

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им.
Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

(факультет / институт / филиал)

УТВЕРЖДЕНО

Решением ученого совета ННГУ

протокол от

«30» ноября 2022 г. №13

Рабочая программа дисциплины

Физика спекания и современные методы спекания материалов

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

Магистратура

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки

03.04.02 - Физика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

Физика конденсированного состояния

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)

Магистр

(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения

Очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижегород - 2023

1. Место и цели дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Физика спекания и современные методы спекания материалов» (Б1.В.ДВ.02.04) относится к части, формируемой участниками образовательных отношений ООП. Дисциплина является дисциплиной выбора и изучается на 1 курсе магистратуры, в 1 семестре.

Место дисциплины в учебном плане образовательной программы	Характеристика дисциплины
Блок 1. Дисциплины (модули). Часть, формируемая участниками образовательных отношений	Дисциплина Б1.В.ДВ.02.04 относится к части, формируемой участниками образовательных отношений ООП направления подготовки 03.04.02 Физика

Целями освоения дисциплины являются:

- познакомить студентов с основными понятиями, законами и методами современной теории спекания, научить использовать эти знания для решения задач, возникающих перед специалистами-материаловедами;
- научить описывать явления, протекающие в материалах при спекании на языке физического металловедения;

Освоение дисциплины базируется на знаниях, полученных при изучении дисциплин «Физика твёрдого тела» и «Введение в материаловедение», преподаваемых на 3 курсе физического факультета, а также дисциплин «Физика металлов, сплавов и керамик» и «Инженерный язык материаловедения», преподаваемых студентам 4 курса кафедры физического материаловедения.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине, в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции	Результаты обучения по дисциплине	
ПК-3. Способен свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной и проектной деятельности	ПК-3.1 Знание основных законов физики	<u>Знать:</u> 31: Знать теоретические основы физики спекания. 32: Знать современные тенденции и передовые мировые достижения в области своей профессиональной деятельности (в области физики спекания и современных технологий порошковой металлургии); 33: Знать на базовом уровне принципы построения карт механизмов спекания. 33: Знать современные методы спекания и современные технологии порошковой металлургии. 34: Знать основные этапы технологического процесса изготовления	Собеседование Собеседование Собеседование Задачи Собеседование Собеседование

		керамических образцов методом электроимпульсного плазменного спекания.	
	ПК-3.2 Умение решать научно-инновационные задачи в своей инновационной и проектной деятельности	<p>У1: Уметь применять теоретические знания в области физики металлов, сплавов и керамик и физики спекания для решения теоретических и экспериментальных задач в профессиональной деятельности, связанной с разработкой новых порошковых материалов (металлов, сплавов, керамик) с высокими физико-механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками.</p> <p>У2: Уметь разрабатывать подходы к созданию новых порошковых материалов (металлов, сплавов, керамик) с высокими физико-механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками.</p> <p>У3: Уметь использовать полученные теоретические знания в области физики спекания и карт механизмов спекания при планировании научной и технологической работы, направленной на разработку новых порошковых материалов и научных основ новых технологий их получения.</p>	<p>Собеседование Задачи</p> <p>Отчет по лабораторной работе (практическому заданию)</p> <p>Задачи</p>
	ПК-3.3 Навыки применения результатов научных исследований в инновационной и проектной деятельности	<p>В1: Владеть навыками решения задач по оптимизации структуры и свойств порошковых материалов, методов их спекания</p> <p>В2: Владеть навыками спекания современных конструкционных металлических или керамических материалов.</p> <p>В3: Владеть навыками работы на современном исследовательском (аналитическом) и</p>	<p>Задачи</p> <p>Отчет по лабораторной работе (практическому заданию)</p> <p>Отчет по лабораторной работе (практическому заданию)</p> <p>Отчет по лабораторной работе (практическому заданию)</p>

		технологическом оборудовании, позволяющем получать конструкционные порошковые материалы (металлы, сплавы, керамики). В4: Владеть навыками оптимизации технологических режимов получения и обработки современных нано- и ультрамелкозернистых конструкционных материалов (металлов, сплавов и керамик).	заданию) Отчет по лабораторной работе (практическому заданию)
--	--	---	--

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 5 зачетных единиц, всего 180 часов, из которых 66 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (32 часа занятий лекционного типа, 32 часа – практические занятия, 2 часа – контроль самостоятельной работы), 60 часов составляет самостоятельная работа обучающегося и 54 часа составляют мероприятия промежуточного контроля успеваемости (включая подготовку студента к экзамену).

