

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики твердого тела и неравновесных систем

**ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ
В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ**

*Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний*

Самара
Издательство «Самарский университет»
2015

УДК 378
ББК 74.58

Рецензент д-р тех. наук, проф. А. Н. Комов

Диффузионные процессы в конденсированных средах:
методические указания / сост. А. В. Покоев, Ю. В. Осинская. –
Самара : Изд-во «Самарский университет», 2015. – 32 с.

В указаниях содержатся учебно-тематический план; рекомендованные списки основной и дополнительной литературы, периодических изданий; учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины для организации самостоятельной работы; содержание практических занятий, основные понятия дисциплины.

Предназначены для бакалавров, изучающих дисциплину «Диффузионные процессы в конденсированных средах» в рамках профиля «Физика конденсированного состояния» направления 03.03.02 Физика.

УДК 378
ББК 74.58

© Покоев А. В., Осинская Ю. В.,
составление, 2015
© ФГБОУ ВПО «Самарский государственный университет», 2015

1. Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе, требования к уровню освоения содержания дисциплины

1.1. Цели и задачи изучения дисциплины

Цель дисциплины – ознакомление с феноменологической и атомной теорией диффузии в кристаллических, нанокристаллических и аморфных твердых телах, экспериментальными закономерностями и методами исследования диффузии, взаимосвязи и роли структуры, дефектов структуры с диффузионными процессами.

Задачи дисциплины:

- раскрыть взаимосвязь типа и характера межатомного взаимодействия в твердых телах с закономерностями и параметрами наблюдаемых диффузионных процессов;
- рассмотреть основные фундаментальные способы описания диффузионных процессов в твердых телах и методы их исследования;
- рассмотреть влияние дефектов структуры на диффузионные процессы в твердых телах и способы описания диффузии по дефектам кристаллической решетки.

1.2. Результаты обучения и формируемые в результате освоения дисциплины (модуля) компетенции

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся должен

знать:

- современное состояние теории и практики описания диффузионных процессов в твердых телах с различной структурой;
- роль, научное и практическое значение диффузионных процессов в природных геологических, гетерогенных физико-химических процессах и фазовых превращениях в конденсированном состоянии веществ;
- основные методы изучения диффузии;

уметь:

- самостоятельно понимать и анализировать вопросы фазовых превращений, взаимосвязи кристаллической и электронной структуры твердых тел с их диффузионными свойствами;
- анализировать общие проблемы физики диффузионных процессов и уметь пропагандировать их;

владеть:

- представлениями об общей структуре современной физики диффузионных процессов и понимать перспективы её развития;
- навыками вести целенаправленный поиск литературы по заданным вопросам и направлениям диффузионных процессов в твердых телах по реферативным журналам, электронным библиотекам и другим Internet-источникам;

иметь опыт:

- самостоятельного анализа и обоснования взаимосвязи типа межатомной связи, атомной, кристаллической и электронной структуры твердых тел, дефектов структуры с параметрами диффузионных процессов;
- самостоятельной работы с научной литературой по профилю и понимать ее.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование элементов **следующих компетенций** в соответствии с ФГОС ВО по данному направлению:

Код компетенции	Наименование результата обучения
ОПК-1	способностью использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, включая знания о предмете и объектах изучения, методах исследования, современных концепциях, достижениях и ограничениях естественных наук (прежде всего химии, биологии, экологии, наук о земле и человеке)
ОПК-2	способностью использовать в профессиональной деятельности базовые знания фундаментальных разделов математики, создавать математические модели типовых профессиональных задач и интерпретировать полученные результаты с учетом границ применимости моделей
ОПК-3	способностью использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач
ПК-1	способностью использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин
ПК-2	способностью проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта

1.3. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Диффузионные процессы в конденсированных средах» относится к числу основных дисциплин цикла обучения по профилю «Физика конденсированного состояния», в которой рассматриваются основные вопросы физики диффузионных процессов в конденсированных средах, определяющих структуру и свойства твердых тел и изделий. Для усвоения дисциплины требуются знание основ общей физики, основные базовые понятия термодинамики, математического анализа и физики твердого тела, основные понятия квантовой механики.

Дисциплина «Диффузионные процессы в конденсированных средах» связана со следующими дисциплинами учебного плана дисциплин бакалавриата по профилю «Физика конденсированного состояния»: «Физическое материаловедение», «Симметрия и структура конденсированных сред», «Физика и структура реальных конденсированных сред», «Дифракционный структурный анализ конденсированных сред», «Электронные свойства твердых тел».

2. Содержание дисциплины

2.1. Объем дисциплины и виды учебной работы

Семестр – 8, вид отчетности – зачет

Вид учебной работы	Объем часов/ зачетных единиц
Трудоемкость изучения дисциплины	216/6
<i>Контактная работа с преподавателем</i>	84
Обязательная аудиторная учебная нагрузка (всего)	72
в том числе:	
лекции	36
практические занятия	6
лабораторные занятия	30
Контролируемая самостоятельная работа (КСР)	12
Самостоятельная работа студента (всего)	132
в том числе:	
Подготовка к практическим занятиям	6
Подготовка к лабораторным занятиям	30
Самостоятельное изучение тем	80
Подготовка реферата	10
Подготовка презентации	6

2.2. Содержание учебного курса

Тема 1. Диффузия и структура твердых тел

Диффузия. Научное и практическое значение изучения диффузии. Взаимосвязь диффузии и структуры твердых тел. Диффузионные механизмы изменения структуры твердых тел. Применение диффузии в технологиях машиностроения, полупроводниковой технологии производства приборов и химико-термической обработке. Диффузия в природных явлениях. Виды диффузии. Существующие подходы к описанию диффузии.

Тема 2. Уравнения диффузии и методы исследования диффузии

Концентрация и ее изменение. Описание классического диффузионного эксперимента. Изменение геометрических размеров тел при взаимной диффузии.

Уравнения Фика. Виды коэффициентов диффузии: коэффициент взаимной диффузии, парциальные и собственные коэффициенты диффузии, коэффициенты само- и гетеродиффузии. Основные решения уравнения диффузии с постоянным и переменным коэффициентом диффузии.

Экспериментальные закономерности диффузии. Температурная зависимость коэффициента диффузии. Энергия активации диффузии и ее определение.

Методы измерения диффузии. Метод радиоактивных изотопов. Методы вторичной ионной масс-спектропии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, обратного резерфордского рассеяния, Оже-спектроскопии. Рентгенографическое исследование диффузии в поликристаллах, монокристаллах и аморфных материалах.

Тема 3. Феноменологическая теория диффузии

Концентрационная зависимость коэффициента диффузии. Теория Даркена взаимной диффузии. Восходящая диффузия. Эффект Горского. Опыт Аустина-Ричардса. Старение сплавов. Взаимная диффузия. Эффект Киркендалла. Эффект Френкеля. Метод Больцмана – Матано. Реакционная диффузия.

Тема 4. Атомная теория диффузии

Теория диффузии Френкеля. Атомные механизмы диффузии. Энергия активации диффузии. Первый и второй закон Фика. Влияние движущих сил на диффузию.

Связь коэффициента диффузии с характеристиками вакансий.

Броуновское движение. Среднее перемещение частиц. Соотношение Эйнштейна.

