

## ПРОГРАММА

### Программа вступительного испытания в аспирантуру

по направлению подготовки 22.06.01 - Технологии материалов  
направленность подготовки *«Металлургия черных, цветных и редких металлов»*

(Утверждено на заседании Ученого совета ИМЕТ РАН 19.04.2018 г.,  
Протокол № 3/18)

Вступительное испытание проводится в виде вступительного экзамена.

Цель вступительного экзамена - определение уровня освоения базовых знаний, формирующих технологическую и общетехническую подготовку поступающего в аспирантуру по дисциплине *«Технологии материалов: Metallургия черных, цветных и редких металлов»* - определение уровня освоения базовых знаний, формирующих технологическую и общетехническую подготовку поступающего в аспирантуру и его возможности освоить программу подготовки высших кадров в аспирантуре.

Настоящая программа охватывает основополагающие разделы материаловедения, металлургии черных, цветных и редких металлов.

### Структура вступительного экзамена

Экзамен состоит из устного ответа на вопросы экзаменационной комиссии.

В ходе обсуждения поступающему могут быть заданы вопросы и предложены задачи из всех разделов курса «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

В билет включается 3 вопроса.

### Содержание вступительного экзамена

#### Часть 1. Материаловедение

Раздел 1. Межатомные взаимодействия и электронное строение твердого тела

1. Основные типы химической связи в твердых телах. Потенциалы межатомного взаимодействия Энергия связи металлических, ковалентных, ионных кристаллов. Равновесное межатомное расстояние
2. Электронное строение твердых тел с различным типом связи. Модель свободных электронов для металлов. Вырожденный электронный газ. Плотность состояний. Поверхность Ферми. Зонная теория твердых тел, энергетический спектр электронов в кристалле, деление тел на проводники, полупроводники и диэлектрики.

Раздел 2. Атомная структура твердых тел

1. Кристаллические тела. Трансляционная симметрия. Элементарная ячейка кристаллической решетки. Кристаллические сингонии. Решетки Бравэ. Точечные и

пространственные группы симметрии. Координационное число, плотность упаковки. Кристаллографические индексы плоскостей и направлений в решетке. Анизотропия свойств кристаллов. Кристаллографическая текстура поликристаллов.

2. Аморфное состояние, металлические стекла. Панокристаллы. Квазикристаллы.

### Раздел 3. Дефекты кристаллического строения

1. Точечные дефекты. Вакансии и межузельные атомы. Равновесная концентрация точечных дефектов. Неравновесные точечные дефекты. Рождение, миграция и сток вакансий. Группы вакансий.

2. Дислокации. Вектор Бюргера. Плотность дислокаций. Краевая, винтовая и смешанная дислокации. Скольжение и переползание дислокаций. Пороги на дислокациях. Поле напряжений и энергия дислокаций. Взаимодействие дислокаций. Полные и частичные дислокации. Дефекты упаковки. Образование и размножение дислокаций. Источник Франка-Рида. Взаимодействие дислокаций и примесных атомов.

3. Границы зерен и субзерен. Угол разориентировки и энергия границ. Границы наклона и кручения. Малоугловые и высокоугловые границы. Миграция границ. Взаимодействие границ зерен с примесными атомами.

### Раздел 4. Фазы и фазовые равновесия в материалах

1. Твердые растворы замещения, внедрения и вычитания. Упорядоченные твердые растворы (сверхструктуры). Электронные соединения (фазы Юм-Розери), фазы внедрения, фазы Лавеса,  $\sigma$ - фазы.

2. Равновесие фаз в многокомпонентных системах. Фазовые переходы I и II рода. 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. Использование геометрической термодинамики для анализа диаграмм состояния.

3. Методы расчета изменения энергии Гиббса и константы равновесия для реакций растворения металлов, оксидов, сульфидов, реакций с образованием твердой фазы.

### Раздел 5. Диффузия

1. Феноменологические законы диффузии. Самодиффузия и гетеродиффузия. Модель случайных блужданий для описания диффузии. Механизмы диффузии, роль точечных дефектов, диффузия по дислокациям и границам зерен. Температурная зависимость коэффициента диффузии.

2. Диффузия в поле градиента концентраций. Концентрационная зависимость коэффициентов диффузии. Эффект Киркендалла. Выравнивающая и разделительная (реактивная) диффузия. Диффузия в силовых полях.