Очная форма обучения	
Общая трудоемкость	5 з.е.
Часов по учебному плану в том числе	180
аудиторные занятия (контактная работа):	66
- занятия лекционного типа, ч	32
- практические занятия, ч	32
самостоятельная работа, ч	60
КСРИФ	2
Промежуточная аттестация	Экзамен

Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе					Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы, из них					
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации	Всего	
Тема 1: Введение. Методы и типы спекания. Закон Фика. Коэффициент диффузии. Равновесная концентрация вакансий	6	2	-	-	-	2	2
Тема 2: Движущая сила спекания. Химический потенциал. Кривизна поверхности. Контакт. Рост перешейка	6	2	-	-	-	2	2
Тема 3: Изолированная пора. История развития теории спекания. Модель Френкеля. Модель Пинеса. Модель	7	3	-	-	-	3	2

Кучинского. Континуальная теория спекания							
Тема 4: Скорость залечивания поры. Теория Лившица-Слезова. Механизм образования контакта. Оценка Херринга для капиллярных сил	7	3	-	-	-	3	2
Тема 5: Методика расчета энергии активации спекания. Рост зерен в процессе спекания. Размерный эффект спекания Херринга	134	3	-	54	-	57	44
Тема 6: Диаграммы спекания Эшби	50	3	-	-	-	3	45
Тема 7: Эффект Киркендалла. Твердофазное спекание взаимно растворимых твердых тел Эффект Френкеля. Диффузионная пористость	6	2	-	-	-	2	2
В том числе текущий контроль – 2 часа							
Промежуточный контроль успеваемости							
Зачет по лабораторной работе							
Экзамен – по итогам обучения в 1 семестре – 54 часа							

Краткое содержание основных разделов (тем) дисциплины «Физика спекания и современные методы спекания материалов»

Тема 1: Введение. Методы и типы спекания. Закон Фика. Коэффициент диффузии. Равновесная концентрация вакансий

Спекание (определение). Основные технологические операции процесса спекания порошковых материалов. Методы спекания и их сравнение. Типы спекания. Твердофазное спекание однородных материалов. Законы Фика. Коэффициент диффузии. Физический смысл энергии активации и предэкспоненциального множителя в выражении для коэффициента диффузии. Механизмы объемной диффузии с участием точечных дефектов. Равновесная концентрация вакансий. Термодинамическое обоснование существования вакансий в реальном кристалле.

Тема 2: Движущая сила спекания. Химический потенциал. Кривизна поверхности. Контакт. Рост перешейка

Условие равновесия поры заданного радиуса. Изменение свободной энергии Гиббса. Изменение химического потенциала поверхности. Соотношение Гиббса-Томпсона. Связь величины парциального давления пара над поверхностью с величиной кривизны поверхности. Связь величины равновесной концентрации вакансий под поверхностью с величиной кривизны поверхности. Уравнение Ленгмюра. Модель спекания двух частиц: описание механизмов диффузии, соотношение размера области контакта и размера частиц.

Тема 3: Изолированная пора. История развития теории спекания. Модель Френкеля. Модель Пинеса. Модель Кучинского. Континуальная теория спекания

История развития теории спекания. Модель вязкого спекания Френкеля. Скорость залечивания поры в вязкой среде. Модель диффузионного спекания Пинеса. Скорость залечивания поры в кристалле. Проблемы моделей спекания Френкеля и Пинеса. Уточнение модели вязкого спекания для кристаллических веществ. Ползучесть Кобла. Уточнение модели диффузионного спекания. Эксперимент Кучинского. Экспериментальное определение лапласового давления при спекании. Реологический подход к описанию процесса спекания. Континуальная теория спекания Скорохода.