Среднее перемещение частиц при случайных блужданиях. Эффекты корреляции. Коэффициент корреляции. Вычисление коэффициента диффузии (коэффициента корреляции) для вакансионного механизма и кубиче-

ских решеток. Пятичастотная модель эффектов корреляции в ГЦК-решетках. Корреляционные эффекты в различных механизмах диффузии. Изотопный эффект.

Экспериментальные закономерности примесной диффузии. Нормальная и аномальная диффузия. Теории примесной диффузии в благородных металлах.

Тема 5. Диффузия по дефектам кристаллической решетки

Объемная диффузия.

Диффузия по границам зерен поликристаллов. Диффузия по одиночной границе зерна (модель Фишера). Влияние ориентации границ зерен на диффузию. Рентгенографический метод измерения зернограничной диффузии в поликристаллах.

Диффузия по дислокациям.

Диффузия в порошковых материалах. Рентгенографическое измерение межчастичной диффузии в порошковых материалах.

Тема 6. Современные направления развития диффузионных исследований и измерений

Квантовая диффузия. Диффузия в наноматериалах. Диффузия в биоматериалах. Мембраны и мембранные технологии.

2.3. Учебно-тематический план

2.3.1. Структура дисциплины

Наименование разделов, тема	Количество часов				
	Всего	Аудиторная работа			Внеаудиторная самостоятельная работа
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
1	2	3	4	5	6
Тема 1. Диффузия и структура твердых тел	10	2	–	–	8
Тема 2. Уравнения диффузии и методы исследования диффузии	50	8	–	14	28
Тема 3. Феноменологическая теория диффузии	42	6	3	8	25
Тема 4. Атомная теория диффузии	32	10	3	–	19

Тема 5. Диффузия по дефектам кристаллической решетки	38	8	–	8	22
Тема 6. Современные направления развития диффузионных исследований и измерений	16	2	–	–	14
Написание реферата	10	–	–	–	10
Подготовка презентации	6	–	–	–	6
Контролируемая самостоятельная работа (КСР)	12	–	–	–	12
Итого	216	36	6	30	132

2.3.2. Лабораторные работы

№	№ раздела, темы	Наименование лабораторных работ	Кол-во часов	Образовательная технология
1	2	3	4	5
1	Тема 2	Рентгенографическое исследование объемной диффузии химических элементов в поликристаллах	8	Письменная работа, групповая дискуссия, проектирование, лабораторная работа
2	Тема 2	Метод ядерного гамма-резонанса и его применение в физике твердого тела	6	Письменная работа, групповая дискуссия, проектирование, лабораторная работа
3	Тема 3	Исследование концентрационной зависимости коэффициента диффузии	8	Письменная работа, групповая дискуссия, проектирование, лабораторная работа
4	Тема 5	Рентгенографическое измерение коэффициента диффузии при спекании бинарных порошковых металлических смесей	8	Письменная работа, групповая дискуссия, проектирование, лабораторная работа
		Итого	30	

2.3.3. Практические занятия (семинары)

№	№ Раздела, темы	Тема	Кол-во часов	Образовательная технология
1	2	3	4	5
1	Тема 3	Решение задач по теме «Феноменологическая теория диффузии»	2	Групповое обсуждение, решение задач, письменные работы
2	Тема 4	Решение задач «Атомная теория диффузии»	2	Групповое обсуждение, решение задач, письменные работы
3	Тема 3, 4	Контрольная работа	2	Решение задач, письменные работы
Итого			6	

2.3.4. Самостоятельное изучение разделов дисциплины

№ раздела, темы	Вопросы, выносимые на самостоятельное изучение	Кол-во часов	Форма контроля
1	2	3	4
Тема 1	Диффузия и структура твердых тел. Концентрация	8	Конспект
Тема 2	Уравнения диффузии и методы измерения диффузии	14	Конспект
Тема 3	Концентрационная зависимость коэффициента диффузии	14	Конспект
Тема 4	Вычисление коэффициента диффузии (корреляции) для вакансионного механизма и кубических решеток. Изотопный эффект. Теории примесной диффузии в благородных металлах	16	Конспект

Тема 5	Диффузия по дефектам в кристаллах.	14	Конспект
Тема 6	Квантовая диффузия. Диффузия в наноматериалах	14	Конспект, коллоквиум
Тема 3, 4	Подготовка к практическим занятиям	6	Домашнее задание, рабочая тетрадь, контрольная работа
Тема 2, 3, 5	Подготовка к лабораторным занятиям	30	Рабочая тетрадь, устный групповой опрос, отчет по лабораторной работе
Тема 1-6	Подготовка реферата	10	Индивидуальный устный опрос, реферат, дискуссия
Тема 1-6	Подготовка презентации	6	Доклад, презентация
	Итого	132	

2.3.5. Курсовой проект (курсовая работа)

Не предусмотрен.

2.3.6. Образовательные технологии

В процессе преподавания дисциплины «Диффузионные процессы в конденсированных средах» используются следующие образовательные технологии:

1. Традиционная образовательная технология (*лекция, решение задач, коллоквиум*);
2. Технология интерактивного коллективного взаимодействия (*дискуссия, групповое обсуждение, письменные работы, решение задач, лабораторная работа*);
3. Технология проблемного обучения (*проблемная лекция, реферат, аннотация, презентация доклада, проектирование, моделирование*).

2.3.7. Интерактивные образовательные технологии, используемые в аудиторных занятиях

Семестр / тема	Вид занятия	Используемые интерактивные образовательные технологии	Количество часов
1	2	3	4
8 / 1	Лекция	Проблемная лекция	2
8 / 2	Лекция	Проблемная лекция	4
8 / 3	Лекция	Проблемная лекция	6
	Практическое занятие	Групповое обсуждение, решение задач	2

8 / 4	Лекция	Проблемная лекция	10
	Практическое занятие	Групповое обсуждение, решение задач	2
8 / 5	Лекция	Проблемная лекция	8
8 / 6	Лекция	Проблемная лекция	2
Итого			36 (50 % аудиторных часов)

2.3.8. Оценочные средства результатов обучения*

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции (ее уровень)	Наименование средств оценки результатов обучения
1	2	3	4
1	Тема 1. Диффузия и структура твердых тел	ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ПК-1	Рабочая тетрадь, конспект, аннотация
2	Тема 2. Уравнения диффузии и методы исследования диффузии	ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ПК-1, ПК-2	Рабочая тетрадь, конспект, аннотация, устный групповой опрос, отчет по лабораторной работе
3	Тема 3. Феноменологическая теория диффузии	ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ПК-1, ПК-2	Рабочая тетрадь, конспект, аннотация, устный групповой опрос, отчет по лабораторной работе
4	Тема 4. Атомная теория диффузии	ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ПК-1	Рабочая тетрадь, конспект, аннотация
5	Тема 5. Диффузия по дефектам кристаллической решетки	ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ПК-1, ПК-2	Рабочая тетрадь, конспект, аннотация, устный групповой опрос, отчет по лабораторной работе
6	Тема 6. Современные направления развития диффузионных исследований и измерений	ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ПК-1	Рабочая тетрадь, конспект, аннотация, коллоквиум, разноуровневые задания

7	Написание реферата по курсу лекций	ОПК-1, ОПК-3, ПК-1	Реферат
8	Подготовка презентации по курсу лекций	ОПК-1	Презентация доклада
9	Текущий контроль		Использование балльно-рейтинговой системы (БРС)
10	Промежуточная аттестация: зачет		По результатам БРС

3. Балльно-рейтинговая система

В университете в ходе промежуточной аттестации перевод рейтинговых баллов студентов в принятую систему оценки знаний («отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно», «зачтено», «не зачтено») осуществляется единообразно.

