



Channel Partner
GE Oil & Gas

Новейшие технологии контроля — 2016

Сборник тезисов докладов
4-й Международной конференции
по технологиям контроля

6–7 апреля 2016 года
Москва, Владимир

ISBN 978-5-9907248-1-5

УДК [669.017+665.6/.7+621.38](043.2)

ББК 34.2я43 + 65.305.143.2я43 + 32.85я43
Н72

4-я Международная конференция «Новейшие технологии контроля» — 2016.

6–7 апреля 2016 года. Москва, Владимир. Тезисы. — Москва: ВЕСТА-ПРИНТ, 2016. — 44 с.

СОДЕРЖАНИЕ

I. ПЛЕНАРНАЯ ЧАСТЬ	5
Современные методы контроля объемной структуры материалов <i>Е. С. Прусов</i>	5
Программное обеспечение для визуализации и анализа данных компьютерной томографии VGSTUDIO MAX 3.0 <i>В. Becker, S. Romyantsev</i>	7
Применение компьютерной рентген-томографии в расследовании причин авиакатастрофы <i>Э. Э. Ахмадеев, Р. Р. Сафин</i>	10
Развитие криминалистической томографии как метода исследования доказательств <i>А. А. Стрелков</i>	13
II. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И МЕТАЛЛООБРАБОТКА	16
Применение компьютерной томографии в рамках инженерного центра <i>Э. Э. Ахмадеев</i>	16
Применение компьютерной томографии при исследовании влияния затрудненной усадки на образование усадочной пористости <i>Н. С. Ларичев</i>	18
Рентгеновский контроль особенностей структуры эластомерных композитов <i>В. С. Пряхин, Х. Х. Валиев, Ю. Н. Карнет, Н. А. Федоров, О. Б. Юмашев</i>	20
III. НЕФТЬ И ГАЗ	23
Применение РКТ для исследования фильтрационных характеристик пористых сред <i>Е. О. Стаценко, Т. Р. Закиров, А. А. Галеев, А. А. Коновалов</i>	23
Применение компьютерной томографии в нефтегазовой сфере <i>Д. Р. Гилязетдинова, Д. В. Корост</i>	25
Рентгеновская микротомография в почвоведении. Опыт применения и перспективы <i>К. Н. Абросимов, Е. Б. Скворцова, Е. В. Шеин, К. М. Герке, К. А. Романенко, Д. В. Корост, А. В. Дембовецкий, В. А. Белохин, Н. А. Шнырев</i>	27

4 Содержание

Изучение распределения сульфидных фаз методами компьютерной томографии (на примере пород Йоко-Довыренского расслоенного массива) <i>А. Н. Хомяк, А. А. Арискин</i>	31
Применение рентгеновской томографии при исследованиях перфорированных образцов <i>В. И. Исаев, К. Ю. Шепель, А. А. Мухамадиев, Р. Р. Сафин</i>	34
IV. ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА	36
Использование метода микрофокусной рентгеновской томографии для неразрушающего контроля микроэлектронных устройств и датчиков давления <i>И. Д. Петров</i>	36
Применение рентгенографии при анализе отказов изделий электронной компонентной базы (ЭКБ) <i>И. П. Горбачёв</i>	38
Применение рентгенофлуоресцентного метода для анализа металлических покрытий <i>А. Н. Новикова</i>	41

I. ПЛЕНАРНАЯ ЧАСТЬ

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ОБЪЕМНОЙ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ

Е. С. Прусов

*Владимирский государственный университет
им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, г. Владимир
eprusov@mail.ru*

Одной из основных задач современного материаловедения является установление взаимосвязи между микроскопической структурой и макроскопическими свойствами функциональных и конструкционных материалов. Решение этой задачи требует получения изображений элементов структуры материалов на различных масштабных уровнях и их последующего анализа. Многообразие наблюдаемых элементов внутреннего строения материалов и изделий можно разделить на структурные составляющие и дефекты микро- и макроструктуры. К структурным составляющим в материалах следует отнести фазы разного состава, дендриты, кристаллиты, сферолиты, частицы, волокна, слои и др. К дефектам структуры относят вакансии, дислокации, инородные включения, оксидные пленки и другие нерастворимые примеси, ликвационные неоднородности, газовые и усадочные поры, раковины, рыхлоты, трещины, флокены, расслоения и прочие нарушения сплошности структуры.