### Раздел 6. Кристаллизация превращения.

1. Гомогенное зарождение кристаллов в расплаве. Критический размер зародыша. Скорость образования и скорость роста кристаллических дислокационный механизмы роста. Кинетика кристаллизации, кристаллизации. Критическая скорость охлаждения расплава. Гетерогенное зарождение.

2. Отклонения от равновесия при кристаллизации. Влияние скорости охлаждения и градиента температуры расплава на микроструктуру. Концентрационное переохлаждение.

Ячеистая и дендритная форма роста кристаллов. Дендритная ликвация. Образование метастабильных фаз при кристаллизации. Бездиффузионная кристаллизация.

3. Структура слитка. Модифицирование. Направленная кристаллизация. Зонная плавка. Выращивание монокристаллов из расплава. Закалка из жидкого состояния.
4. Эвтектическая кристаллизация. Строение эвтектических колоний. Нормальная, аномальная и вырожденная эвтектики. Перитектическая кристаллизация.

#### Раздел 7. Фазовые превращения в твердом состоянии

1. Полиморфные превращения. Нормальный и сдвиговый механизмы структурного и размерного соответствия.
2. Эвтектоидное превращение, механизм и кинетика. Эвтектоидное превращение в сталях. Строение перлита. Диаграммы изотермических превращений. Термокинетические диаграммы.
3. Мартенситное превращение. Термодинамика, механизм и кинетика мартенситного превращения. Микроструктура и субструктура мартенсита. Обратимость превращения. Эффект памяти формы.
4. Бейшпитное превращение. Механизм и кинетика бейнитного превращения. Строение бейнита.
5. Распад пересыщенного твердого раствора. Спинодальный распад. Модулированные структуры. Термодинамика образования промежуточных фаз. Кластеры, зоны Гинье-Престона. Когерентные, частично когерентные и некогерентные выделения. Непрерывный и прерывистый распад. Роль вакансий, дислокаций и границ зерен в процессах выделения.
6. Упорядочение твердого раствора. Дальний и ближний порядок. Антифазные домены. Изменение свойств раствора при упорядочении.

#### Раздел 8. Структурные превращения в твердом состоянии

1. Изменения структуры при холодной пластической деформации. Линии и полосы скольжения. Ячеистая субструктура. Волокнистая микроструктура. Кристаллографическая и металлографическая текстуры деформации, механизмы их образования. Анизотропия свойств текстурованных материалов.
2. Изменения структуры при нагреве после холодной деформации. Возврат (отдых, полигонизация). Первичная, собирательная и вторичная рекристаллизация. Движущая сила, механизм и кинетика этих процессов. Природа критической деформации. Диаграмма рекристаллизации. Кристаллографическая текстура рекристаллизованного материала, механизм ее образования.
3. Изменения структуры при горячей деформации. Динамический возврат и динамическая рекристаллизация.
4. Сфероидизация и коалесценция выделений второй фазы в гетерогенном материале. Растворно-осадительный механизм.
5. Диаграмма железо-углерод. Процессы при структурообразовании железоуглеродистых сплавов.

#### Раздел 9. Способы воздействия на структуру и свойства материалов

1. Основы термической обработки. Классификация видов термической обработки: отжиги 1 и 2 рода, закалка, отпуск, старение, термомеханическая и химико-термическая обработки.
2. Гомогенизационный отжиг, изменение структуры и свойств при гомогенизационном отжиге. Дорекристаллизационный и рекристаллизационный отжиги. Факторы, влияющие на размер рекристаллизованного зерна. Отжиг для уменьшения остаточных напряжений.

Механизм уменьшения остаточных напряжений при отжиге.

3. Разновидности отжига 2 рода: полный, неполный, изотермический, сфероидизирующий отжиги, нормализация, патентирование.

4. Закалка без полиморфного превращения.

5. Закалка с полиморфным превращением (закалка на мартенсит). Изменение свойств при закалке на мартенсит. Критическая скорость охлаждения при закалке, прокаливаемость. Способы закалки: в одной охлаждающей среде, в двух средах, ступенчатая, изотермическая (бейнитная), с обработкой холодом, поверхностная.

6. Старение. Изменение свойств сплавов при старении. Естественное и искусственное старение. Перестаривание.

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

8. Термомеханическая обработка. Низкотемпературная термомеханическая обработка сталей и стареющих сплавов.

