобразования электрической энергии в тепловую, их эффективность и распространенность в современных технологических процессах. Основные законы подобия и моделирования процессов в электротермических установках. Использование физического, математического и численного моделирования для решения задач электрического нагрева и его оптимизации.

Перспективные направления в использовании электроэнергии для технологических процессов. Географические, экономические и экологические аспекты использования электротехнологий.

Вопросы металловедения и технологии металлов в электротехнологии

Атомно-кристаллическое строение металлов. Понятие об идеальном и реальном совершенном кристалле. Пространственная кристаллическая решетка. Элементарная кристаллическая ячейка.

Общие свойства металлов. Металлический, ковалентный, ионный и вандервальсовский тип межатомной связи.

Понятие о сплаве. Компонент, фаза, структура. Методы исследования структуры металлов и сплавов.

Координационное число и плотность упаковки кристаллов. Проиллюстрировать на примерах о.ц.к. и г.ц.к. решеток.

Кристаллографические обозначения атомных плоскостей и направлений в кристаллах.

Точечные (нульмерные) дефекты кристаллов. Энергия образования точечных дефектов, их концентрация в кристаллах, источники и стоки вакансий, миграция точечных дефектов.

Линейные (одномерные) несовершенства кристаллов. Понятие о краевой дислокации. Вектор Бюргера.

Энергия дислокации. Плотность дислокаций.

Поверхностные (двухмерные) дефекты кристаллического строения. Строение высокоугловых и малоугловых границ.

Анизотропия свойств кристаллов.

Первичная кристаллизация металлов. Термодинамика, механизм, самопроизвольное зарождение центров кристаллизации в жидкости.

Понятие об устойчивом зародыше кристаллизации. Рост зародышевых центров, понятие о двухмерном зародыше. Дислокационный механизм роста.

Кинетика процесса кристаллизации. Влияние степени переохлаждения и примесей на рост зерна. Модифицирование.

Морфология продуктов кристаллизации. Строение слитка. Дендритная, зональная и ликвация по удельному весу.

Полиморфные превращения. Термодинамика, механизм и кинетика процессов фазовой перекристаллизации.

Упругая и пластическая деформация. Сдвиг по схеме скольжения и двойникования. Системы скольжения в кубических и гексагональных кристаллах.

Дислокационный механизм пластической деформации, зарождение трещины и разрушение металлов. Хрупкое и вязкое разрушение. Связь между прочностью и количеством дефектов кристаллического строения.

Наклеп. Изменение структуры и свойств в зависимости от степени деформации.

Механизмы роста зерна в зависимости от степени деформации. Полигонизация, понятие о критической степени деформации. Холодная и горячая обработка металлов давлением.

Рекристаллизация металлов, термодинамика. Стадии процесса рекристаллизации (возврат, рекристаллизация обработки, собирательная рекристаллизация), изменение свойств наклепанного металла в процессе рекристаллизационного отжига. Порог рекристаллизации.

Понятие о диаграмме состояний. Правило фаз. Концентрационная ось, правило отрезков.

Диаграмма состояний для сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии эвтектического типа. Описать процессы превращений в характерных сплавах, написать фазовые реакции, начертить кривые охлаждения.

Диаграмма состояний для сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии. Описать процесс кристаллизации сплава, испытывающего перитектическое и эвтектическое превращение.

Металлические сплавы. Понятие о сплаве-смеси, химическом соединении, твердом растворе.

Диаграммы состояний для сплавов, компоненты которых образуют устойчивые химические соединения.

Диаграмма состояний для сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии перитектического типа. Описать процессы

превращений в характерных сплавах, написать фазовые реакции, начертить кривые охлаждения.

Диаграмма состояний для сплавов, испытывающих полиморфные превращения, эвтектоидные превращения.

Диаграмма состояний для сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии. Для выбранного сплава описать процессы превращений при охлаждении, написать фазовые реакции, начертить кривую охлаждения.

Твердые растворы замещения и внедрения. Условия неограниченной растворимости в твердом состоянии.

Понятие о диаграммах состояний тройных сплавов. Концентрационный треугольник, поверхности ликвидуса и солидуса, изотермические и политермические разрезы.

Система железо-цементит. Компоненты системы. Растворимость углерода в α - и γ -железе. Фазы системы, фазовые области диаграммы, характерные фазовые реакции (нонвариантные). Координаты точек диаграммы.