Традиционные методы оптической и электронной микроскопии ограничены возможностью изучения только двумерных изображений, за исключением визуализации трехмерного рельефа поверхности образца или просвечивания тонких фольг. Целый ряд параметров, в том числе пространственная морфология, распределение, взаимосвязанность структурных составляющих и многие другие, не могут быть определены с помощью этих методов. В то же время достоверная оценка уровня применяемой технологии, прогнозирование механических и эксплуатационных свойств разрабатываемых материалов, математическое моделирование поведения материалов в различных условиях невозможны без качественных и количественных данных об объемной структуре материала. Приведенные ограничения способствовали появлению и развитию новых методов и инструментов, позволяющих получать трехмерные изображения внутренней структуры материалов и изделий.

Термин «томография» объединяет методы визуализации, основанные на реконструкции внутренней структуры объекта по массиву

его проекционных цифровых снимков. В зависимости от воздействия на объект и масштабных уровней исследования можно выделить следующие виды томографии, применяемые в материаловедении [1]:

- рентгеновская томография, используемая при изучении макро- и микрообъектов с пространственным разрешением, достигающим 1 мкм;
- нейтронная томография, применяемая при изучении материалов с низкой степенью поглощения рентгеновского излучения;
- электронная томография, позволяющая получать трехмерные изображения субмикроскопических и наноразмерных структур;
- атомно-зондовая томография, визуализирующая структуру материалов на атомном уровне.

Рентгеновская томография и микротомография в последние годы становятся широко применяемыми методами исследования структуры материалов, что подтверждается быстрым ростом числа опубликованных работ в ведущих мировых журналах, посвященных материаловедению (*Acta Materialia*, *Materials Science and Engineering A* и др.). Использование рентгеновской томографии позволяет оценивать такие параметры и характеристики элементов внутреннего строения, как пространственное распределение и ориентация, форма и размеры, объемная доля и количество, величина удельной поверхности и др.

Расширение использования томографических методов в материаловедении приводит к появлению новых направлений в этой области науки. Если квазистатические 3D структуры описываются пространственными координатами (x , y , z), то введение четвертого измерения (времени) в процесс томографического наблюдения позволяет получить представление о пространственно-временной эволюции структуры материала. В работах Нобелевского лауреата А. Зевейла такой подход к четырехмерной визуализации в координатах (x , y , z , t) использован при исследовании материалов методом сверхбыстрой электронной томографии с атомно-масштабным разрешением [2]. При трехмерном анализе развития различных процессов в материалах на микроуровне в режиме реального времени имеются примеры эффективного применения рентгеновской компьютерной томографии. В частности, значительные успехи в этом направлении достигнуты при изучении процессов плавления и кристаллизации, деформации и разрушения, различных структурных изменений в материалах под воздействием внешних факторов.

Библиографический список

1. Прусов Е. С. // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 5(2). С. 318.
2. *Zewail A. H. 4D Visualization of Matter: Recent Collected Works*. L., 2014.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ VGSTUDIO MAX 3.0

B. Becker, S. Rumyantsev

*Volume Graphics GmbH, Heidelberg, Germany
rumyantsev@volumegraphics.com*

Volume Graphics разрабатывает программные продукты для обработки воксельных данных (воксель — объемный трехмерный пиксель). VGStudio MAX — ПО для анализа и визуализации данных промышленной компьютерной томографии (КТ). Тысячи компаний по всему миру используют продукты Volume Graphics для анализа, инспекции и измерения объектов. Компания была основана в 1997 году. Сейчас в Volume Graphics работают более 80 сотрудников в Германии, США и Японии.