– Оценка «отлично» выставляется студенту, набравшему от **86 до 100** рейтинговых баллов, означающих, что теоретическое содержание курса освоено полностью, необходимые компетенции и практические навыки работы с освоенным материалом сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены.

– Оценка «хорошо» выставляется студенту, набравшему от **71 до 85 баллов**, означающих, что теоретическое содержание курса освоено полностью, необходимые компетенции сформированы, некоторые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы недостаточно, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, некоторые виды заданий выполнены с ошибками.

– Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, набравшему от **60 до 70** баллов, означающих, что теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, необходимые компетенции сформированы, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий выполнено, некоторые из выполненных заданий выполнены с ошибками.

– Оценка «зачтено» по дисциплине, по которой в данном семестре нет экзамена, выставляется студенту, набравшему **50 и более баллов**, означающих, что содержание курса освоено полностью, необходимые компетенции и практические навыки работы с освоенным материалом сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены.

Максимальная сумма баллов, набираемая студентом по дисциплине «**Диффузионные процессы в конденсированных средах**», закрываемой семестровой (итоговой) аттестацией (экзамен) равна 100.

Баллы, характеризующие успеваемость студента по дисциплине, набираются им в течение всего периода обучения за изучение отдельных тем и выполнение отдельных видов работ.

1.	Посещение занятий (<i>рабочая тетрадь, конспект</i>)	до 9 баллов (0,25 балла за 1 занятие)
2.	Контрольные мероприятия	до 40 балла
	<i>Коллоквиум</i>)	<i>до 8 баллов</i> (8 баллов за 1 коллоквиум)
	<i>Аннотация</i>	<i>до 9 баллов</i> (0,25 балла за 1 аннотацию)
	<i>Разноуровневые задания</i>	<i>до 8 баллов</i> (8 баллов за 1 задание)
	<i>Участие в практическом занятии (выход к доске)</i>	<i>до 9 баллов</i> (3 балла за 1 участие)
	<i>Контрольная работа</i>	<i>до 6 баллов</i> (6 балла за одну работу)
3.	Выполнение заданий по дисциплине в течение семестра	до 21 баллов
	<i>Домашние задания</i>	<i>до 9 баллов</i> (3 балла за 1 задание)
	<i>Написание реферата</i>	<i>до 7 баллов</i>
	<i>Презентация доклада</i>	<i>до 5 баллов</i>
4	Выполнение дополнительных практико-ориентированных заданий	до 30 баллов
	<i>Участие в студенческой научной конференции</i>	<i>до 15 баллов</i>
	<i>Оформление информационного учебного ресурса</i>	<i>до 15 баллов</i>
5	Ответ на экзамене	до 30 баллов
	Итого:	100 + 30 баллов

Распределение баллов, составляющих основу оценки работы студента по изучению дисциплины «**Диффузионные процессы в конденсированных средах**» в течение 12 недель 8 семестра.

- 100 баллов распределяются на учебный период (8 семестр), заканчивающийся промежуточной аттестацией;
- 70 баллов – посещение и контрольные мероприятия;
- 30 баллов - ответ на экзамене;
- возможность набора дополнительных 30 баллов за практико-ориентированные задания.

4. Сведения о материально-техническом обеспечении дисциплины

№п/п	Наименование оборудованных учебных кабинетов, лабораторий	Перечень оборудования и технических средств обучения
1	Лекционная аудитория	Мультимедийное оборудование
2	Компьютерный класс	Мультимедийное оборудование
3	Лаборатория диффузионных процессов (ком. 101ф)	Весы аналитические, вакуумный пост ВУП-4, установка для отжигов в магнитных полях ПМП-2, печь ДВП-74, ДРОН-2.0
4	База литературных научно-технических данных о диффузионных процессах в конденсированных средах	Компьютер
5	Программы моделирования диффузионных процессов в конденсированных средах	Компьютер

5. Информационные технологии, средства электронного обучения и лицензионное программное обеспечение

1. Пакет Microsoft Office 2003;
2. Операционная система семейства Windows;
3. Электронная почта (<http://mail.ru>, <http://gmail.com>, <http://yandex.ru> и др.) на базе глобальных информационно-коммуникационных порталов, внутренняя корпоративная электронная почта ФГБОУ ВПО "Самарский государственный университет" (<http://mail.samsu.ru>);
4. Личный кабинет преподавателя на основе открытых медиа ресурсов корпорации Google.

6. Литература

6.1. Основная

1. Бокштейн Б.С., Ярославцев А.Б. Диффузия атомов и ионов в твердых телах. – М.: МИСИС, 2005.
2. Мерер Х. Диффузия в твердых телах: монография, пер. с англ. – М.: Издательство Интеллект, 2011.
3. Франк-Каменецкий Д.А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике: учебник-монография, 4-е изд. – Долгопрудный: Интеллект, 2008.
4. Гуров К.П., Карташкин Б.А., Угастэ Ю.Э. Взаимная диффузия в многофазных металлических системах. – М.: Наука, 1981.
5. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. – М.: Metallurgy, 1978.

Информационный библиотечный ресурс

1. Национальный цифровой ресурс Руконт – <http://rucont.ru/>.
2. Электронная библиотека – <http://www.book.ru/>.
3. Издательство «Лань», электронно-библиотечная система – <http://e.lanbook.com/>.
4. Электронная библиотека издательства «Юрайт» – <http://www.biblio-online.ru/home>.
5. Электронно-библиотечная система – <http://ibooks.ru/>.
6. Комплект программ математического моделирования диффузионных процессов в различных условиях и формы рентгеновской линии диффузионного образца:
 1. Программа «Математическое моделирование процесса взаимной диффузии для прослойки одного материала в двух других».
 2. Программа «Математическое моделирование процесса взаимной диффузии для прослойки одного материала в другом».
 3. Программа «Моделирование диффузии при одноосном механическом напряжении».
 4. Программа «Математическое моделирование процесса самодиффузии».
 5. Программа расчета профиля концентрации «Диффузия из слоя конечной толщины».
 6. Программа расчета профиля концентрации «Постоянный источник диффузии».
 7. Программа расчета профиля рентгеновской линии DiffProfile. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015614323.

6.2. Дополнительная

1. Бутягин П.Ю. Химическая физика твердого тела. – М.: МГУ, 2006. – 272 с.
2. Mehrer H. Diffusion in Solids. – Springer: Series in Solid State Science, 2007. – 651 p.
3. Гегузин Я.Е. Диффузионная зона. – М.: Наука, 1979.
4. Хилл А. Наноструктурные материалы / под ред. Р. Ханнинка. – М.: Техносфера, 2009.
5. Любов Б.Я. Диффузионные процессы в неоднородных твердых средах. – М.: Наука, 1981.
6. Любов Б.Я. Диффузионные изменения дефектной структуры твердых тел. – М.: Metallurgia, 1985.
7. Бокштейн Б.С., Бокштейн С.З., Жуховицкий А.А. Термодинамика и кинетика диффузии в твердых телах. – М.: Metallurgia, 1974.
8. Боровский И.Б., Гуров К.П., Марчукова И.Д., Угастэ Ю.Э. Процессы взаимной диффузии в сплавах. – М.: Наука, 1973.

