

А

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Липецкий государственный технический университет»**

## **Рентгенография металлов и сплавов**

### **Учебное пособие**

Рекомендовано УМС ЛГТУ в качестве учебного пособия для студентов ЛГТУ, обучающихся по направлению подготовки ВО 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», 22.03.02 «Металлургия», 28.03.02 «Наноинженерия»

Липецк

Липецкий государственный технический университет

2019

УДК 621. 386 (07)

Р39

Авторы: Е.В Кузнецова, О.А. Косинова, И.А Коваленко., И.А. Цыганов

**Рецензенты:**

кафедра математики и физики ФГБОУ ВО «Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского»; и. о. зав. каф., канд. пед.наук, доцент Жигаленко С.Г.;  
директор ООО Научно-производственное предприятие «Валок-Чугун»  
канд. техн. наук Бабанов А.А.

Р39 Рентгенография металлов и сплавов: учебное пособие / Е.В. Кузнецова, О.А. Косинова, И.А. Коваленко, И.А. Цыганов. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2019. – 184 с. – Текст: непосредственный.

ISBN 978-5-88247-979-3

Учебное пособие посвящено описанию основ традиционных и современных методов рентгеноструктурного анализа в материаловедении. Приведены задачи по рентгеноструктурному анализу и даны типичные примеры их решения. Учебное пособие предназначено для обучающихся по направлениям 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», 22.03.02 «Металлургия» и 28.03.02 «Нанотехнологии», изучающих дисциплины «Рентгенография и электронная микроскопия», «Методы контроля и анализа веществ», «Методы диагностики в нанотехнологиях».

Печатается по решению Редакционного совета ЛГТУ.

Табл. 20. Ил. 59. Библиогр.: 21 назв.

УДК 621. 386 (07)

ISBN 978-5-88247-979-3

ФГБОУ ВО «Липецкий  
государственный технический  
университет», 2019

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. МЕСТО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СРЕДИ ДРУГИХ ВИДОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ .....	10
<b>Вопросы для самоконтроля</b> .....	14
2. ФИЗИКА РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ .....	14
2.1. Получение рентгеновских лучей и их природа.....	14
2.1.1. Рентгеновские трубки.....	19
2.1.2. Вывод уравнения Вульфа-Брегга.....	24
<b>Вопросы для самоконтроля</b> .....	26
3. СПЕКТРЫ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ .....	27
3.1. Разложение в спектр .....	27
3.2. Сплошной спектр рентгеновских лучей: получение и особенности .....	28
3.2.1. Факторы, влияющие на распределение интенсивности в сплошном спектре .....	30
3.2.2. Коэффициент полезного действия возбуждения сплошного спектра .....	31
3.3. Характеристический спектр рентгеновских лучей: получение и особенности.....	32
3.4. Теория характеристического рентгеновского спектра .....	34
3.5. Тонкая структура спектральной линии и правило отбора .....	35
3.6. Оборудование для рентгеноспектрального анализа .....	37
Рентгенофлуоресцентный спектрометр с волновой дисперсией .....	38
<b>Вопросы для самоконтроля</b> .....	41
4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ С ВЕЩЕСТВОМ.....	42
4.1. Рассеяние рентгеновских лучей.....	42
4.1.1. Когерентное рассеяние.....	43

4.1.2. Некогерентное рассеяние .....	44
4.2. Поглощение рентгеновских лучей.....	47
4.2.1. Фотоэлектрический эффект .....	47
4.2.2. Образование электронно-позитронных пар .....	52
4.3. Вывод закона ослабления рентгеновских лучей.....	53
4.3.1. Распределение потерь между $\sigma/\rho$ , $\tau/\rho$ и $\chi/\rho$ при ослаблении рентгеновских лучей.....	55
4.3.2. Ослабление рентгеновских лучей в сложном веществе .....	56
4.3.3. Ослабление немонохроматического излучения.....	57
4.3.4. Селективно-поглощающие фильтры .....	58
4.3.5. Глубина проникновения .....	59
Примеры решения задач на ослабление рентгеновских лучей .....	60
5. МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ.....	67
6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИММЕТРИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ИЗ ДИФРАКЦИОННОЙ КАРТИНЫ .....	71
6.1. Обратная решетка.....	71
6.2. Уравнение Лауэ. Дифракция на трехмерной решетке.....	74
6.2.1. Интерференция рентгеновских лучей, рассеянных атомным рядом .....	74
6.2.2. Интерференция лучей, рассеянных пространственной решеткой. Уравнения Лауэ .....	76
6.2.3. Связь между индексами Лауэ и Миллера.....	77
6.2.4. Условие дифракции рентгеновских лучей в терминах обратной решетки.....	78
6.2.5. Вывод уравнения Вульфа-Брегга в терминах обратной решетки.....	80
7. МЕТОДЫ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА .....	82
7.1. Метод Лауэ.....	82



7.2. Метод монокристалла .....	89
7.2.1. Определение периода идентичности, типа решетки и числа атомов в элементарной ячейке .....	91
7.3. Метод порошков (поликристалла).....	93
7.3.1. Условия возникновения дифракционных максимумов .....	93
7.3.2. Способы регистрации дифракционной картины .....	94
7.3.3. Индицирование порошковых рентгенограмм .....	95
7.3.4. Прецизионное определение периодов кристаллической решетки.....	100
7.4. Метод широко расходящегося луча (метод Косселя).....	103
8. РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ.....	106
8.1. Качественный фазовый анализ .....	106
8.1.1. Сборники дифракционных данных и работа с ними .....	107
8.1.2. Чувствительность метода .....	112
8.1.3. Методика проведения качественного фазового анализа .....	113
8.2. Количественный фазовый анализ .....	113
Методы количественного фазового анализа .....	115
8.3. Рентгенографический анализ преимущественных ориентировок (текстур).....	120
<b>Вопросы для самоконтроля .....</b>	<b>142</b>
8.4. Определение напряжений I, II и III рода .....	142
<b>Вопросы для самоконтроля .....</b>	<b>150</b>
9. РЕНТГЕНОВСКАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ.....	151
<b>Вопросы для самоконтроля .....</b>	<b>159</b>
Заключение .....	160
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	161
Приложение 1 .....	163
Приложение 2 .....	169