Диаграмма состояний железо-цементит. Описать процессы первичной кристаллизации в сплавах, с содержанием углерода до 0,5%.

Диаграмма состояний железо-цементит. Описать процессы первичной кристаллизации в высокоуглеродистых сплавах. Различие в структуре и свойствах между сталью и чугуном.

Диаграмма состояний железо-цементит. Описать процессы превращения в твердом состоянии в сплавах с содержанием углерода до 0,02%. Третичный цементит.

Диаграмма состояний железо-цементит. Описать процессы превращения в твердом состоянии в сталях. Схемы структур.

Диаграмма состояний железо-цементит. Описать процессы превращения в твердом состоянии в чугунах. Схемы структур.

Твердые растворы замещения и внедрения. Условия неограниченной растворимости в твердом состоянии.

Углеродистые стали. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства сталей. Углеродистая сталь общего назначения, маркировка, область применения. Углеродистые качественные конструкционные стали

Чугун. Процесс графитизации, условия первичной и вторичной кристаллизации графита, стабильная диаграмма состояний железо-графит.

Графитизирующий отжиг белого чугуна на ковкий. Условия получения ковкого чугуна с различной металлической основой, марки ковкого чугуна.

Структура чугуна, форма графита, свойства чугуна. Влияние примесей и скорости охлаждения на условия графитизации, структуру и свойства чугуна.

Образование аустенита. Диффузионный характер превращения. Механизм образования и роста зародышей. Диаграмма изотермического образования аустенита.

Рост аустенитного зерна при нагреве. Начальное, наследственное и действительное зерно аустенита. Влияние величины зерна на свойства стали.

Распад аустенита эвтектоидной концентрации в перлитной области. Механизм и кинетика распада. Диаграммы изотермического распада. Строение и свойства продуктов распада.

Отжиг стали. Технология и режимы полного и изотермического отжига. Диффузионный отжиг (гомогенизация). Сфероидизирующий отжиг. Низкий отжиг

Нормализация стали. Режимы обработки, цель нормализации.

Особенности процесса распада аустенита в сталях неэвтектоидного состава. Распад аустенита при непрерывном охлаждении. Критическая скорость закалки.

Термическая обработка стали. Температура и время как основные факторы воздействия на материал. Критические точки для стали. Основные структуры и превращения при термической обработке стали.

Особенности мартенситного превращения в стали. Природа мартенсита. Механизм мартенситного превращения. Когерентный рост кристаллов мартенсита. Структура мартенсита. Остаточный аустенит в сталях.

Свойства стали, закаленной на мартенсит. Причины упрочнения при закалке

Технология закалки стали. Выбор температуры закалки. Время нагрева и выдержки. Способы нагрева под закалку. Защита стали от окисления и обезуглероживания при нагреве. Охлаждающие (закалочные) среды.

Способы закалки (непрерывная закалка, с "подстуживанием", закалка в двух средах, изотермическая закалка, ступенчатая закалка,

Прокаливаемость стали. Понятие о критическом диаметре.

Внутренние напряжения в закаленной стали. Механизм образования тепловых и структурных напряжений при закалке.

Дефекты, возникающие при закалке. Способы их устранения.

Промежуточное (бейнитное) превращение

Превращения при отпуске. Механизм распада мартенсита. Распад остаточного аустенита, карбидное превращение, коагуляция карбидов. Структуры отпуска. Влияние отпуска на свойства стали.

Отпуск стали. Технология и область применения разных видов отпуска.

Инструментальные стали пониженной и повышенной прокаливаемости. Марки, область применения. Быстрорежущие стали. Причины теплостойкости, структура, термическая обработка, марки и область применения быстрорежущих сталей.

Химико-термическая обработка стали (ХТО). Теория процесса ХТО, природа и строение диффузионного слоя.

Медь и сплавы на ее основе. Латуни, взаимосвязь диаграммы состояний и свойств латуней. Однофазные и двухфазные латуни. Бронзы. Литейные и деформируемые бронзы. Безоловянистые бронзы. Марки, область применения.

Алюминий и сплавы на его основе. Классификация алюминиевых сплавов. Термическая обработка алюминиевых сплавов. Причины упрочнения при старении сплавов.