9. Малкович Р.Ш. Математика диффузии в полупроводниках. – СПб.: Наука, 1999, - 389 с.
10. Гуров К.П. Основания кинетической теории. – М.: Наука, 1973.
11. Шьюмон П. Диффузия в твердых телах. – М.: Metallurgia, 1966.
12. Маннинг Дж. Кинетика диффузии атомов в кристаллах. – М.: Мир, 1971.
13. Диффузия в металлах с ОЦК-решеткой. Пер. с англ. – М.: Metallurgia, 1969.
14. Бокштейн С.З. Диффузия и структура металлов. – М.: Metallurgia, 1973.
15. Болтакс Б.И. Диффузия в полупроводниках. – М.: Физматгиз, 1961.
16. Зайт В. Диффузия в металлах. – М.: Иностранная литература, 1958.
17. Шиняев А.Я. Диффузионные процессы в сплавах. – М.: Наука, 1975.
18. Герцрикен С.Д., Дехтяр И.В. Диффузия в металлах и сплавах в твердой фазе. – М.: Физматгиз, 1960.
19. Федоров Г.Б., Смирнов Е.А. Диффузия в реакторных материалах. – М.: Атомиздат, 1978.
20. Грабский М.В. Структура границ зерен в металлах. – М.: Metallurgia, 1972.
21. Старк Дж.П. Диффузия в твердых телах/ Пер. с англ. под ред. Л.И. Трусова. – М.: Энергия, 1980.

6.3. Учебно-методическое обеспечение и ресурсы информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» для самостоятельной работы студентов

1. Покоев А.В. Диффузионные процессы в твердых телах: учеб. пособие /А.В. Покоев, Ю.В. Осинская. – Самара: Изд-во «Самарский университет», 2012. – 160 с.
2. Покоев А.В., Степанов Д.И. Практикум по диффузионным процессам в твердых телах: учебное пособие. – Самара: Изд-во «Самарский госуниверситет», 2002. – 69 с.
3. Электронная библиотека учебников: <http://books4study.name>.
4. Электронный учебник с разделом «Диффузия в твердых телах»: <http://solidstate.karelia.ru/~materials/files/Material/Unit%201/text.htm>.
5. Мазанко В.Ф., Покоев А.В., Миронов В.М., Герцрикен Д.С., Миронов Д.В., Степанов Д.И., Луценко Г.В. Диффузионные процессы в металлах под действием магнитных полей и импульсных деформаций (монография в двух томах). – М.: Изд-во «Машиностроение-1», Самара: Изд-во «Самарский университет», 2006. – Т. I (346 с.). Т. II (320 с.).
6. Покоев А.В. Рентгенографическое исследование диффузионных процессов в твердых телах с различным структурным состоянием. Глава 6. Перспективные материалы. Т. IV: Учебное пособие / под ред. Д.Л. Мерсона. – Тольятти: ТГУ, 2011 – С. 317-396.

6.4. Рекомендуемые периодические издания

1. Журнал «Физика твердого тела» <http://journals.ioffe.ru/ftt/>.
2. Журнал «Журнал технической физики» <http://journals.ioffe.ru/jtf/>.
3. Журнал «Письма в журнал технической физики» <http://journals.ioffe.ru/pjtf/>.
4. Журнал «Физика металлов и металловедения» <http://fmm.impruran.ru/>.
5. Журнал «Журнал экспериментальной и теоретической физики» <http://jetp.ac.ru/>.
6. Периодическое издание «Defect and Diffusion Forum» <http://www.ttp.net/1012-0386.html>.
7. Журнал «Physica Status Solidi (a)» <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pssa.v212.8/issuetoc>.
8. Журнал «Physica B: Condensed Matter» <http://www.journals.elsevier.com/physica-b-condensed-matter/>.

СОДЕРЖНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Практическое занятие по теме 3 «Феноменологическая теория диффузии»

1. Вывести связь между весовой (массовой) и атомной концентрациями, атомной и весовой концентрациями; рассчитать весовую и атомную концентрацию титана в соединениях Ti_2Ni , $TiNi$, $TiNi_3$ и углерода в Fe_3C .

2. Вещество, нанесенное на поверхность полуограниченного образца, диффундирует внутрь (одномерная задача). Найти глубину диффузии L_D в единицах $(Dt)^{1/2}$, понимая под ней расстояние от первоначальной поверхности раздела, на котором концентрация диффузанта уменьшается в сто раз, и считая, что диффузия реализуется из а) тонкой пленки (мгновенный источник диффузии) и б) постоянного источника с концентрацией на поверхности раздела c_0 . Оценить долю вещества, которое продиффундирует за одно и тоже время диффузии t на расстояние в 1,1 раза большее (т.е. на 10 %), чем глубина диффузии.

3. Эффект Киркендалла изучали в системе $Ag-Au$ при $940^\circ C$. Сдвиг инертных меток за 10 ч составил 0,028 см. Коэффициент взаимной диффузии в плоскости, где расположены метки ($N_{Ag}=0,635$; $\nabla N_{Ag}=7,2 \text{ см}^{-1}$) равен $D=3,7 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$. Рассчитать скорость движения меток v , собственные коэффициенты диффузии серебра D_{Ag} и золота D_{Au} .

4. В таблице приведены экспериментальные данные измерений температурной зависимости коэффициента диффузии Al в Cu . Рассчитать параметры D_0 и Q температурной зависимости Аррениуса $D(T)=D_0 \exp(-Q/RT)$ для коэффициента диффузии Al в Cu .

$T, ^\circ C$	1075	1050	1000	950	900	800	700
$D \cdot 10^{13}, \text{ м}^2/\text{с}$	8,9	5,5	3,1	1,5	0,63	0,14	0,016

5. Диффузионную пару из двух металлов А и В отжигали в течение 9 суток при температуре, отвечающей существованию двухфазной области ($\alpha+\beta$). Растворимость В в А составляет при этой температуре 35 % (ат.), а растворимость А в В 20 % (ат.). Приняв, что $D_\alpha=D_\beta=4 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{с}$, т.е. оба коэффициента не зависят от концентрации, а система – неограниченная, рассчитать положение двухфазной области.

6. Полуограниченный образец из сплава железо-углерод, содержащий вначале 1 % (по массе) С, отжигали в течение 20 ч при постоянной температуре, в вакууме, в результате чего он потерял 0,376 г углерода. Вычислите коэффициент диффузии и его концентрацию на глубине в 100 мкм от поверхности, если диффузия происходит перпендикулярно поверхности (80 см^2) и концентрация углерода на этой поверхности равна нулю. Плотность образца равна плотности чистого железа ($7,8 \text{ г}/\text{см}^3$).

Практическое занятие по теме 4 «Атомная теория диффузии»

1. Оценить плотность потока атомов меди в плоскости раздела диффузионной пары $Cu-Ni$, приняв $D_{Cu}=10^{-14}$ м²/с, а ширину диффузионной зоны – 10 мкм.