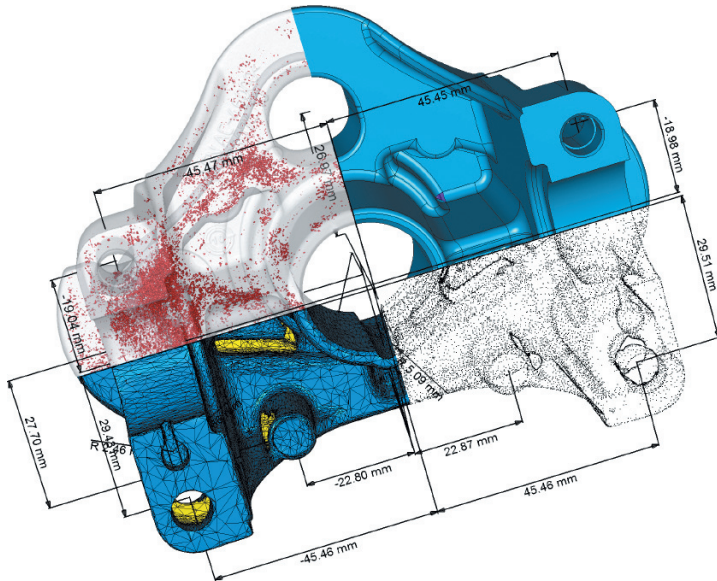
VGStudio MAX 3.0 — новейшая версия программного пакета компании Volume Graphics. Данное ПО позволяет решать сложные задачи по неразрушающему контролю в исследовательских лабораториях и на производстве. Среди нововведений — переработанный пользовательский интерфейс, улучшенное управление памятью для работы с большими объемами данных, поддержка облаков точек, более гибкие функции автоматизации, комбинирование результатов анализов и проведение симуляций на основе КТ данных.

VGStudio MAX 3.0 была основательно переработана для более полного использования ресурсов современного оборудования (в частности, быстрых SSD хранилищ и GPU).

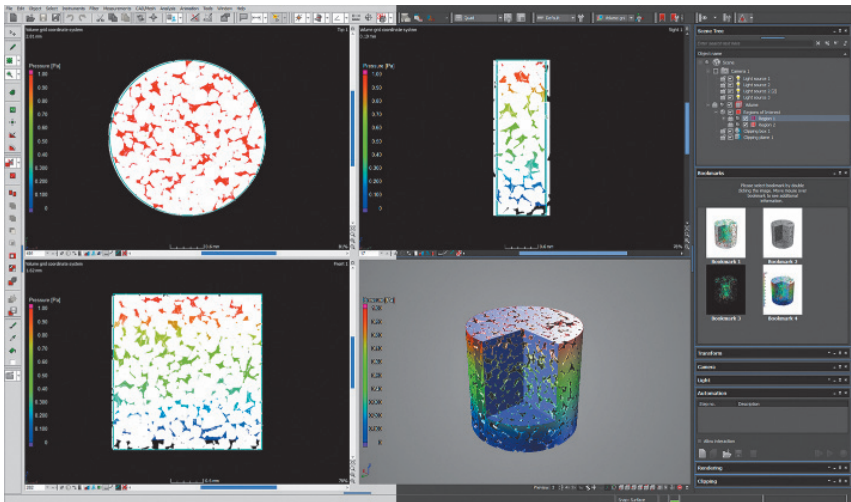
Новая функция загрузки/выгрузки информации об уровнях серого значительно снижает требования к объему ОЗУ. Это упрощает работу метрологов, которым для проведения измерения геометрических параметров объекта исследования не требуется информация о внутренней структуре материала, а также пользователей, которые работают с КТ данными высокого разрешения.

VGStudio MAX 3.0 теперь может работать с облаками точек в дополнение к воксельным данным, САПР данным и полигональным моделям. Более того, теперь возможно преобразование одного типа данных в другой (облака точек в полигональную модель, САПР данных в воксельные данные и т. д.).

Для более гибкого процесса автоматизации макросы теперь могут комбинироваться и менять свой порядок следования.



Анализ различных типов данных в VGStudio MAX 3.0



Пользовательский интерфейс VGStudio MAX 3.0
(слева — светлая тема, справа — новая темная тема)

Новые функции комбинирования результатов анализов позволяют, в частности, объединить результаты анализа толщины стенки и анализа пор/включений. После этого дефекты можно будет классифицировать также по отношению размера дефекта к локальной толщине стенки.

Модуль координатных измерений, позволяющий измерить даже труднодоступные скрытые размеры, теперь обладает новыми возможностями по базированию объектов, заданию допуска на базирования, а также измерению поверхностей и профилей «свободной» формы.