9. Химико-термическая обработка. Изменения состава и структуры при химико-термической обработке. Однофазная и многофазная диффузионные зоны. Связь строения диффузионного слоя с диаграммой состояния. Диффузионное насыщение неметаллами и металлами. Диффузионное удаление элементов.

10. Порошковая металлургия, основные технологические этапы.

11. Методы обработки поверхности и получения покрытий. Изменение поверхностного слоя материалов при высокоэнергетических воздействиях. Электронно-лучевая и лазерная обработка. Ионная имплантация. Ионно-плазменное распыление. Термическое напыление. Осаждение из газовой фазы. Электролитическое осаждение.

## Раздел 10. Пластическая деформация и разрушение, механические свойства материалов

1. Пластическая деформация скольжением и двойникованием. Диаграммы деформации моно- и поликристаллов. Системы скольжения. Деформационное упрочнение; влияние на него температуры и скорости деформации. Теория предела текучести.

2. Основные механические характеристики материалов.

упругости, текучести и прочности, истинное сопротивление разрыву, характеристики пластичности при растяжении, твердость, вязкость разрушения и ударная вязкость.

3. Упрочнение при образовании твердых растворов и при выделении избыточных фаз (когерентных и некогерентных). Влияние размера зерна на механические свойства. Сверхпластичность.

4. Хрупкое и вязкое разрушение. Механизмы зарождения трещин. Распространение трещин при хрупком и вязком разрушении. Критерии вязкости разрушения. Строение изломов. Переход от хрупкого разрушения к вязкому. Порог хладноломкости. Природа хладноломкости металлов с ОЦК-решеткой. Способы борьбы с хладноломкостью.

5. Жаропрочность. Стадии ползучести. Релаксация напряжений. Длительная прочность. Влияние состава и структуры материала на жаропрочность.

6. Усталость. Диаграммы усталости. Механизм усталостного разрушения. Факторы, влияющие на усталостную прочность. Термическая усталость. Контактная усталость.

## Раздел 11. Взаимодействие материалов с окружающей средой

1. Окисление, термодинамика и кинетика процесса. Легирование с целью защиты от окисления. Внутреннее окисление.

2. Электрохимическая коррозия. Равномерная, межкристаллитная, точечная коррозия. Коррозия под напряжением. Коррозионное растрескивание. Коррозионная усталость. Коррозия в жидких металлах.

## Раздел 12. Физические свойства материалов

1. Упругие свойства материалов. Закон Гука для изотропных и анизотропных материалов. Связь модулей упругости с потенциалом межатомного взаимодействия. Модули упругости гетерогенных материалов.
2. Термическое расширение. Анггармонизм колебаний атомов в кристаллической решетке. Температурный коэффициент линейного расширения гетерогенных материалов.
3. Теплоемкость. Квантовые теории решеточной теплоемкости Эйнштейна и Дебая. Температура Дебая. Спектр нормальных колебаний решетки. Фононы. Теплоемкость сплавов. Изменение теплоемкости при фазовых и структурных превращениях.
4. Теплопроводность материалов. Кинетическая теория теплопроводности. Время и длина свободного пробега. Решеточная (фононная) теплопроводность, фонон-фононное рассеяние, рассеяние фононов на дефектах кристаллической решетки и примесях, изотопическое рассеяние. Электронная теплопроводность, рассеяние электронов проводимости на фононах, примесях и дефектах.
5. Электропроводность. Электроны проводимости. Время релаксации. Рассеяние электронов на фононах, дефектах решетки, примесях. Правило Маттиссена-Флеминга. Влияние температуры и легирования на электрическое сопротивление металлов и полупроводников. Сопротивление твердых растворов. Связь электро- и теплопроводности металлов. Электрическая проводимость гетерогенных сплавов.
6. Магнитные свойства. Диамагнетизм и парамагнетизм атомов. Закон Кюри. Диамагнетизм и парамагнетизм электронного газа. Магнитное упорядочение. Ферромагнетизм. Ферромагнитные домены. Доменные границы. Энергия магнитной анизотропии. Характеристики петли гистерезиса и кривой намагничивания ферромагнетика. Теория коэрцитивной силы.