2. Зная, что энергия активации самодиффузии в меди равна 2,04 эВ, а энергия миграции вакансии 1,08 эВ, найти отношение равновесных концентраций вакансий при 1000 °С и 500 °С.

3. Для повышения износоустойчивости поверхности стальных изделий производится цементация (насыщение углеродом). Коэффициент диффузии углерода в стали определяется формулой $D(T)=0,12 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(-134,76 \text{ кДж/моль}/RT)$ м²/с. Сколько нужно времени для образования цементированного слоя толщиной 0,5 мм на стальной пластине при 927 °С.

4. Коэффициент диффузии углерода в α -железе определяется формулой $D=0,12 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(-134,76 \text{ кДж/моль}/RT)$ м²/с. Оценить частоту скачков атома углерода, путь, проходимый им в единицу времени и среднеквадратичное смещение (глубину диффузии) при температуре 727 °С. Параметр решетки α -железа принять равным $a=2,86$ Å.

5. В приближении случайных блужданий атома рассчитать коэффициент диффузии атома для ГЦК-решетки в направлениях [100] и [110].

6. Избыточные (закаленные) вакансии подвергаются отжигу в золоте при 40 °С. Энтальпия активации перемещения вакансии (ΔH_v^m) равна 0,82 эВ. Время релаксации (τ_v) вакансий при этой температуре составляет 200 ч. Рассчитайте коэффициент диффузии вакансий (D_v) и среднее между стоками (L). Обсудите допущения, сделанные при расчете.

7. Вычислите энтропию перемещения атома углерода в решетке α -железа. Частоту колебаний атома углерода примите равной 10^{13} с⁻¹, период ОЦК решетки α -железа 2,9 Å. $D_0=0,2$ см²/с.

8. Пик внутреннего трения, связанный с диффузией углерода в α -железе, наблюдали при 13 °С (период колебаний – 17,8 с) и 48 °С (0,476 с). Рассчитайте энергию активации процесса и коэффициент диффузии углерода в α -железе при 13 °С. Период решетки α -железа 2,9 Å.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ КУРСА

Абсолютная атомная концентрация – количество атомов i -го компонента, отнесенных к единице объема. Размерность – м^{-3} .

Аннигиляция дислокаций – слияние и взаимное уничтожение двух дислокаций или элементов одной дислокационной петли, имеющих противоположный знак.

Атом внедрения – собственный или примесный атом в кристалле, занимающий внеузельное положение в кристаллической решетке.

Атом замещения – примесный атом, занимающий положение в свободном узле кристаллической решетке, т.е. замещающий собственный атом кристалла в узле.

Бивакансия (иногда **Дивакансия**) – комплекс из двух вакансий, расположенных в соседних узлах решетки кристалла и объединившихся в результате случайных столкновений.

Ближний порядок – упорядоченность в расположении структурных частиц вещества (атомов, молекул, ионов), повторяющаяся на расстояниях, сравнимых с межатомными.

Бюргерса вектор – мера искаженности кристаллической решетки, обусловленной присутствием в ней дислокации. Он определяет энергию дислокации, действующие на дислокацию силы, величину связанного с дислокацией сдвига, влияет на подвижность дислокации.

Ван-дер-Ваальса силы – универсальные силы взаимодействия атомов, ионов, молекул, связанных с наличием у них электрических дипольных моментов, существующие помимо ионных, ковалентных, и других видов взаимодействия.

Вакансия – точечный дефект в кристаллах, представляющий собой не занятый атомом узел кристаллической решетки.

Винтовая дислокация – прямолинейная дислокация с вектором Бюргерса, параллельным дислокационной линии.

Внутреннее трение – свойство твердого тела, характеризующее его способность необратимо превращать подводимую энергию упругих колебаний в тепловую и объединяющее различные механизмы этого превращения.

Внутренние напряжения – напряжения, существующие в твердых телах в отсутствие внешних напряжений, т.е. напряжения, вызываемые внутренними источниками.

Восходящая диффузия (диффузия «в гору») – диффузия по градиенту концентрации, т. е. из точек пространства, где она ниже, в точки пространства, где она выше.

Второе уравнение Фика (2-й закон Фика) – описывает изменение концентрации компонента c_i во времени в некотором элементарном выде-

ленном объеме $\Delta x \cdot 1 \text{ см}^2$ диффузионной зоны: $\partial c_i / \partial t = D_i \cdot \partial c_i^2 / \partial x^2$, где D_i – коэффициент диффузии i -го компонента.

Гетеродиффузия – диффузия атомов или молекул одного сорта в среде атомов или молекул других сортов.

Гетероструктура – термин в физике полупроводников, обозначающий выращенную на подложке слоистую структуру из различных полупроводников, в общем случае отличающихся шириной запрещенной зоны.

Глубина диффузии – величина, пропорциональная среднеквадратичному смещению атомов при их случайных направлениях скачков за время диффузии t при температуре T .

Градиент концентрации – количественная характеристика степени неоднородности распределения концентрации вещества компонента в пространстве образца, определяемая как $\nabla c_i(x, y, z, t)$, где $c_i(x, y, z, t)$ – относительная атомная концентрация; ∇ – дифференциальный оператор градиента. В одномерном случае – это $\partial c_i(x, t) / \partial x$.

Дальний порядок – упорядоченность в расположении структурных частиц вещества (атомов, молекул, ионов), повторяющаяся на неограниченно больших расстояниях. Его основным признаком является симметрия кристалла.

Движущая внешняя сила – сила, приводящая к изменению потенциального рельефа кристаллической решетки и частоты перескоков диффундирующих атомов в противоположных направлениях действия силы.

Дефект кристаллической решетки – любое отклонение от ее идеального периодического атомного строения.

Дефект упаковки – двумерный дефект кристаллического строения, связанный с возможным отступлением от закономерного расположения плотноупакованных слоев кристаллической решетки.

Дефект упаковки внедрения – дефект, полученный в результате внедрения плотно упакованного слоя.

Дефект упаковки вычитания – дефект, полученный в результате удаления плотно упакованного слоя.

Дислокации – линейные дефекты кристаллической решетки, представляющие собой линии, вдоль и вблизи которых нарушено характерное для кристалла правильное расположение атомных плоскостей.

Дислокационная петля – замкнутая плоская петля внутри кристалла, образованная линией смешанной дислокации.

Дислокационная сетка – пространственное расположение дислокаций в металле, не подвергнутом деформированию.

Дислокационная стенка – устойчивая конфигурация, представляющая собой совокупность множества одноименных дислокаций, расположенных одна под другой.

Дислокационная ступенька – дислокационный сегмент, соединяющий два отрезка краевой дислокации, лежащие в различных параллельных плоскостях скольжения.

Дислокационная трубка – модель диффузии по дислокации, в которой дислокация рассматривается как трубка, с радиусом равным радиусу ядра дислокации, внутри которой материал считается однородным и для которой выполняются законы диффузии Фика.

Диффузионная зона – область пространства образца, содержащая первоначальную границу раздела компонентов, и примыкающие к ней области основных изменений концентрации компонентов после диффузионного взаимодействия.

Диффузионная пара – два компонента, соприкасающихся первоначально по плоской (или другой заданной) поверхности, выбранной для изучения или рассмотрения диффузионного процесса.