Модуль явлений переноса позволяет проводить виртуальные эксперименты на основе, например, КТ сканов образцов почвы или камня для определения свойств материала.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ РЕНТГЕН-ТОМОГРАФИИ В РАССЛЕДОВАНИИ ПРИЧИН АВИАКАТАСТРОФЫ

Э. Э. Ахмадеев, Р. Р. Сафин

АО «Центр Цифровых Технологий», г. Казань
akhmadistudio@gmail.com

26 ноября 2015 года в районе аэродрома Игарка Красноярского края произошла катастрофа с вертолетом Ми-8Т.

Анализ параметров полета, зарегистрированных бортовым самописцем, и внутрикабинных радиопереговоров экипажа показал, что после взлета возникло правое кренение вертолета с практически постоянной угловой скоростью $1.6^\circ/\text{с}$, которое было идентифицировано экипажем как отказ автопилота по крену. Для выяснения причин возможной ненормальной работы систем вертолета Межгосударственный авиационный комитет (МАК) запросил АО «ЦЦТ» изыскать возможность проведения компьютерной рентген-томографии рулевого агрегата для определения положения и состояния золотников, плунжеров, внутренних деталей, а также наличия посторонних предметов (или следов их предварительного присутствия).

АО «Центр Цифровых Технологий» (АО «ЦЦТ») — современный инжиниринговый центр, оснащенный новейшим высокотехнологичным оборудованием для решения таких задач, как литейное производство, 3D печать (изготовление литейных форм, оснастки, макетов), производственный контроль (3D сканирование, 3D томография, лабораторные исследования), компьютерный анализ (гидрогазодинамические, прочностные расчеты, расчеты тепломассопереноса), конструирование, реверсивный инжиниринг.

Для решения задач используется следующее оборудование: компьютерный томограф GE $\nu\text{tome|x}$ s450, лазерный 3D сканер ATOS III Triple Scan XL, 3D принтер ExOne S-Max, суперкомпьютер производительностью 4 Tflops с жидкостным охлаждением.

Двумя годами ранее, 17 ноября 2013 года, на территории Казанского международного аэродрома произошла авиакатастрофа с участием самолета Boeing 737-500. В рамках расследования на базе фирмы Varian (г. Чикаго, США) было проведено сканирование каждого рулевого привода для оценки внутреннего состояния (рис. 1). Подобное исследование потребовалось и для расследования происшествия с вертолетом Ми-8Т и было проведено на базе АО «ЦЦТ».

Сканирование проводилось линейным детектором. Проблема, с которой мы столкнулись, — время сканирования. Рекомендуемые настройки параметров (fine focus, шаг 0,4 мм, чувствительность 2, выдержка 150 мс, average 2, skip 1, 2400 фреймов) показали, что время сканирования будет составлять 16 суток (высота изделия около 600 мм). Заказчик не мог оставить агрегат более чем на 10 суток и в то же время не мог пожертвовать ни детализацией, ни каким-либо участком изделия.

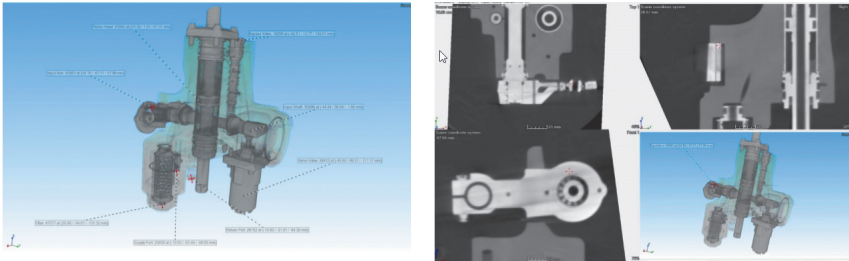


Рис. 1. Томограмма рулевого привода Boeing 737-500

В итоге были выбраны следующие настройки: fine focus, шаг 0,5 мм, чувствительность 2, выдержка 150 мс, average 2, skip 1, 2000 фреймов. Немного увеличив шаг сканирования и уменьшив число фреймов, удалось сократить расчетное время сканирования до 10 суток 5 часов.

В ходе исследования удалось получить хороший результат с приемлемым уровнем шумов, достаточной резкостью и детализацией. От алюминиевого корпуса были отделены более плотные элементы, стальной корпус стакана цилиндра был выделен в отдельный объем для придания ему прозрачности, каналы, по которым циркулирует рабочая жидкость, были также выделены в отдельный объем и окрашены. Некоторые шумы были удалены вручную для улучшения картинки (рис. 2).