Тема 4: Скорость залечивания поры. Теория Лившица-Слезова. Механизм образования контакта. Оценка Херринга для капиллярных сил

Залечивание изолированной поры. Влияние соотношения размеров поры и размеров зерен на скорость залечивания. Внешнее и внутреннее спекание (определение). Применение теории

Лившица-Слезова для описания скорости залечивания пор. Распределение вакансий вблизи поры. Механизм образования контакта между частицами при спекании. Пластичность в зоне контакта. Эксперимент Ленела. Оценка Херринга для капиллярных сил. Проблема оценки Херринга.

Тема 5: Методика расчета энергии активации спекания. Рост зерен в процессе спекания. Размерный эффект спекания Херринга

Стадии твердофазного спекания. Методика расчета энергии активации спекания в условиях электроимпульсного плазменного нагрева. Рост зерна в процессе спекания. Движущие силы роста зерен. Факторы, влияющие на скорость роста зерен при спекании. Влияние дефектов кристаллической решетки на скорость роста зерен при спекании. Связь скорости роста зерен при спекании с кинетикой растворения пор. Примеры стабилизации роста зерен при спекании оксида алюминия.

Тема 6: Диаграммы спекания Эшби

Принцип построения диаграммы спекания Эшби. Уточнение выражения для кривизны поверхности в области контакта. Скорость роста перешейка при спекании. Оценка точности эксперимента Кучинского при использовании диаграммы спекания Эшби. Минусы диаграмм спекания. Рекомендации по использованию диаграмм спекания.

Тема 7: Эффект Киркендалла. Твердофазное спекание. взаимно растворимых твердых тел Эффект Френкеля. Диффузионная пористость

Феноменология проявления эффекта Киркендалла при спекании. Описание Бардина-Херинга. Феноменология проявления эффекта Френкеля при спекании. Особенности твердофазного спекания взаимно растворимых частиц (твердых тел). Проблемы твердофазного спекания твердых растворов. Феноменология явления «противоспекания».

В процессе изучения дисциплины используются следующие образовательные технологии: проблемный метод изложения материала, диалогическая форма проведения лекций, ретроспективное изложение материала по мере развития теории спекания. Лекции проводятся с использованием средств мультимедиа.

Краткое описание лабораторных работ (практических заданий)

1 Лабораторная работа «Исследование влияния режимов спекания на плотность образцов керамик»

- Провести спекание выбранных порошков карбида вольфрама или оксида алюминия с заданной скоростью $50^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ и давлением 50 МПа до температуры окончания усадки T_s . Время выдержки при температуре спекания отсутствует.
- Зафиксировать температуру окончания усадки порошков. Провести спекание еще двух партий порошков в режиме, отличающемся одним из выбранных параметров (скоростью нагрева, температурой спекания, временем изотермической выдержки при температуре спекания, величиной приложенного давления – по согласованию с преподавателем).
Например:

- провести ещё два режима спекания при таких же условиях, но с различными временами изотермической выдержки при температуре спекания (например, 5 и 15 мин).
 - провести дополнительное спекание при двух различных скоростях нагрева (например, 10 и $100^{\circ}\text{C}/\text{мин}$);
 - провести нагрев образцов до двух различных температур спекания (например, $T_1 = T_s - 50^{\circ}\text{C}$, $T_2 = T_s - 100^{\circ}\text{C}$);