## 13. Методы исследования и контроля структуры и свойств материалов

1. Дифракционные методы исследования атомной структуры материалов. Особенности распространения волн в периодических структурах. Закон Вульфа-Брэгга. Обратная решетка. Основные методы рентгеноструктурного анализа. Рентгеновская дифрактометрия. Качественный и количественный рентгеновский фазовый анализ. Электронография и нейтронография. Рентгенографический анализ текстур, остаточных напряжений, дефектов кристаллической решетки, типа твердого раствора, химического дальнего порядка.
2. Просвечивающая и растровая электронная микроскопия, анализ фазового состава, микроструктуры и дефектов кристаллического строения.
3. Методы локального анализа химического состава. Микрорентгеноспектральный анализ. Оже-электронная спектроскопия. Рентгеноэлектронная спектроскопия (электронная спектроскопия для химического анализа). Масс-спектроскопия вторичных ионов.
4. Изучение микроструктуры с помощью световой микроскопии. Методы количественной металлографии.
5. Методы измерения физических свойств. Термический анализ. Абсолютный и дифференциальный методы измерения. Калориметрия, методы смешения, ввода и протока тепла; сканирующая, модуляционная и импульсная калориметрия.
6. Дилатометрия; оптический, емкостной, индуктивный датчики перемещения. Методы измерения теплопроводности. Резистометрия, мостовые и потенциометрические методы.
7. Измерение магнитных свойств дна-, пара- и ферромагнетиков. Определение параметров кривой намагничивания и петли гистерезиса в статическом и динамическом режимах измерения. Термомагнитный анализ. Применение измерений физических свойств для решения материаловедческих задач (изучения изменений структуры и фазовых превращений).

8. Методы механических испытаний. Испытания на растяжение, сжатие, изгиб, кручение. Измерение микротвердости и твердости по Брипеллю, Роквеллу, Виккерсу. Испытания на ползучесть, длительную прочность, релаксацию напряжений. Усталостные испытания.

#### Раздел 14. Основные классы материалов в металлургии

1. Классификации материалов по химическому составу, способу получения и назначению. Металлические и неметаллические материалы.
2. Сплавы на основе железа. Углеродистые стали. Белые, серые, половинчатые, ковкие и высокопрочные чугуны. Легированные стали, классификации по фазовому равновесию, структуре, области применения, уровню легированности.
3. Низколегированные стали повышенной прочности. Конструкционные улучшаемые стали. Пружинные и износостойкие стали. Штамповые стали. Инструментальные стали для режущего и измерительного инструмента. Быстрорежущие стали.
4. Жаропрочные феррито-перлитные, мартенситные и аустенитные стали. Нержавеющие ферритные и аустенитные стали. Жаростойкие стали.
5. Цветные металлы и сплавы, легирование, термическая обработка, структура, свойства, области применения.
6. Алюминий и его сплавы. Магний и его сплавы.
7. Титан и его сплавы. Никель и его сплавы.
8. Медь и ее сплавы.
9. Сплавы на основе тугоплавких металлов (Mo, W, Nb, Cr).
10. Цинк, свинец, олово и их сплавы.
11. Материалы с особыми физическими свойствами (прецизионные сплавы). Проводниковые и резистивные сплавы. Сверхпроводящие материалы. Магнитно-мягкие и магнитно-твердые материалы. Сплавы с особыми упругими и тепловыми свойствами.
12. Композиционные материалы. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на алюминиевой и никелевой основе, структура и свойства, принципы выбора упрочнителей.
13. Волокнистые композиционные материалы на основе алюминия, титана, никеля, магния; виды и свойства упрочнителей.
14. Слоистые композиционные материалы на основе металлов, неограниченно растворяющихся друг в друге, не растворяющихся или образующих интерметаллиды. Направленно кристаллизованные композиционные материалы эвтектического и неэвтектического типа. Интерметаллические соединения как основа жаропрочных сплавов, получаемых направленной кристаллизацией.

#### Литература к части 1

1. Лившиц Б.Г. Металлография. - Мд Металлургия, 1990. - 336 с.
2. Китиль Ч. Введение в физику твердого тела. - Мд Наука. 1978. - 792 с.
3. Захаров А.М. Диаграммы состояния двойных и тройных систем. - Мд Металлургия, 1990. - 240 с.
4. Новиков И.И., Розин К.М. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки. – М.: Металлургия. 1990. - 336 с.
5. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. / Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Иванов А.Н., Расторгуев Л.Н. - Мд Металлургия. 1982. - 632 с.
6. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. Физическая химия. - Мд Металлургия, 1976. - 350 с.
7. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Липецкий ЯЛ. Физические свойства металлов и сплавов. - Мд Металлургия, 1980. - 320 с.
8. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия. 1986. - 480 с.
9. Уманский Я.С., Скаков Ю.А. Физика металлов. – М.: Атомиздат, 1978. - 352 с.