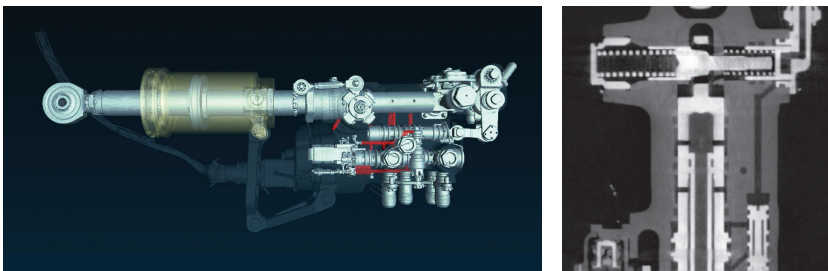


Рис. 2. Томограмма агрегата управления Ми-8Т

Из внутренних дефектов была обнаружена трещина в одном из штуцеров, по которому подается рабочая жидкость под высоким давлением. Возможно, этот дефект повлиял на работу агрегата управления.

Библиографический список

1. Межгосударственный Авиационный Комитет // Окончательный отчет Boeing 737-500 (53A) VQ-BBN, 2013. С. 110.

РАЗВИТИЕ КРИМИНАЛИСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ КАК МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ДОКАЗАТЕЛЬСТВ

А. А. Стрелков

*Академия Следственного комитета России, г. Москва
65strelkov@mail.ru*

Предварительные криминалистические исследования и криминалистическая экспертиза, как неотъемлемые части криминалистической техники, представляют собой совокупность технических приемов и средств, разрабатываемых на основе творческого использования данных естественных и технических наук и применяемых в соответствии с процессуальным законом для обнаружения, собирания, фиксации и исследования доказательств, а также для целей предупреждения преступлений. Главным принципом криминалистических исследований и экспертиз является принцип сохранения исследуемого объекта. Участники уголовного процесса могут использовать при обнаружении, фиксации, изъятии и исследовании доказательств лишь те средства и методы, которые не влекут изменения внешнего вида, конструкции или уничтожения исследуемого объекта.

Практическая направленность криминалистической науки и основные перспективные направления ее современного развития на стыке с естественными и техническими науками определяются потребностями в использовании последних научно-технических достижений и современных информационных технологий в раскрытии и расследовании преступлений. В настоящее время одним из актуальных направлений этого развития являются криминалистические возможности исследования доказательств (предметов металлообработки, электротехники, электроники, а также трупа) методом рентгеновской компьютерной томографии (КТ) и 3D визуализация.

Криминалистическое применение КТ-исследований доказательств в следственной практике позволит:

- при проведении следственных действий обнаруживать и фиксировать следы, объекты и их детали, связанные с расследуемым событием;
- при проведении криминалистических исследований запечатлевать как внешний, так и внутренний общий вид поступивших на исследование объектов, не изменяя их физического состояния; получать изображения исследуемых объектов для их сравнения и иллюстрации выводов;

- при проведении судебных экспертиз выявлять невидимые и слабо видимые признаки поступивших на исследование объектов, проводить идентификацию исследуемых объектов и иллюстрацию выводов.

В данных условиях рентгеновский компьютерный томограф следует рассматривать в качестве технико-криминалистического средства (ТКС), заимствованного из других областей науки и техники, а проведение КТ-исследования, применение средств, методик и приемов, используемых в промышленной и медицинской визуализационной диагностике, приобретают криминалистический характер, так как используются для борьбы с преступностью, в целях раскрытия, расследования и предупреждения преступлений. Применение КТ-исследования не противоречит нормам уголовно-процессуального законодательства, определяющим общие основания использования ТКС, и ставит его в один ряд с поисковой и исследовательской техникой, такой как, например, фотоаппараты, видео- и звукозаписывающая аппаратура общего назначения, металлоискатели, спектрометры, хроматографы и др.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о больших возможностях использования рентгеновской компьютерной томографии при производстве следственных действий, таких как осмотр трупа (ст. 178 УПК РФ), освидетельствование (ст. 179 УПК РФ), а также при производстве судебной экспертизы (гл. 27 УПК РФ). Применение рентгеновского компьютерного томографа в криминалистической деятельности не противоречит как общим принципам права, так и принципам, относящимся к применению технико-криминалистических средств в уголовном судопроизводстве: правомерности использования ТКС; научной обоснованности применения; безопасности использования; эффективности; сохранения исследуемого объекта.