Физические принципы и техническая реализация современных электротермических установок

Эффект теплообразования при прохождении электрического тока по проводнику. Сопротивление проводника. Особенности тепловыделения в сопротивлении. Основные законы теплопередачи от нагревателя к объекту нагрева. Влияние геометрии рабочего пространства и третьих тел на теплопередачу. Основные методы расчета стационарных и нестационарных температурных полей. Решение тепловых задач с внутренними источниками теплоты.

Электрические печи сопротивления. Основные виды и конструкции электрических печей сопротивления. Печи прямого и косвенного нагрева, жидкостные ванны и печи с псевдокипящим слоем. Тепловой расчет печей периодического действия. Тепловой расчет печей непрерывного действия (методических). Расчет нагревательных элементов среднетемпературных и высокотемпературных печей. Особенности конструкции нагревателей с теплоотдачей преимущественно излучением. Особенности теплового расчета электрических печей с принудительной циркуляцией атмосферы. Расчет электрических нагревателей с преимущественно конвективной теплоотдачей. Особенности расчета вакуумных печей. Методы измерения и регулирования температуры в электрических печах.

Электрический дуговой разряд как источник тепла. Параметры электрической дуги высокого и низкого давления. Влияние внешней среды на процессы тепло- и массопереноса и процесс преобразования энергии в электрических дугах. Приэлектродные процессы в электрических дугах. Коронный, барьерный, тлеющий разряды. Методы расчета электрических цепей с дуговыми разрядами в контуре цепи. Вольтамперная характеристика электрической дуги постоянного и переменного тока. Устойчивость системы с дуговым разрядом. Устойчивость дугового разряда при наличии возмущений. Влияние материала электродов и среды на устойчивость дугового разряда.

Плазма и ее разновидности. Особенности использования низкотемпературной плазмы в электротехнологических установках. Дуговые и высокочастотные плазмотроны. Вакуумные плазменные печи с полым катодом.

Дуговые печи прямого и косвенного действия. Особенности теплообразования и теплопередачи в дуговых печах. Технологические процессы выплавки стали в дуговых печах. Расчет электрических процессов в дуговой печи. Тепловой расчет и энергетический баланс процессов в дуговой печи. Источники питания и электрооборудование дуговой печи. Расчет и проектирование коротких сетей. Дуговая печь как нагрузка электрической сети. Современные тенденции в развитии систем электропитания и повышении энергетической эффективности

дуговых печей.

Особенности тепловых процессов в рудно-термических (рудовосстановительных) печах. Область применения, классификация и типы рудовосстановительных печей. Источники питания, электрооборудование, методы электрического расчета энергетического баланса рудовосстановительных печей. Перспективные направления совершенствования тепловых и энергетических процессов в технологиях рудовосстановительных печей.

Вакуумные дуговые печи. Особенности технологических процессов плавки в вакуумных дуговых печах.

Установки электрошлакового переплава. Особенности технологических процессов электрошлакового переплава.

Перенос и преобразование энергии в электромагнитном поле. Плоская электромагнитная волна, поверхностный эффект. Процесс взаимодействия электромагнитного поля с металлом. Электромагнитные явления в металлах с постоянной магнитной проницаемостью. Физические основы индукционного нагрева. Методы расчета систем «индуктор - загрузка». Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности системы «индуктор - загрузка». Электродинамические процессы в ферромагнитных телах. Механические усилия в электродинамических системах. Взаимодействия электромагнитного поля с плазмой и расплавленным металлом.

Канальные и тигельные индукционные плавильные печи. Расчет основных параметров тигельной и канальной печей. Магнитогидродинамические процессы в ванне печи. Электродинамические явления в каналах печей. Энергетический баланс установки. Источники питания и электрооборудование тигельных и канальных печей.

Установки индукционного нагрева промышленной, средней и высокой частоты. Установки сквозного нагрева. Выбор основных параметров установок сквозного нагрева. Источники питания и электрооборудование на средних частотах. Индукционная поверхностная закалка. Выбор основных параметров установок индукционной закалки. Ламповые генераторы. Режимы работы ламповых генераторов. Высокочастотный и сверхвысокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. Установки зонной плавки.

Электронно-лучевые печи для переплава особо чистой стали и тугоплавких материалов Мощные электронные пушки. Характеристики оптической системы электронных пушек. Электронные установки зонной очистки металлов и выращивание монокристаллов. Электронно-лучевые установки для нанесения покрытий. Энергетические характеристики электронно-лучевых установок.