- провести дополнительное спекание образцов керамик при двух различных значениях приложенного напряжения (например, 75 и 100 МПа).
 - Провести аналогичные выбранным режимы разогрева пустых пресс-форм. Определить зависимости теплового расширения пустой пресс-формы от температуры (времени) нагрева. Рассчитать зависимости истинной усадки от температуры (времени) нагрева порошков.
 - Измерить гидростатическим методом плотность спеченных образцов.
 - Дополнительное задание 1: Измерить микротвердость и трещиностойкость спеченных образцов керамик.
 - Дополнительное задание 2: Измерить средний размер зерна и аттестовать пористость спеченных образцов керамик.
 - Дополнительное задание 3: Аттестовать фазовый состав керамик с использованием рентгеновских методов.
 - Этап групповой работы: Проанализировать влияние режима ЭИПС и/или количества введенных добавок в исходные порошки, и/или начального размера частиц порошка на конечную плотность, средний размер зерна, фазовый состав или микротвердость/трещиностойкость спеченных образцов. Объяснить полученные результаты.
- 2 Лабораторная работа «Исследование кинетики спекания порошков карбида вольфрама».
- Провести спекание порошков карбида вольфрама с различным начальным размером частиц или различной концентрацией кобальта с заданной скоростью 50°C/мин до температуры окончания усадки.
 - Получить экспериментальные кривые расширения пресс-формы без порошков по аналогичным режимам.
 - Построить истинные графики зависимости усадки и скорости усадки от температуры нагрева.
 - Измерить гидростатическим методом плотность спеченных образцов.
 - Перестроить графики зависимости усадки от температуры спекания в графики зависимости плотности прессовок от температуры спекания. Установить температуры начала и окончания трех стадий спекания.
 - Оценить энергии активации начальной стадии спекания с использованием модели Янга-Катлера. Сделать вывод о доминирующем механизме диффузионного массопереноса на этой стадии спекания.
 - Дополнительное задание 1: Измерить микротвердость и трещиностойкость спеченных образцов керамик.
 - Дополнительное задание 2: Измерить средний размер зерна и аттестовать пористость спеченных образцов керамик.
 - Дополнительное задание 3: Аттестовать фазовый состав керамик с использованием рентгеновских методов.
 - Этап групповой работы: проанализировать влияние начального размера частиц или концентрации введенных добавок на величину энергии активации начальной стадии спекания. Объяснить полученные результаты.
 - Дополнительный этап групповой работы: провести анализ влияния начального размера частиц или концентрации добавок на плотность, средний размера зерна, фазовый состав и микротвердость / трещиностойкость спеченных образцов карбида вольфрама. Объяснить полученные результаты.
- 3 Лабораторная работа «Исследование кинетики уплотнения оксидных керамик»
- Провести режим спекания порошков оксида алюминия с начальным размером частиц и различной концентрацией добавок оксида циркония (например, 1, 3 и 5 масс.%)

- ZrO₂) с заданной скоростью 50°C/мин до температуры окончания усадки.
- Получить экспериментальные кривые расширения пресс-формы без порошков по аналогичным режимам.
 - Построить истинные графики зависимости усадки и скорости усадки от температуры нагрева.
 - Измерить гидростатическим методом плотность спеченных образцов.
 - Перестроить графики зависимости усадки от температуры спекания в графики зависимости плотности прессовок от температуры спекания. Установить температуры начала и окончания трех стадий спекания.
 - На второй и третьей стадиях спекания перестроить графики зависимости плотности от температуры нагрева в соответствии с моделью, описанной в п.4.3. Определить энергию активации доминирующего механизма спекания на этих стадиях уплотнения. Проанализировать полученные результаты.
 - Дополнительное задание 1: Измерить микротвердость и трещиностойкость спеченных образцов керамик.
 - Дополнительное задание 2: Измерить средний размер зерна и аттестовать пористость спеченных образцов керамик.
 - Этап групповой работы: Установить влияние начального размера частиц или концентрации введенных добавок на величину энергии активации второй и третьей стадий спекания.
 - Дополнительный этап групповой работы: провести анализ влияния начального размера частиц или концентрации добавок на плотность, средний размера зерна, фазовый состав и микротвердость / трещиностойкость спеченных образцов оксида алюминия. Объяснить полученные результаты.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа студентов включает активное изучение лекционного материала, основной и вспомогательной учебной литературы, а также соответствующих разделов учебных и учебно-методических пособий, перечень которых приведен в п.6 настоящей рабочей программы дисциплины.

Основной целью самостоятельной работы является решение задач, заданных преподавателем для самостоятельного разбора, а также подготовка к выполнению лабораторных работ, анализ результатов, полученных в ходе выполнения лабораторных работ.

Для проведения самостоятельной работы обучающимся предоставляются свободные аудитории, доступ к компьютерной технике.

