

П. В. БАХМАТОВ
В. В. ГРИГОРЬЕВ
А. А. КАЛУГИНА



РАСТРОВАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ

КАК ИНСТРУМЕНТ РЕШЕНИЯ
ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧ В СВАРКЕ



П. В. Бахматов, В. В. Григорьев, А. А. Калугина

**РАСТРОВАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ
КАК ИНСТРУМЕНТ РЕШЕНИЯ
ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧ В СВАРКЕ**

Учебное пособие

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2024

УДК 621.791
ББК 34.641
Б30

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортно-технологические комплексы» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» *Макиенко Виктор Михайлович*;
кандидат технических наук, доцент, директор Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук Хабаровского Федерального исследовательского центра *Комаров Олег Николаевич*

Бахматов, П. В.

Б30 Растровая электронная микроскопия как инструмент решения инженерных задач в сварке : учебное пособие / П. В. Бахматов, В. В. Григорьев, А. А. Калугина. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 148 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-2061-7

Приведены сведения об основах и принципах проведения растровой электронной микроскопии. Описаны основные функциональные возможности Hitachi 3400N. Показаны результаты научных исследований в решении инженерных задач с применением растрового электронного микроскопа: качественный анализ распределения легирующих элементов как по плоскости сканируемого образца, так и по заданному направлению, фрактография, диффузионные слои в сварных соединениях, изучение поверхности свариваемых кромок и сварочной проволоки, причин порообразования в металле шва и другое. Включены как обобщение многочисленных публикаций в отечественной и зарубежной специализированной литературе, так и собственные исследования авторов.

Для студентов, магистров, аспирантов технических университетов и институтов, а также специалистов НИИ, КБ, предприятий авиационно-космического комплекса. Материалы книги могут служить основой для разработки технологических рекомендаций, стандартов, определяющих содержание учебных планов, учебно-методических пособий, для профессиональной подготовки инженерных и научных кадров.

УДК 621.791
ББК 34.641

ISBN 978-5-9729-2061-7

© Бахматов П. В., Григорьев В. В., Калугина А. А., 2024
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2024
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ПРИНЦИПЫ РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ	5
1.1. Растровая электронная микроскопия	5
1.2. Применение РЭМ для исследования структуры материалов	6
1.2.1. Формирование изображения в РЭМ.....	6
1.2.2. Детекторы РЭМ.....	8
1.2.3. Режимы высокого и низкого давления	10
1.2.4. Рентгеноспектральный микроанализ	10
1.2.5. Подготовка образцов.....	11
1.2.6. Примеры исследования структуры материалов.....	13
Вопросы для самоконтроля.....	14
ГЛАВА 2. РАСТРОВЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП НІТАСНІ 3400N	15
2.1. Органы управления, которыми оснащена основная часть прибора	15
2.1.1. Основная часть прибора	15
2.1.2. Столик для образца	15
2.1.3. Панель, соответствующая откачке	17
2.1.4. Система, создающая разрежение.....	18
2.1.5. Панель с контакторами	19
2.2. Органы управления, используемые отсеком с экраном	19
2.2.1. Отсек с экраном.....	19
2.2.2. Персональная вычислительная машина.....	20
2.2.3. Пульт, используемый для ручного управления	21
2.2.4. Мышь и шаровой манипулятор	22
2.3. Основные элементы колонны микроскопа	23
2.3.1. Обслуживание передвижной апертуры линзы объектива	25
2.3.2. Техническое обслуживание узла с диафрагмой.....	26
2.3.3. Техническое обслуживание конденсорной апертуры	29
2.3.4. Чистка апертурных пластинок.....	31
Вопросы для самоконтроля	32
ГЛАВА 3. ЭКСПЛУАТАЦИЯ	33
3.1. Запуск системы.....	33
3.1.1. Соответствующие запуску действия	33
3.2. Установка образца.....	33
3.2.1. Выбор способа подготовки образца соответственно исследуемому виду материала	34
3.2.2. Установка образца на столик	34
3.2.3. Установка держателя образца.....	35
3.2.4. Измерение и указание высоты образца.....	35
3.2.5. Смещение столика в положение, соответствующее замене образца.....	37