Процессы и установки для сварки и улучшения свойств материалов

Электродуговая сварка. Особенности формирования сварочных дуг. Источники питания сварочных дуг. Плазменно-дуговая сварка и резка металлов. Физические основы плазменной сварки и резки металлов. Контактная сварка. Физические основы электрической контактной сварки. Стыковая сварка. Точечная сварка. Шовная сварка. Электрооборудование установок контактной сварки.

Плазменная техника и технология. Основные типы и классификация плазмотронов атмосферного давления. Основные виды плазменных технологий (резка, плавка, сварка, напыление, плазмохимия, нанопорошки). Плазменно-ионные технологии и устройства (травление, очистка, нанесение покрытий, полировка). Приэлектродные явления и теплообмен в электродных пятнах, условия устойчивости горения электрических дуг. Математическое моделирование и расчет плазмы, плазмотронов и плазменных технологий (уравнение энергии и движения, электромагнитные задачи).

Электроэрозионные и анодно-механические методы обработки металлов. Электроэрозионная обработка металлов. Параметры импульсных разрядов. Основные операции, выполняемые электроэрозионным методом. Импульсные генераторы для электроэрозионной обработки. Анодно-механическая обработка металлов. Основы анодно-механической обработки. Разновидности анодно-механической обработки.

Электрогидравлические и магнитно-импульсные методы обработки. Установки для электрогидравлической обработки. Физические процессы, происходящие при высоковольтном электрическом разряде в жидкости. Генераторы импульсов тока. Технологическое использование электрического разряда в жидкости. Магнитно-импульсная обработка металлов. Физические основы магнитно-импульсной обработки металлов. Элементы оборудования установок магнитно-импульсной обработки. Характеристики операции магнитно-импульсной обработки.

Промышленные лазеры. Физические основы лазерной техники. Принцип действия и характеристики газовых и твердотельных лазеров, лазерные технологии.

Ультразвуковые установки и методы сварки, очистки и интенсификации технологических процессов.

Электротехнологические процессы в экологии

Перспективы использования электротехнологических процессов для улучшения состояния окружающей среды. Состояние и темпы загрязнения воздушной и водной среды промышленными и бытовыми отходами. Основные

электрофизические и электротехнологические методы очистки окружающей среды. Очистка воздушной и водной среды посредством озона. Основные электрофизические методы получения озона. Электрофильтры. Плазмохимические методы нейтрализации и разложения токсичных газов. Электротехнологические методы переработки твердых бытовых отходов. Методы деструкции радиоактивных отходов.

Системы электропитания электротехнологических установок

Источники питания электротехнологических установок промышленной частоты. Источники питания дуговых и рудно-термических печей, выбор печных трансформаторов, методы регулирования мощности в печах. Системы управления режимом работы источника питания.

Источники питания постоянного тока для электротехнологических установок. Основные схемы выпрямления, регулирования тока и напряжения источников питания. Формирование падающих вольтамперных характеристик источников. Условия совместимости источников питания с первичной сетью.

Источники питания установок индукционного нагрева. Особенности построения схем инвертирования тока и выбор элементной базы для статических источников питания индукционных установок. Ламповые генераторы. Основные схемы генерации и регулирования мощности. Генераторные триоды, параметры ламповых генераторов.

Магнетронные источники питания сверхвысокой частоты для целей нагрева.

Автоматическое управление электротехнологическими процессами

Принципы и задачи автоматического управления электротехнологическими установками. Импульсные и непрерывные методы регулирования режимов электротехнологических установок. Программное управление. Понятие о самонастраивающихся системах управления.

Автоматическое управление электропечами сопротивления. Позиционные регуляторы температуры. Динамика систем непрерывного регулирования температуры. Расчет и настройка регуляторов температуры. Современные типовые регуляторы температуры.

Автоматическое управление индукционными электротехнологическими установками. Управление плавильными установками промышленной частоты. Принцип управления индукционными установками на средних частотах. Управление высокочастотными установками с ламповыми генераторами.

Автоматическое управление режимами дуговых сталеплавильных печей. Сталеплавильная печь как объект регулирования. Задачи управления.