5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине:

5.1 Описание шкал оценивания

Индикаторы компетенции	ОЦЕНКИ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИЙ						
	Плохо	Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Очень хорошо	Отлично	Превосходно
Полнота знаний	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
Наличие умений	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки.	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
Наличие навыков (владение опытом)	Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач
Мотивация (личностное отношение)	Полное отсутствие учебной активности и мотивации	Учебная активность и мотивация слабо выражены, готовность решать поставленные задачи качественно отсутствуют	Учебная активность и мотивация низкие, слабо выражены, стремление решать задачи качественно	Учебная активность и мотивация проявляются на среднем уровне, демонстрируется готовность выполнять поставленные задачи на среднем уровне качества	Учебная активность и мотивация проявляются на уровне выше среднего, демонстрируется готовность выполнять большинство поставленных задач на высоком уровне качества	Учебная активность и мотивация проявляются на высоком уровне, демонстрируется готовность выполнять все поставленные задачи на высоком уровне качества	Учебная активность и мотивация проявляются на очень высоком уровне, демонстрируется готовность выполнять дополнительные задачи на высоком уровне качества
Характеристика сформированности компетенции	Компетенция в не сформирована. отсутствуют знания, умения, навыки, необходимые для решения практических (профессиональных) задач. Требуется повторное обучение	Компетенция в полной мере не сформирована. Имеющихся знаний, умений, навыков недостаточно для решения практических (профессиональных) задач. Требуется повторное обучение	Сформированность компетенции соответствует минимальным требованиям. Имеющихся знаний, умений, навыков в целом достаточно для решения практических (профессиональных) задач, но требуется дополнительная практика по большинству практических задач.	Сформированность компетенции в целом соответствует требованиям, но есть недочеты. Имеющихся знаний, умений, навыков и мотивации в целом достаточно для решения практических (профессиональных) задач, но требуется дополнительная практика по некоторым профессиональным задачам.	Сформированность компетенции в целом соответствует требованиям. Имеющихся знаний, умений, навыков и мотивации в целом достаточно для решения стандартных практических (профессиональных) задач.	Сформированность компетенции полностью соответствует требованиям. Имеющихся знаний, умений, навыков и мотивации в полной мере достаточно для решения сложных практических (профессиональных) задач.	Сформированность компетенции превышает стандартные требования. Имеющихся знаний, умений, навыков и мотивации в полной мере достаточно для применения творческого подхода к решению сложных практических (профессиональных) задач.
Уровень сформиро-	Нулевой	Низкий	Ниже среднего	Средний	Выше	Высокий	Очень высокий

важности компетенций					среднего		
----------------------	--	--	--	--	----------	--	--

При проверке отчета по лабораторной работе преподавателем оценивается:

- степень понимания целей работы;
- степень достижения поставленных целей (соответствие объема выполненной работы минимальным требованиям, установленным в учебном или учебно-методическом пособии);
- качество и достоверность полученных экспериментальных результатов;
- обоснованность полученных выводов (качество анализа полученных экспериментальных результатов);
- умение объяснить полученные результаты с использованием базовых и дополнительных источников, а также знаний, полученных при изучении профильных дисциплин;
- умение представить полученные результаты (оформить отчет в соответствии с требованиями, изложенными в учебном или учебно-методическом пособии).

Прием отчетов по проделанным лабораторным работам выставляется на основании следующих критериев:

Оценка	Критерий выставления
Отчет принят	Отчет о проделанной лабораторной работе содержит ряд некритических отклонений от формы, описанной в учебном (учебно-методическом) пособии к лабораторной работе. При ответах на дополнительные вопросы (при сдаче отчета по лабораторной работе) студент демонстрирует знание основного материала с рядом негрубых ошибок или погрешностей, наличие минимально необходимого множества навыков, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение обозначить проблемные ситуации, владение источниками, а также отвечает на большинство поставленных вопросов. В тексте отчета <u>неправомерные заимствования отсутствуют.</u>
Отчет не принят	Отчет о проделанной лабораторной работе не представлен или форма представленного отчета существенно отличается от формы, описанной в учебном (учебно-методическом) пособии к лабораторной работе. При ответах на дополнительные вопросы (при сдаче отчета по лабораторной работе) студент демонстрирует полное непонимание смысла проблем, присутствуют грубые ошибки в основном материале, студент не демонстрирует достаточно полное владение терминологией, а также отсутствующим один или несколько навыков, предусмотренных данной компетенцией. В тексте отчета встречаются элементы <u>неправомерного заимствования</u> , в том числе – текста лабораторных работ других студентов.