Диффузионный отжиг – выдержка диффузионного образца при фиксированной температуре T в течение фиксированного промежутка времени t .

Диффузионное покрытие – покрытие, создаваемое диффузионным насыщением поверхности металлов или сплавов одним или несколькими химическими элементами и последующим формированием покрытия путем проведения взаимной диффузии атомов элемента покрытия и основы при высокой температуре.

Диффузионная сварка – сварка за счёт взаимной диффузии на атомарном уровне свариваемых поверхностей деталей из черных, цветных металлов и сплавов, керамики, стекла и др. разнообразных материалов. Диффузионная сварка проходит в следующие стадии: подготовка шероховатых поверхностей, нагрев деталей в защитной среде или вакууме, сжатие и выдержка свариваемых поверхностей; при этом все точки соединяемых материалов сближаются на расстояния межатомных взаимодействий и происходит формирование структуры сварного соединения под влиянием диффузии и процессов релаксации.

Диффузия – макроскопически наблюдаемый процесс самопроизвольного распространения вещества, обусловленный неоднородностью распределения вещества в пространстве (градиентом концентрации) и тепловым движением атомов или молекул вещества.

Диффузное рассеяние рентгеновских лучей – рассеяние рентгеновских лучей веществом в направлениях, для которых не выполняется уравнение дифракции Вульфа-Брэггов.

Диффузное гало – размытый диффузный максимум рассеянных рентгеновских лучей, соответствующий полностью разупорядоченной структуре аморфного материала.

Задача (цель) диффузионного эксперимента – экспериментальное установление распределения концентрации i -го компонента $c_i(r,t)$ в диффузионной зоне в зависимости от времени и температуры.

Закалка – термическая обработка материалов, которая заключается в нагреве их до температур выше критических точек, выдержке (по необходимости) при этих температурах и последующем быстром охлаждении.

Закон Аррениуса – характерный вид температурной зависимости некоторых величин в физике и химии, являющийся следствием классической статистики Больцмана, которой, в частности, подчиняется коэффициент диффузии $D(T)=D_0 \cdot \exp(-Q/RT)$, где D_0 – предэкспоненциальный множитель (фактор), Q – энергия активации диффузии, T – абсолютная температура.

Закон Вегарда – линейная зависимость параметра решетки твердого раствора $a(c)$ от концентрации c компонента: $a(c)=a_0+bc$, где a_0 – параметр решетки растворителя, b – константа Вегарда.

Зернограничная диффузия – диффузия в поликристаллических телах, сосредоточенная в узких зонах контакта соседних зерен с различной кристаллографической ориентацией.

Идеальный кристалл – кристалл с совершенной трехмерно-периодической решеткой во всем своем объеме, лишенный любых дефектов строения – вакансий, примесных атомов, дислокаций и т.д.

Изотопный эффект – заключается в изменении скорости диффузионного выравнивания концентрации двух изотопов с атомными массами m_α и m_β одного и того же элемента в одном и том же растворителе, вследствие разной скорости их перемещения (диффузии), обусловленной различием атомных масс изотопов.

Изотропия – независимость свойств вещества от направления.

Ионная связь – химическая связь между атомами, которая характеризуется несимметричным распределением заряда между соседними атомами.

Кластер – совокупность, группа атомов или молекул, выделяющихся по какому-либо физическому или химическому признаку из других подобных микрообъектов и объединяющихся в устойчивое образование.

Коагуляция – объединение мелких диспергированных частиц в большие по размеру агрегаты.

Ковалентная связь – химическая связь между одинаковыми или близкими по свойствам атомами, когда происходит спаривание электронов оболочек соседних атомов без существенного изменения зарядов каждого.

Компонент – один из сортов атомов или молекул рассматриваемой диффузионной системы.

Константа Вегарда – коэффициент пропорциональности в линейной зависимости параметра решетки твердого раствора $a(c)$ от концентрации c компонента (см. **Закон Вегарда**).

Координационное число – количество ближайших соседних атомов, находящихся на одинаковом расстоянии от данного атома.

Корреляционные эффекты – эффекты, возникающие при диффузии вследствие коррелированных направлений последовательных диффузион-

ных скачков атома и приводящих к изменению среднеквадратичного смещения атомов (глубины диффузии) по сравнению со случаем случайных направлений скачков диффундирующего атома.

Коттрелла атмосфера – неоднородное распределение точечных дефектов вокруг дислокационной линии, обусловленное упругим взаимодействием полей упругих напряжений дислокации и точечных дефектов.

Коэффициент взаимной диффузии – величина, численно равная плотности результирующего потока диффундирующих компонентов в их плоскости раздела, при градиенте концентрации компонента, равному единице; определяется по потоку, фиксируемому по отношению к неподвижной системе отсчета (край образца).

Коэффициент зернограничной диффузии – величина, численно равная плотности потока атомов диффундирующего вещества в объеме границы зерен, при градиенте его концентрации, равному единице.

Коэффициент объемной диффузии – величина, численно равная плотности потока атомов диффундирующего вещества в объеме монокристалла или зерна поликристалла, при градиенте его концентрации, равному единице.

Коэффициент поверхностной диффузии – величина, численно равная плотности потока атомов диффундирующего вещества вдоль поверхности объекта, при градиенте его концентрации, равному единице.

Коэффициент диффузии – величина, численно равная плотности потока диффузанта при градиенте концентрации, равному единице.

Коэффициент изотопной диффузии – характеризует выравнивание состава радиоактивного изотопа компонента. Если радиоактивные атомы того же сорта, что и неактивные в растворителе, то коэффициент изотопной диффузии D_i^* является **коэффициентом самодиффузии**.

Коэффициент корреляции – показывает, во сколько раз среднеквадратичное смещение (коэффициент диффузии) атома при наличии эффектов корреляции больше среднеквадратичного смещения (коэффициента диффузии) атома при отсутствии эффектов корреляции, т. е. при абсолютно случайных направлениях последовательных скачков атома.

Коэффициент примесной диффузии – характеризует выравнивание состава примеси с малым ее содержанием в сильно разбавленных твердых растворах, т. е. при стремлении концентрации примеси к нулю (см. **Примесная диффузия**).

Коэффициент самодиффузии – характеризует выравнивание состава радиоактивного элемента (компонента) в своем нерадиоактивном изотопе-растворителе, например, диффузия ^{26}Al в ^{27}Al .

Краевая дислокация – дислокация, линия которой перпендикулярна вектору Бюргерса.

Краудион – специфический вид квазиодномерного точечного дефекта типа межузельного атома, в котором соседние атомы смещены в основном вдоль одного из направлений плотной упаковки.

Легирование – введение атомов различных химических элементов в материалы в целях придания им определенных свойств.

Линия дислокации – совокупность центров дислокаций в параллельных атомных плоскостях.

Линии сдвига, линии скольжения – наблюдаемый на поверхности твердого тела результат деформации сдвига в виде системы параллельных линий или полос.

Магнитодиффузионный эффект – заключается в изменении коэффициента гетеродиффузии при наложении магнитного поля на процесс диффузии.

Магнитопластический эффект – заключается в увеличении длины пробега дислокаций при наложении постоянного магнитного поля, сопровождающийся увеличением пластических характеристик материала.