Промышленные регуляторы дуговых сталеплавильных печей. Системы комплексного управления дуговыми печами с применением ЭВМ. Автоматическое регулирование режима рудовосстановительных печей.

Автоматическое управление вакуумными дуговыми печами. Требования к автоматической системе ведения плавки. Автоматические регуляторы длины дуги и мощности.

Автоматическое управление установками электрошлакового переплава. Режимы работы установки электрошлакового переплава и выбор параметров регулирования.

Автоматическое управление плазменными, электронно-лучевыми и лазерными установками.

Особенности математического моделирования электротехнологических процессов

Структура и физический смысл основных уравнений, описывающих электротехнологические и электрофизические процессы (уравнения стационарной и нестационарной теплопроводности, баланса энергии, движения и неразрывности). Уравнения электромагнитного поля (Максвелла, цепные задачи).

Плоские и цилиндрические задачи, граничные и начальные условия. Нелинейные задачи и итерационный метод их решения. Элементы вычислительной математики: методы конечных элементов, конечных разностей.

Применение методов теории подобия к моделированию электротехнологических процессов.

Современные программные пакеты для моделирования электромагнитных и тепловых процессов.

Основная литература

1. Болотов А.В., Шепель Г.А. Электротермические установки. - Алма-Аты: Мектеп, 1983.

2. Электротехнологические промышленные установки. / И.П. Евтюкова и др. - М.: Энергоиздат, 1982.

3. Электротехнические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева. Учеб. для вузов / А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин и др. - М.: Энергоиздат, 1981.

4. Васильев А.С., Гуревич С.Г., Иоффе И.С. Источники питания электротермических установок. - М.: Энергоатомиздат, 1985.

5. Установки индукционного нагрева /Под ред. А.С. Слухоцкого. - Л.: Энергоиздат, 1981.

6. Автоматическое управление электротермическими установками. / А.М. Кручинин, Ю.М. Миронов, К.М. Махмудов, В.П. Рубцов,

А.Д. Свенчанский. - М.: Энергоатомиздат, 1990.

7. Древин С. В. Генераторы низкотемпературной плазмы // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. 2. / Под ред. В.Е. Фортова. - М.: Наука: ДАИК «Наука/Интерпериодика», 2000

8. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984.

Дополнительная литература

1. Чередниченко В.С., Бородачев А.С., Артемьев В.Д. Электрические печи сопротивления. Теплопередача и расчеты электропечей сопротивления: Т.1. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2006.

2. Электротехнический справочник. Т.4. Использование электрической энергии. / Под ред. В.Г. Герасимова и др. – М.: Издательство МЭИ, 2002.

3. *A.M. Krouchinin, A. Sawicki. A Theory of electrical arc heating. The Publishing Office of TUCz. 2003.*

4. *A.M. Krouchinin, A. Sawicki. Modelling of the constricted arc in plasma generators. The Publishing Office of TUCz. 2005.*

5. Мармер Э.Н. Материалы для высокотемпературных вакуумных установок. – М.: Физматлит, 2007.

6. Кайдалов А.А. Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. Изд. 2-е, перераб. и дополн. – Киев: Электротехнология, 2004.

7. Сидоров О.Ю., Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф. Методы конечных элементов и конечных разностей в электромеханике и электротехнологии. – М.: Энергоатомиздат, 2010.

8. Структурное моделирование электротехнологических систем и механизмов. / В.А. Иванушкин, Д.В. Исаков, В.Н. Кожеуров, Ф.Н. Сарапулов; под общ. ред. Ф.Н. Сарапулова; Нижнетагил. технол.ин-т (фил.) УГТУ-УПИ. Нижний Тагил: НТИ (ф) УГТУ-УПИ, 2006.

9. Минеев А.Р., Коробов А.И., Погребисский М.Я. Моделирование электротехнологических процессов и установок. – М.: Компания Спутник+, 2004.

10. Алиферов А., Лупи С. Индукционный и электроконтактный нагрев металлов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011.

11. А.М. Кручинин. Основы проектирования электрических и тепловых режимов электронагрева в дуговых печах.//Учебное пособие. М.: Издательство МЭИ, 2012.

12. В.С. Чередниченко, А.С. Аньшаков, М.Г. Кузьмин. Плазменные электротехнологические установки. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008.

«Согласовано»
Директор ИЭТЭ
к.т.н., доцент

Погребисский М.Я.