При промежуточной аттестации студентов на экзамене используется традиционная семибальная шкала оценивания (выставления оценки («Плохо», «Неудовлетворительно», «Удовлетворительно», «Хорошо», «Очень хорошо», «Отлично», «Превосходно»)), общие критерии выставления оценок по которой определены приказом ректора ННГУ №229-ОД от 10 октября 2002 г.:

Оценка	Критерий выставления
Превосходно	Отличная подготовка. Студент самостоятельно решает задачу, отвечает полностью на вопросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу и творческое мышление.
Отлично	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета,

	самостоятельно решает задачу в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на вопросы допускаются незначительные неточности.
Очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета, самостоятельно решает задачу и отвечает на вопросы (задания) преподавателя с небольшими неточностями.
Хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета, решает задачу с наводящими вопросами преподавателя и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).
Удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий, может решить типовую задачу с помощью преподавателя.
Неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Задача не решена. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.
Плохо	Подготовка совершенно недостаточна. Последующая передача возможна только с комиссией.

Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине, характеризующих этапы формирования компетенций.

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- индивидуальное собеседование (текущий контроль);
- индивидуальная или групповая дискуссия с преподавателем при обсуждении возможных вариантов решения поставленных задач (текущий контроль);

Для оценивания результатов обучения в виде умений используются следующие процедуры и технологии:

- простые практические контрольные задания (задачи) (текущий контроль, промежуточная аттестация);
- индивидуальная или групповая дискуссия с преподавателем при обсуждении возможных вариантов решения поставленных задач (текущий контроль);

Для оценивания результатов обучения в виде владений (оценка навыков) используются следующие процедуры и технологии:

- отчет по лабораторной работе (практическому заданию)
- комплексные практические задания (итоговая аттестация).

5.2 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения.

5.2.1 Типовые задания

1. Дайте определение процесса спекания. Опишите физический смысл движущей силы спекания.
2. Запишите второй закон Фика и дайте его физическое объяснение
3. Дайте определение коэффициента диффузии. Опишите физический смысл энергии активации и предэкспоненциального множителя.
4. Дайте определение равновесной концентрации вакансий в кристалле. Приведите термодинамическое обоснование существования вакансий в реальном кристалле
5. Дайте определение химического потенциала поверхности.
6. Запишите соотношение Гиббса-Томпсона и дайте его физическое объяснение.
7. Запишите выражение для зависимости парциального давления пара от кривизны поверхности и дайте его физическое объяснение.
8. Запишите уравнение Ленгмюра и дайте его физическое объяснение.

9. Запишите выражение для зависимости величины равновесной концентрации вакансий под поверхностью от кривизны поверхности и дайте его физическое объяснение.
10. Дайте определение ползучести Кобла и опишите ее физический смысл применительно к процессу спекания.
11. Приведите оценку Херринга для величины капиллярных сил. Определите область применения данной оценки.
12. Опишите феноменологию эффекта Киркендалла и дайте его физическое объяснение.
13. Опишите феноменологию эффекта Френкеля и дайте его физическое объяснение.
14. Запишите выражение предельного значения размеров перешейка в зоне контакта, при котором может осуществляется пластическая деформация (под областью контакта).
15. Перечислите механизмы массопереноса, участвующие в процессе спекания.
16. При достижении какой плотности начинается рост зерен условиях твердофазного спекания порошковых материалов?
17. Приведите приблизительный математический расчет минимального значения относительной плотности, при которой поры в спекаемом порошке (состоящем из сферических частиц одинакового размера) становятся изолированными от внешней среды.
18. Запишите выражение для скорости залечивания поры в вязкой среде (согласно модели Френкеля).
19. Запишите выражение для скорости залечивания поры в кристалле (согласно модели Пинеса).
20. Запишите выражение для скорости залечивания поры, расположенной на границе зерна.