3.2.6. Загрузка образца.....	38
3.3. Подача ускоряющего напряжения.....	40
3.3.1. Настройка ускоряющего напряжения и тока через нить накала.....	40
3.4. Настройка электронной оптики.....	42
3.4.1. Установка параметров, соответствующих работе электронной оптики.....	42
3.4.2. Подстройка положения по осям.....	46
3.5. Операции, соответствующие просмотру изображения.....	54
3.5.1. Выбор детектора.....	54
3.5.1.1. Детектор вторичных электронов (SE).....	56
3.5.1.2. Детектор обратно рассеянных электронов (BSE).....	56
3.5.2. Выбор степени увеличения.....	59
3.5.3. Информация о пользовании минимально возможной степенью увеличения и о просмотре проводящих ток образцов при малом увеличении.....	60
3.5.4. Выбор скорости сканирования.....	62
3.5.5. Подстройка яркости и контраста.....	64
3.5.6. Фокусирование и устранение астигматизма.....	66
3.5.7. Управление столиком.....	71
3.5.7.1. Указание координат.....	71
3.5.7.2. Диапазон перемещений и положение, при котором производится замена образца.....	72
3.5.7.3. Указание размера образца и указание используемого детектора.....	73
3.5.7.4. Управление движением по осям X, Y и Z.....	76
3.5.7.5. Управление перемещением по оси Z и изменением наклона.....	79
3.5.7.6. Управление с помощью мыши (после помещения указателя на изображение сканируемого образца).....	79
3.5.7.7. Функция «запись положения столика в память».....	84
3.5.7.8. Функция «хронологические сведения о перемещении столика».....	86
3.5.7.9. Просмотр накопленных изображений.....	87
3.5.7.10. Остановка столика и возврат его в предшествующее положение.....	96
3.5.7.11. Доступный диапазон перемещений и ограничения этого диапазона из-за наличия дополнительно устанавливаемых детекторов.....	96
3.6. Сохранение и регистрация изображений.....	100
3.6.1. Сохранение и регистрация изображений.....	100
3.6.2. Подготовка к регистрации изображений.....	101
3.6.3. Захват изображений.....	103
3.6.4. Сохранение отсканированного изображения.....	106
3.6.5. Сохранения захваченных изображений.....	110
3.7. Выключение.....	110
3.7.1. Снятие высокого напряжения.....	110
3.7.2. Установка столика в положение, соответствующее замене образца.....	111

3.7.3. Удаление образца	111
3.7.4. Прекращение пользования программной оболочкой Windows.....	112
3.7.5. То, что нужно сделать при выключении электронного микроскопа.....	114
3.8. Прочие функции	114
3.8.1. Функция Data Entry (ввод данных).....	114
3.8.2. Получение перспективного изображения.....	118
3.9. Пользование обслуживающей программой SEM Data Manager	119
3.9.1. Перечни функций и клавиши	119
Вопросы для самоконтроля	122
ГЛАВА 4. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЭМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧ	123
4.1. Оценка поверхности сварочной проволоки.....	123
4.2. Исследование причин порообразования сварных соединений алюминиевых сплавов	125
4.3. Исследование причин порообразования сварных соединений при использовании операции анодирования	126
4.4. Исследование причин порообразования сварных соединений при использовании операции опескоструивания.....	127
4.5. Исследование причин порообразования при автоматической сварке титановых элементов	133
4.6. Исследование изломов сварных соединений	136
4.7. Исследование кратера, полученного после спектрального анализа	140
4.8. Исследование эволюции структуры материала приконтактного объема неразъемного соединения, полученного в условиях холодной тугой посадки системы «втулка-вал» из сплава ОТ4-1	141
4.9. Общие выводы	142
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	143