10. Штремель М.А. Прочность сплавов. – М.: МИСиС, ч.1 Дефекты решетки, 1999. - 384 с.  
ч.2 Деформация. 1997. - 527 с.
11. Бокштейн С.З. Строение и свойства металлических сплавов.-М.: Металлургия. 1971.-496 с.
12. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: МИСиС. 1998.400 с.
13. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия. 1979. - 496 с.
14. Физическое металловедение. / Ред. Р.У.Кан и П. Хаазен. - в 3-х томах. – М.: Металлургия. 1987.
15. Орлов А.В., Перевезенцева А.И., Рыбин В.П. Границы зерен в металлах. – М.: Металлургия. 1980. - 310 с.
16. Кривоглаз М.А. Теория рассеяния рентгеновских лучей и тепловых нейтронов реальными кристаллами. - Киев: Наукова Думка, 1953. – 408 с.

## **Часть 2. Металлургия черных, цветных и редких металлов**

1. Железорудные минералы. Требования к качеству железных руд. Принципы металлургической и экономической оценки рудного сырья. Факторы, определяющие рентабельность промышленной переработки руды.
2. Требования, предъявляемые к доменному топливу. Процесс производства кокса, устройство коксовых печей (батарей), технология коксохимического производства. Качество доменного кокса: технический анализ, физические и механические свойства. «Заменители» кокса в доменной плавке: природный газ, коксовый газ, мазут, пылеугольное топливо, их состав и характеристика.
3. Восстановление оксидов железа. Прямое и косвенное восстановление. Влияние соотношения степеней прямого и косвенного восстановления на расход кокса в доменной плавке. Восстановление оксидов железа водородом. Восстановление в доменной печи марганца, кремния, фосфора и других элементов. Факторы, способствующие или затрудняющие восстановление этих элементов.
4. Источники поступлений серы в доменную печь, ее поведение в различных зонах печи. Распределение серы между чугуном, шлаком и газом. Основная реакция перехода серы из чугуна в шлак. Факторы, способствующие протеканию этой реакции. Внедоменная десульфурация чугуна.
5. Доменная печь. Профиль рабочего пространства. Фундамент. Огнеупорная футеровка. Охлаждение печи. Устройство леток и фурменных приборов. Засыпный и распределительный аппараты. Устройства для загрузки шихтовых материалов в печь.
6. Окисление примесей сталеплавильной ванны. Термодинамика окисления углерода. Концентрация углерода и кислорода в стальной ванне в процессе плавки. Кинетика окисления углерода. Термодинамика окисления кремния, марганца и хрома. Физико-химические основы окисления фосфора и удаления серы.
7. Термодинамика раскисления стали. Раскислительная способность отдельных раскислителей. Зависимость активности кислорода от концентрации раскислителя. Раскисление комплексными раскислителями.
8. Реакционная зона конвертера сталеплавильного производства, ее температурный режим, окислительные процессы в реакционной зоне, роль реакционной зоны в процессах шлакообразования, теплообмен в реакционной зоне.
9. Современное состояние и перспективы развития электросталеплавильного производства. Основные условия обезуглероживания. Обезуглероживание высокохромистых и высокомарганцовистых расплавов. Особенности получения слабонизкоуглеродистых сталей в дуговой печи внепечными методами.
10. Общие принципы извлечения меди, никеля, свинца, цинка из руд и концентратов.
11. Разновидности отражательной плавки. Целесообразность предварительного обжига