5.2.3 Задачи

1. Две соприкасающиеся сферические частицы меди радиусом 0.5 мкм нагрели до температуры 800 °С. Рассчитайте отношение величины давления пара вблизи области контакта к величине давления пара над поверхностью частицы (вдали от области контакта). (При расчетах принять: величина $G\Omega/kT_m=50$, температура плавления $T_m=1356$ К, вектор Бюргерса $b=0.256$ нм).
2. Две соприкасающиеся сферические частицы меди радиусом 0.5 мкм нагрели до температуры 800 °С. Определите во сколько раз измениться равновесная концентрация вакансий под поверхностью области контакта частиц. (При расчетах принять: величина $G\Omega/kT_m=50$, температура плавления $T_m=1356$ К, вектор Бюргерса $b=0.256$ нм).
3. Определите значение величины капиллярной силы, возникающей при образовании контакта спекании между двумя сферическими частицами железа. При расчетах принять: Модуль сдвига $G=64$ ГПа, вектор Бюргерса $b=0.248$ нм, диаметр частиц $R = 3$ мкм.
4. При спекании двух сферических частиц железа возникающая капиллярная сила вызывает пластическую деформацию в области контакта. Рассчитайте максимальное значение диаметра пятна контакта частиц, при котором возможна пластическая деформация. (При расчетах принять: Модуль сдвига $G=64$ ГПа, вектор Бюргерса $b=0.248$ нм, диаметр частиц $R = 1$ мкм).

5.2.4 Вопросы собеседования

1. Какие механизмы диффузии оказывают влияние на усадку порошка в процессе спекания?
2. Как неравновесность границ зерен влияет на кинетику спекания материалов?
3. Какими способами можно повысить однородность засыпанного в пресс-форму порошка?
4. Опишите преимущества электроимпульсного плазменного спекания перед традиционными технологиями спекания.
5. Перечислите технологические способы получения объемных заготовок из порошковых материалов.
6. Что заставляет атомы двигаться в область перешейка спекающихся частиц?
7. С чем может быть связано снижение плотности однофазной системы при изотермической выдержки на температуре спекания?

8. С чем может быть связано снижение плотности многофазной системы при изотермической выдержки на температуре спекания?
9. Чем обусловлен тот факт, что аргон, используемый в процессе спекания является химически инертным?
10. С какой целью спекание некоторых материалов проводят в атмосфере водорода?
11. Какие слабые стороны имела теория вязкого спекания Френкеля?
12. Какие слабые стороны имела теория диффузионного спекания Пинеса?

5.2.5 Экзаменационные задачи для оценки компетенции ПК-1

Задача №1

Определить поток вещества, переносимого в область контакта спекающихся частиц никеля. (При расчетах принять: коэффициент испарения $\alpha=1$, разность величины давления насыщенного пара $\Delta P = 0.6$ МПа).

Задача №2

Свободное спекание порошка оксида алюминия с начальным размером частиц 12 мкм до заданной плотности занимает 30 часов. Сколько времени необходимо для спекания до аналогичной плотности порошка с размером частиц 3 мкм. (При расчетах принять: механизм спекания – зернограничная диффузия $m=4$)

Задача №3

Определите диаметр частицы, полученной путем слияния двух одинаковых стеклянных сфер диаметром D

Задача №4

Определите размер поры, оставшейся в объеме заготовки спеченной из порошка алюминия. (При расчетах принять: давление пара внутри поры $P = 0.12$ МПа, модуль сдвига $G=25.4$ ГПа, вектор Бюргерса $b=0.285$ нм).

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Ланцев Е.А., Попов А.А., Болдин М.С. Электроимпульсное плазменное спекание. Практикум. – Н.Новгород, ННГУ, 2022, 42 с. <http://www.lib.unn.ru/students/src/2934.pdf>
2. Гегузин Я.Е. Физика спекания. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 312 с. 1974 [Доступ через электронную библиотеку МИСиС: http://new.pm-ifu.ru/literatura_dlya_skachivaniya/fizika_spekaniya_ya_e_geguzin/]
3. В.А. Ивенсен. Феноменология спекания и некоторые вопросы теории. М.: Металлургия, 1985. 247 с. 1974 [Доступ через электронную библиотеку Google Книги: https://books.google.ru/books/about/%D0%A4%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F_%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D0%B0%D0%BD.html?id=1F5iHAAACA AJ&redir_esc=y]
4. Чувильдеев В.Н. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения – М.: Физматлит, 2004, 303 с. [доступно авторизованным пользователям через электронно-библиотечную систему «ЛАНЬ»: https://e.lanbook.com/book/59342?category_pk=925#book_name]. [8 экз. в фундаментальной библиотеке ННГУ].
5. Болдин М.С., Чувильдеев В.Н. Электроимпульсное плазменное спекание керамики на основе Al_2O_3 - Н.Новгород, ННГУ, 2011, 47 с. [<http://www.unn.ru/pages/e-library/methodmaterial/2010/134.pdf>]