Макроскопические дефекты – дефекты в кристаллах, имеющие характерный линейный размер, во всех измерениях превосходящий межатомное расстояние.

Макроскопический подход – использует классическую термодинамику и методы неравновесной термодинамики; характеризует только макросостояния системы и использует для этого небольшое число переменных, например, три: температуру, объем и число частиц. Если система находится в равновесном состоянии, то ее макроскопические параметры постоянны, тогда как микроскопические параметры изменяются со временем. Это означает, что каждому макросостоянию соответствует несколько (на самом деле, бесконечно много) микросостояний. Макроскопический подход хорошо описывает явления и процессы, но не вскрывает физические причины их происхождения.

Мгновенный источник диффузии (или бесконечно тонкий слой) – источник диффундирующего вещества бесконечно малой толщины на поверхности полубесконечного твердого тела. Практически – это тонкая пленка с начальной толщиной, много меньше чем глубина диффузии.

Межузельный атом - собственный атом, втиснувшийся между атомами, которые расположены в узлах кристаллической решетки.

Межчастичная диффузия – диффузия компонента вдоль межчастичных границ или прослоек в прессованных порошковых материалах.

Металлическая связь – тип межатомной связи в металлических веществах, возникающий при взаимодействии решетки положительных ионов с электронным «газом» коллективизированных электронов.

Микроскопический подход – использует законы статистической физики, атомной физики и квантовой механики для описания взаимодействия между частицами твердого тела или других сред и на основе этого объяс-

няет структуру и свойства этих объектов. Описание диффузионных процессов на микроскопическом уровне вызывает значительные трудности, связанные со сложностью картины многочастичных взаимодействий в твердых телах. Феноменологический подход, являясь более качественным, чем микроскопический, все же дает возможность описать диффузионные процессы, происходящие в твердых и молекулярных растворах.

Многокомпонентная диффузия – диффузия в системе, в которой в диффузионном взаимодействии принимают участие атомы (компоненты) трех и более сортов (например: взаимная диффузия в сплавах).

Наноматериаловедение – комплексная междисциплинарная сфера деятельности, соединяющая фундаментальную и прикладную науки, технологию и производство. Кратко ее задачи можно сформулировать следующим образом: 1) разработка новых и улучшение характеристик традиционных материалов; 2) исследование микроструктуры на разных масштабных-временных уровнях с целью совершенствования материалов и прогнозирования их поведения в различных условиях эксплуатации; 3) изучение всего спектра макросвойств (физико-механических, физико-химических, тепловых, электрических, магнитных, оптических и др.) в широком диапазоне условий, включая экстремальные; 4) развитие теоретических основ, позволяющих предсказывать свойства материалов на основе физических моделей различного уровня (электронного, атомарного, кластерного, микро- и мезоскопического); 5) разработка техники компьютерного моделирования, анализа и дизайна материалов с использованием аппарата квантовой механики, методов молекулярной динамики, конечных элементов, динамики структурных дефектов и др.; 6) создание новых и совершенствование традиционных технологий производства, обработки, характеристики и утилизации материалов; 7) поиск новых сфер и способов применения наноматериалов, оптимизация их выбора при разработке изделий, разработка новых принципов конструирования и сборки.

Нанообъект – согласно международной классификации, это объект, размеры которого менее 100 нм (0,1 мкм). К нанообъектам могут быть отнесены как объекты, имеющие четкие пространственные границы и доступные для прямого наблюдения методами электронной и зондовой сканирующей микроскопии (наночастицы, нанопластины, нанотрубка, нанопора), так и прочие наноразмерные объекты, размер которых часто определяется косвенными методами.

Наноструктурные материалы (или наноматериалы) – это разновидность материалов, которым именно присутствие специфических наноразмерных элементов структуры (менее 100 нм) придает особые свойства, отсутствующие у аналогов без наноструктуры.

Объемная диффузия – диффузия по объему кристаллической решетки монокристалла или по объему зерна поликристалла.

Онзагера подход – согласно этому подходу, плотность диффузионного потока i -го компонента пропорциональна градиентам химических потенциалов компонентов системы: $j_i = -L_{ij} d\mu_i/dx$, где L_{ij} – коэффициенты Онзагера, μ_i – химический потенциал i -го компонента.

Опыт Даркена – эксперимент по взаимной многокомпонентной диффузии в диффузионной паре $(Fe-Si-C)-(Fe-C)$, демонстрирующий явление «восходящей» диффузии (диффузия «в гору»), которое невозможно объяснить с помощью законов Фика, согласно которым атомы углерода должны диффундировать из мест с большей его концентрацией в места с меньшей концентрацией.

Отжиг – вид термической обработки материалов, осуществляемый после закалки и представляющий собой нагрев до некоторой температуры с последующим охлаждением с целью улучшения или исследования свойств.

Относительная атомная концентрация – отношение количества атомов данного компонента к общему количеству атомов всех компонентов, отнесенных к единице объема вещества системы. Безразмерная величина.

Парциальный коэффициент диффузии (D_{ij}) – учитывает влияние потоков одних компонентов на потоки других. Его можно определить как для собственной, так и для взаимной диффузии.

Первое уравнение Фика (1-й закон Фика) – устанавливает пропорциональность диффузионного потока частиц j_i градиенту их концентрации dc_i/dx или, другими словами, показывает, что «движущей силой» диффузии является градиент концентрации диффундирующего компонента: $j_i = -D_i dc_i/dx$, где D_i – коэффициент диффузии; знак «-» указывает на то, что поток направлен против направления градиента концентрации.

Переползание дислокаций – перемещение линии краевой дислокации из одной плоскости скольжения в другую, ей параллельную, в результате диффузии к линии дислокации межузельных атомов или вакансий, т. е. сопровождается переносом массы.

Плотнейшая упаковка – форма расположения атомов в кристаллической решётке, которая характеризуется наибольшим числом атомов в единице объёма кристалла.

Плотность дислокаций – суммарная длина всех линий дислокаций в единице объёма.

Плотность потока атомов – количество атомов, проходящее через единицу площади поверхности в единицу времени.

Поверхностная диффузия – диффузия на поверхности материала; характеризуется наиболее низкой энергией активации и наибольшими значениями коэффициента диффузии.

Полубесконечное тело – математическая абстракция означающая, что твердое тело занимает полупространство, например, правое полупространство при $x > 0$. Практически означает, что глубина диффузии в том же направлении x много меньше линейных размеров твердого тела в направлении оси x .

Порошковая металлургия – технология получения деталей из порошков и порошковых смесей и изготовления изделий из них (металлов или их композиций с неметаллическими порошками). В общем виде технологический процесс порошковой металлургии состоит из четырёх основных этапов: производство порошков, смешивание порошков, уплотнение (прессование, брикетирование) и спекание.

Применяется как экономически выгодное в массовом производстве. Технология позволяет получить высокоточные изделия, а также применяется для достижения особых свойств или заданных характеристик, которые невозможно получить каким-либо другим методом.

Постоянный источник – источник диффундирующего вещества, занимающий, например, левое полупространство при $x < 0$, диффундирующий в полубесконечное твердое тело, располагающееся в правом полупространстве при $x > 0$, и который поддерживает на границе раздела тел при $x = 0$ постоянную концентрацию c_0 . Практически этот случай диффузии реализуется в случае наличия ограниченной растворимости компонентов друг в друге (например, левого полубесконечного тела в правом полубесконечном теле).