- концентратов перед плавкой. Преимущества и недостатки переработки конвертерных шлаков в отражательной печи.
12. Огневое и электролитическое рафинирование меди. Теоретические основы. Переработка анодных шламов. Практика процессов.
  13. Способы подготовки окисленных никелевых руд к плавке в шахтных печах. Их преимущества и недостатки. Реакции, протекающие по высоте шахты печи и во внутреннем горне.
  14. Агломерирующий обжиг свинцовых концентратов. Восстановительная плавка свинцового агломерата. Химизм процесса. Поведение свинца и металлов-спутников при плавке.
  15. Пирометаллургические методы получения цинка из огарка. Электротермия цинка. Особенности выплавки цинка в шахтных печах.
  16. Извлечение благородных металлов амальгамацией. Теоретические основы и технология процесса цианирования благородных металлов.
  17. Техника электролитического получения магния. Конструкции электролизеров.
  18. Переработка бокситов гидрохимическим способом. Принципиальная технологическая схема способа Байера.
  19. Получение глинозема способом спекания из бокситов. Принципиальная технологическая схема способа спекания.
  20. Теория электролиза криолитоглиноземных расплавов. Механизмы катодного и анодного процессов. Конструкция электролизера.
  21. Вольфрам и молибден. Способы разложения рудных концентратов. Производство чистых трехоксидов молибдена и вольфрама. Механизм восстановления трехоксидов вольфрама и молибдена водородом.
  22. Тантал и ниобий. Обзор и сопоставление способов разложения рудных концентратов различного типа (танталит-колумбит, лопарит, пирохлор). Основы способов разделения тантала и ниобия.
  23. Титан, цирконий и гафний. Основы современной технологии производства четыреххлористого титана.
  24. Физико-химические основы способов вскрытия циркониевых концентратов. Способы разделения циркония и гафния.
  25. Основы процессов получения редкоземельных металлов высокой чистоты. Варианты технологических схем переработки моноцитовых концентратов с получением соединений редкоземельных металлов и тория.

## **Литература к части 2**

1. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. *Металлургия редких металлов. Учебник для вузов.* М.: *Металлургия*, 1991.
2. Зайцев В.Я., Мергулис Е.В. *Металлургия свинца и цинка. Учебн. пособие для вузов.* М.: *Металлургия*, 1985.
3. Вегман Е.Ф. *Теория и технология агломерации.* М.: *Металлургия*, 1974.
4. Ванюков А.В., Уткин Н.И. *Комплексная переработка медного и никелевого сырья. Учебник для вузов.* Челябинск: *Металлургия*, 1988.
5. Вольдман Г.М., Зеликман А.Н. *Теория гидрометаллургических процессов.* М.: *Металлургия*, 1993.
6. Гасик М.И., Лекишев Н.П. *Теория и технология электрометаллургии ферросплавов. Учебник для вузов.* М.: *Интермет-Инжиниринг*, 1999.
7. Глинков М.А., Глинков Г.М. *Общая теория тепловой работы печей.* М.: *Металлургия*, 1990.
8. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин Л.Я. *Теоретические основы электросталеплавильных процессов.* М.: *Металлургия*, 1987



9. Доменное производство: Справочник. Т. 1 / Под ред. Е.Ф. Ветмана. М.: Metallurgy, 1989.

#### ПРИМЕР ЭКЗАМЕНАЦИОННОГО БИЛЕТА (ЗАДАНИЙ УСТНОГО ЭКЗАМЕНА)

**Вопрос 1.** Основные типы химической связи в твердых телах. Потенциалы межатомного взаимодействия Энергия связи металлических, ковалентных, ионных кристаллов. Равновесное межатомное расстояние

**Вопрос 2.** Упрочнение при образовании твердых растворов и при выделении избыточных фаз (когерентных и некогерентных). Влияние размера зерна на механические свойства..

**Вопрос 3.** Доменная печь. Профиль рабочего пространства. Фундамент. Огнеупорная футеровка. Охлаждение печи.

Как правило, один из вопросов относится к теме работ предполагаемого научного руководителя.

#### Система оценивания результатов экзамена

Результаты экзамена оцениваются по пятибалльной системе по следующему принципу:

Критерии оценивания	Баллы
Ответ полный без замечаний, продемонстрированы знания по дисциплине	5
Ответ полный, с незначительными замечаниями	4
Ответ не полный, существенные замечания	3
Ответ на поставленный вопрос не дан.	2-1

Невыполнение одного из заданий (или отказ от его выполнения) является, как правило, основанием для выставления неудовлетворительной оценки за вступительный экзамен в целом.

#### Минимальное количество баллов

Минимальное количество баллов, дающее право на участие в конкурсе по поступлению в аспирантуру, составляет 4 балла.

Программу разработал:

Н.с., к.т.н.

К.Г. Анисонян