Историческое развитие криминалистической экспертизы убедительно показывает, что одно лишь обладание естественными и техническими знаниями не всегда позволяет успешно решить вопросы, возникающие перед органами следствия и суда. Для решения их многое необходимо творчески переработать, а самое главное, требуется глубокое изучение и использование опыта следственной и судебной практики. В этой связи развитие научных криминалистических исследований по теме «Криминалистическая томография», совершенствование новых видов криминалистических исследований и экспертиз методом рентгеновской компьютерной томографии в соответствии с современными достижениями естественных наук и информационных технологий позволит максимально эффективно использовать научно-технические достижения в процессе раскрытия и расследования преступлений.

Библиографический список

1. *Дадабаев В. К., Колкутин В. В., Стрелков А. А.* «Виртуальная аутопсия»: перспективы ее развития в Российской Федерации // *Медицинская экспертиза и право.* 2015. № 2. С. 12–16.
2. *Стрелков А. А.* Применение рентгенографии и рентгеновской компьютерной томографии в криминалистике и судебной экспертизе // *Расследование преступлений: проблемы и пути их решения: сборник научно-практических трудов. ФГКОУ ВО Академия Следственного комитета России.* 2015. № 3. С. 128–133.
3. *Стрелков А. А., Скрынников А. И.* Межведомственная научно-практическая интеграция как путь развития инновационных криминалистических методик «виртуальной» аутопсии // *Вестник Академии Следственного комитета.* 2015. № 1. С. 262–266.

II. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И МЕТАЛЛООБРАБОТКА

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ В РАМКАХ ИНЖЕНЕРНОГО ЦЕНТРА

Э.Э. Ахмадеев

*АО «Центр Цифровых Технологий», г. Казань
akhmadistudio@gmail.com*

АО «Центр Цифровых Технологий» — современный инженерный центр, оснащенный новейшим высокотехнологичным оборудованием, позволяющим решать широкий спектр инженерных и производственных задач.

ЦЦТ был создан в 2014 году в рамках программы поддержки субъектов малого и среднего предпринимательства Министерства экономического развития РФ. Одна из целей образования Центра — создание фундамента для развития регионального малого и среднего бизнеса инженерно-производственного характера за счет предоставления доступа к современному промышленному оборудованию и программному обеспечению.

Решаемые задачи:

- литейное производство (литье в песчано-глинистые формы, литье в ХТС);
- 3D печать (литейно-стержневые формы, оснастка, макеты);
- производственный контроль (3D сканирование, компьютерная томография, металлографические исследования);
- компьютерный анализ (гидрогазодинамика, тепломассоперенос, прочность);
- конструирование (3D моделирование, разработка КД);
- реверсивный инжиниринг.

В перспективе:

- литье под низким давлением;
- литье по выжигаемым моделям.

Для решения задач используется самое современное и высокотехнологичное оборудование:

- рентгеновский компьютерный томограф GE v|tome|x c450 (различимость деталей — 0,1 мм, максимальная просвечиваемая толщина стали — 60 мм);
- лазерный 3D сканер ATOS III Triple Scan XL (максимальная точность измерения — 0,002 мм);

- 3D принтер ExOne S-Max (максимальные габариты печати — 1800×1000×700 мм);
- вычислительный кластер производительностью 4 Tflops.

Основная продукция ЦЦТ — алюминиевые отливки и литейно-стержневые формы для литья любых металлов. Являясь официальным поставщиком ОАК, ЦЦТ осуществляет 100 %-й контроль литейной продукции. Контроль производится на КТ системе GE v|tome|x c450 плоскопанельным детектором. Отливки проверяются на наличие внутренних дефектов (раковины, пористости, трещины, включения), на отклонение от мат. модели, проводится анализ толщины стенок.

Помимо сканирования литья, КТ находит применение и в реверсивном инжиниринге. 3D сканер, являясь основным инструментом для этой задачи благодаря высокой точности измерения, беспомощен в случае, если деталь имеет внутренние полости, узкие карманы или глубокие отверстия. В таких случаях сканирование производится на томографе. Еще одна проблема для 3D сканера — бликующие детали, прозрачные детали и детали черного цвета. Для томографа оптические свойства поверхности не являются препятствием. В результате сканирования получается 3D модель формата STL, по которой отрисовывается твердотельная модель для последующей обработки (чертеж, обработка на станке с ЧПУ, конечно-элементарный анализ).