Предэкспоненциальный фактор (или множитель) – параметр Аррениусовской (температурной) зависимости коэффициента диффузии; измеряется в $\text{см}^2/\text{с}$. Предэкспоненциальный множитель зависит преимущественно от структуры материала.

Примесная диффузия – диффузия компонента при его бесконечном разбавлении $c \rightarrow 0$ (или диффузия в «чистый» растворитель).

Радиационные дефекты – структурные повреждения, образующиеся при облучении твердого тела потоками частиц и жестким электромагнитным излучением.

Радиационно-стимулированная диффузия – диффузия при наличии воздействия корпускулярных частиц и ионизирующих излучений.

Рекристаллизация – процесс образования и роста одних кристаллических зёрен (кристаллитов) поликристалла за счёт других. Скорость рекристаллизации резко (экспоненциально) возрастает с повышением температуры и определяется диффузией. Рекристаллизация протекает особенно интенсивно в пластически деформированных материалах. При этом различают три стадии рекристаллизации: первичную, когда в деформированном материале образуются новые неискажённые кристаллиты, которые растут, поглощая зёрна, искажённые деформацией; собирательную – неискажён-

ные зёрна растут за счёт друг друга, вследствие чего средняя величина зерна увеличивается; и вторичную рекристаллизацию, которая отличается от собирательной тем, что способностью к росту обладают только немногие из неискажённых зёрен. Рекристаллизация устраняет структурные дефекты (в первую очередь уменьшает на несколько порядков плотность дислокаций), изменяет размеры зёрен и может изменить их кристаллографическую ориентацию (текстуру) поликристалла.

c-x-кривая – функция, описывающая распределение концентрации компонента диффундирующего вещества в образце вдоль направления диффузии, совпадающим с осью x , после изотермического диффузионного отжига образца при температуре T и времени диффузии t .

Самодиффузия – диффузия вещества в «самом себе»; обнаруживается и исследуется по выравниванию изотопного состава или другими специальными методами (например, методом, ядерного магнитного резонанса).

Скольжение или консервативное движение винтовой дислокации – это переход из одной атомной плоскости в другую без переноса массы.

Скольжение или консервативное движение краевой дислокации – перемещение дислокации в плоскости скольжения без переноса массы; всегда происходит по плоскости, в которой находится и линия дислокации, и вектор сдвига.

Слой конечной толщины – источник диффундирующего вещества на поверхности полубесконечного твердого тела, начальная толщина которого соизмерима с глубиной диффузии.

Случайных блужданий приближение – математическая модель процесса случайных изменений – шагов в дискретные моменты времени применительно к процессу диффузии. При этом предполагается, что направление каждого элементарного диффузионного скачка атома (на каждом шаге) не зависит от направления его предыдущих скачков и от времени.

Смешанная дислокация – дислокация, отдельные малые участки которой имеют краевую или винтовую ориентацию, но большая ее часть не перпендикулярна и не параллельна вектору сдвига.

Снука (Сноека) атмосфера – область упорядоченного расположения примесных атомов внедрения вокруг линии дислокации.

Собственный коэффициент диффузии – характеризует собственную подвижность каждого компонента; вводится по стандартным правилам в подвижной системе координат, движущейся в диффузионной зоне вместе с первоначальной границей раздела (или с метками).

Соотношение Эйнштейна-Смолуховского – связь между коэффициентом диффузии атомов (частиц) D_x и их подвижностью u_x : $D_x = u_x kT$, а также между квадратом среднеквадратичного смещения диффундирующих атомов $\langle(\Delta x)^2\rangle$ и их коэффициентом диффузии D_x : $\langle(\Delta x)^2\rangle = 2D_x \tau$, где τ – время диффузии.

Старение металлических сплавов – это процесс изменения их структуры и свойств в результате распада пересыщенного твердого раствора.

Сузуки атмосфера – измененная концентрация примесных атомов или атомов легирующего элемента в дефекте упаковки растянутой дислокации.

Термодинамическая активность – аналог концентрации, введенный для сохранения и применения формы законов идеальных твердых растворов для реальных; термодинамическая активность учитывает химическое взаимодействие, которое существует между атомами диффундирующих компонентов в реальных твердых растворах, и различие в их атомных объемах и массах.

Уравнение Вульфа-Брэггов ($2d \sin\vartheta = n\lambda$) – уравнение, определяющее угол отражения ϑ рентгеновских лучей с длиной волны λ от семейства атомных плоскостей с межплоскостным расстоянием d , n – порядок отражения.

Френкелевская пара – совокупность (комплекс) междоузельного атома и вакансии.

Химический потенциал компонента – это величина, показывающая, как изменяется свободная энергия системы при изменении числа частиц в системе при постоянных температуре и давлении.

Частичная или неполная дислокация – дислокация с вектором Бюргера, не являющимся вектором тождественной трансляции.

Шокли частичная дислокация – граница дефекта упаковки, полученного в результате сдвига. Ее вектор Бюргера меньше минимального единичного вектора тождественной трансляции.

Экстраплоскость – неполная атомная плоскость, вставленная в кристалл, не имеющая продолжения в другой половине кристалла.

Энергия активации диффузии – высота потенциального барьера, который преодолевает диффундирующий атом при элементарном перескоке из одного устойчивого положения в решетке в соседнее, отнесенная к молю диффундирующих частиц. Энергия активации диффузии зависит от типа межатомной связи (электронного строения атомов диффузанта и растворителя), атомного механизма диффузии, геометрии скачка и т. д.; является параметром аррениусовской (температурной) зависимости коэффициента диффузии; измеряется в Дж/моль.

Энергия связи – равна работе, которую необходимо затратить, чтобы разделить эту систему на составляющие ее частицы и удалить их друг от друга на такое расстояние, на котором их взаимодействием можно пренебречь.

Эффект Горского – перераспределение концентрации атомов компонентов твердого раствора под действием упругой деформации образца при повышенных температурах.

Эффект Киркендалла – явление смещения инертных меток в диффузионной зоне, обусловленных релаксацией неравновесных вакансий по механизму переползания дислокаций, возникших в диффузионной зоне вследствие неравенства встречных потоков диффундирующих компонентов.

Эффект Френкеля – появление пор в окрестности плоскости контакта диффузионной пары, обусловленных объединением неравновесных вакансий, возникших в диффузионной зоне вследствие неравенства встречных потоков диффундирующих компонентов.

Ядро дислокации – область вокруг линии краевой дислокации радиусом порядка $\sim 1-2$ межатомных расстояний, в которой смещения атомов из равновесных положений совершенной решетки превышают половину максимального смещения атомов.

Учебное издание

**ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ
В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ**

Методические указания

Публикуется в авторской редакции
Титульное редактирование *Т. А. Мурзиновой*
Компьютерная верстка, макет *Н. П. Бариновой*

Подписано в печать 29.09.2015. Гарнитура Times New Roman. Формат 60x84/16.

Бумага офсетная. Печать оперативная.

Усл.-печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ № 2662.

Издательство «Самарский университет», 443011, Самара, ул. Академика Павлова, 1

Отпечатано на УОП СамГУ