6. Болдин М.С. Физические основы технологии электроимпульсного плазменного спекания – Н.Новгород, 2012, 59 с. [http://www.unn.ru/books/met_files/BoldinMS.pdf]

б) дополнительная литература:

1. Rahaman M. N. Ceramic processing and sintering (2nd edition) // Marcel Dekker, Inc, 2003. [Доступ через электронную библиотеку Google Книги: https://books.google.ru/books/about/Ceramic_Processing_and_Sintering.html?id=5yERCU5miKkC&redir_esc=y]
2. Z. A. Munir, D.V. Quach. Electric current activation of sintering: a review of the pulsed electric current sintering process. J. Am. Ceram. Soc., 94 [1], pp. 1-19, 2011.[Доступ через электронную библиотеку Wiley Online Library <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1551-2916.2010.04210.x/full>]
3. Roberto Orru, Roberta Licheri, Antonio Mario Locci, Alberto Cincotti, Giacomo Cao. Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering. Materials Science and Engineering R 63, pp. 127–287, 2009. [Доступ через электронную библиотеку ScienceDirect <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X08000995>]

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

1. <http://www.lib.unn.ru/> - сайт Фундаментальной библиотеки ННГУ.
2. <http://www.unn.ru/books/> - фонд образовательных электронных ресурсов ННГУ.
3. <https://e.lanbook.com> – сайт электронно-библиотечной системы «ЛАНЬ», содержащий в открытом доступе книги по отдельным разделам дисциплины.
4. <http://onlinelibrary.wiley.com> - сайт американского издательства «Wiley», публикующего статьи и монографии по актуальным направлениям физики конденсированного состояния и физического материаловедения, совпадающим с тематикой отдельных разделов преподаваемой дисциплины.
5. <http://www.sciencedirect.com> – сайт международного издательства «Elsevier», публикующего статьи и монографии по актуальным направлениям физики конденсированного состояния и физического материаловедения, совпадающим с тематикой отдельных разделов преподаваемой дисциплины.
6. <http://new.pm-i-fp.ru> сайт электронной библиотеки МИСиС
7. <https://books.google.ru> сайт международной электронной библиотеки

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Библиотечные залы и компьютерные классы ННГУ и НИФТИ ННГУ, обеспечивающие доступ к Интернет – ресурсам. Для чтения лекций со стороны физического факультета и НИФТИ ННГУ предоставляются аудитории с презентационным оборудованием.

Для выполнения лабораторных работ со стороны НИФТИ ННГУ предоставляется доступ к современному исследовательскому и технологическому оборудованию, необходимому для проведения практических занятий, в том числе:

- Трубочатая печь Nabertherm RHTC 80
- планетарная мельница Fritsch Pulverisette 6
- Смеситель турбулентный Вибротехник С 2.0
- Ультразвуковой гомогенизатор Hielscher UP200Ht
- вибрационный грохот Fritsch Anaysette 3
- одноосный гидравлический пресс (10т.).
- установка электроимпульсного плазменного спекания «DR. SINTER model SPS-625 Spark Plasma Sintering System»
- весы аналитические «Sartorius CPA».
- отрезной станок Struers Secotom-10
- установка для запрессовки образцов в бакелит Buehler SimpliMet-1000
- автоматизированный шлифовальный станок Buehler Vector Power Head

- интерференционные металлографические микроскопы Leica DM IRM для исследования макроструктуры сплавов.
- растровый электронный микроскоп Jeol JSM-6490 с энергодисперсионным микроанализатором INCA 350.
- автоматизированный микротвердомер VHS-100.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению 03.04.02 - Физика и рекомендаций ООП направленности «Физика конденсированного состояния».

Авторы к.ф.-м.н., старший преподаватель Болдин М.С.

Заведующий кафедрой: д.ф.-м.н., проф. Чувильдеев В.Н.

Рецензент: зам. декана по учебной работе Белова О.В.

Программа одобрена на заседании методической комиссии физического факультета от «17» ноября 2022 года, протокол № б/н.

Председатель учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ

_____ / Перов А.А. /