Для оцифровки особо ответственных деталей, имеющих внутренние полости, используются данные с 3D сканера и томографа. Наружную геометрию с высокой точностью получают сканированием, а недостающие внутренние полости — томографией. В результате для разработки твердотельной модели используются два STL-файла — один с 3D сканера, второй с томографа.

Третье применение КТ в инженерном центре — анализ сложных сборочных единиц. Центром Цифровых Технологий был успешно проведен анализ внутреннего состояния агрегата управления с вертолета, потерпевшего крушение. Сканирование производилось специальным линейным детектором, без которого томография изделий, состоящих из большого количества деталей из разных материалов (алюминий, сталь, медь, пластик и т. д.), фактически невозможна. Из внутренних дефектов была обнаружена трещина в одном из штуцеров, по которому подается рабочая жидкость под высоким давлением.

Благодаря широкому спектру решаемых задач компьютерная томография в рамках инженерного центра находит всестороннее применение. На данный момент в ЦЦТ выделились три основных вышеописанных направления использования томографа, но задач, решаемых с помощью современной промышленной компьютерной томографии, гораздо больше.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВЛИЯНИЯ ЗАТРУДНЕННОЙ УСАДКИ НА ОБРАЗОВАНИЕ УСАДОЧНОЙ ПОРИСТОСТИ

Н. С. Ларичев

*МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва
larnikser@mail.ru*

Согласно классической технологии литья напряженно-деформированное состояние не влияет на пористость. Однако на кафедре «Литейные технологии» разработана теория, согласно которой доля пористости должна увеличиваться с увеличением усадочных напряжений. Одной из причин образования пористости в отливке является остановка фильтрационного течения металла в двухфазной зоне при достижении критического падения давления. Усадочные деформации вносят свой вклад в падение давления, что приводит к более раннему прекращению поступления жидкого металла к основаниям дендритов.

Наиболее ярко этот эффект проявляется в тепловых узлах, в которых локализуются усадочные деформации.

На кафедре «Литейные технологии» предложен поправочный коэффициент к критерию пористости, который учитывает влияние деформаций и показывает, во сколько раз изменится пористость относительно бездеформационного затвердевания.

Для проведения экспериментального исследования были изготовлены отливки из алюминиевого сплава, в которых реализованы условия свободного затвердевания, одноосного и двуосного растяжения двухфазной зоны. Проведенное исследование образцов на компьютерном томографе позволило оценить количество и форму внутренних усадочных дефектов.

На рис. 1 представлены теоретическая и экспериментальная зависимости увеличения пористости относительно свободного затвердевания при разных коэффициентах локализации деформации. Результаты экспериментального исследования показали хорошее совпадение с теоретической зависимостью.

При решении обратной задачи (исследование элементов, обеспечивающих питание) было установлено: с увеличением деформаций питающие элементы раньше перестают питать тепловой узел, что приводит к тому, что раковина в питающем элементе уменьшается (рис. 2).

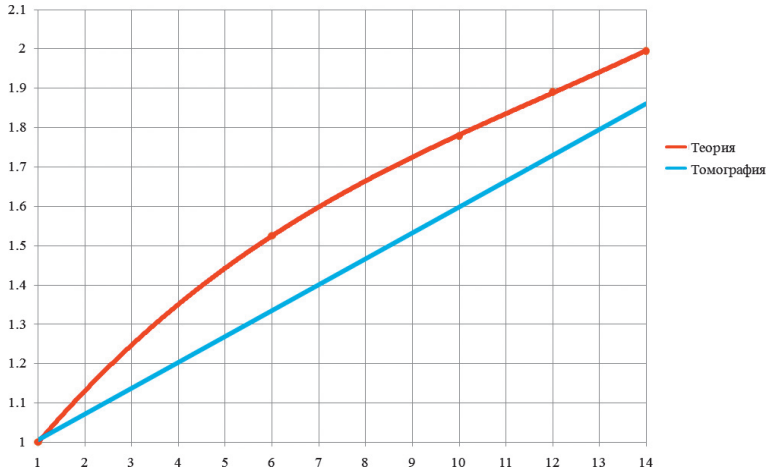


Рис. 1. Увеличение пористости в зависимости от степени локализации деформации

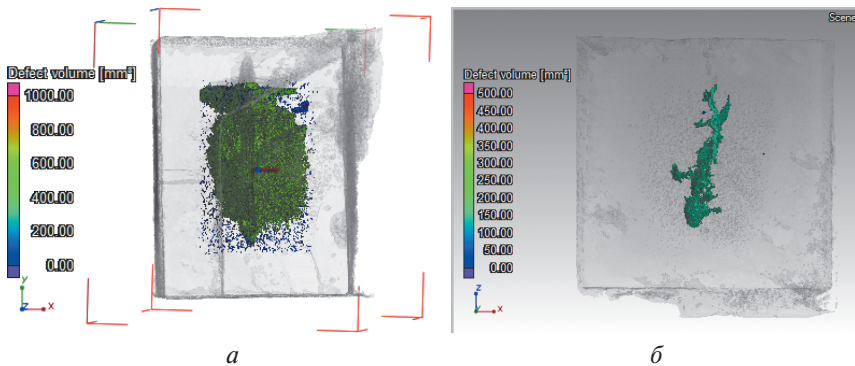


Рис. 2. Результаты исследования стальных образцов: *a* — бездеформационное затвердевание; *б* — затвердевание в условиях торможения линейной усадки

Библиографический список

1. Ларичев Н. С. // Литейщик России. 2015. № 10. С. 39.

РЕНТГЕНОВСКИЙ КОНТРОЛЬ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРЫ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

**В. С. Пряхин¹, Х. Х. Валиев², Ю. Н. Карнет²,
Н. А. Федоров¹, О. Б. Юмашев²**

¹ООО «Остек-СМТ», г. Москва

²ФБГУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва
hhvly@mail.ru

Растущий интерес к применению методов рентгеновского контроля качества в материаловедении связан с созданием целых классов новых функциональных и конструкционных материалов, большинство из которых являются структурно неоднородными. Гетерогенная структура синтезируемых композитов обуславливает возможность появления специфических видов дефектов, многие из которых являются скрытыми. Получаемая при этом информация может быть использована для совершенствования технологии производства материалов и изделий из них [1]. Помимо этого, данный метод является наиболее наглядным, так как с помощью него можно легко визуализировать различные компоненты исследуемого объекта на разных масштабах.

Для демонстрации возможностей рентгеноскопии в данной работе приведены результаты исследования композиционного эластомерного образца, наполненного микро- и наноразмерным шунгитом (Карелия, Россия) с соотношением матрица : наполнитель 60 : 40 массовых частей; состав шунгита: около 70% SiO₂ и около 30% аморфного углерода. Визуализация распределения наполнителя в стирол-бутадиеновом каучуке СКС-30 АРК проводилась на рентгеновской установке GE Phoenix microtec/x DXR (США). Были выбраны оптимальные параметры съемок. Напряжение на рентгеновской трубке 45 кВ, ток пучка 150 мкА. Примеры полученных изображений приведены на рис. 1–3.

На рис. 1 (скан 2000 мкм) непосредственно визуализируется наличие большого количества микроскопических включений (темный цвет) в образце. Анализ показывает: из-за того, что темный цвет указывает на сильное поглощение объектом рентгеновского излучения, эти включения являются не порами, а микроскопическими агломератами шунгитового наполнителя в каучуковой матрице; сама эластомерная матрица при этом представляется белым цветом, так как мало поглощает излучение по сравнению с наполнителем. При больших увеличениях

на рис. 2, 3 (сканы 200 и 50 мкм) уже просматриваются контуры структуры шунгитовых субмикроскопических наполнителей (темные объекты) данного композита.

Полученные данные демонстрируют замечательные возможности этих рентгеновских систем для получения информации о внутренней структуре сложных композитов. Эти результаты чрезвычайно важны для дальнейшего развития наших представлений об особенностях структуры этих материалов на макро- и микроуровнях.

Использование рентгеновских систем, позволяющих получать разрешение вплоть до 200 нм, позволило бы еще более детально рассмотреть трехмерную структуру агрегатов наполнителей таких композитов, контуры которых визуализируются на полученных снимках.

Компьютерная томография существенно расширяет возможности рентгеновского контроля, и в настоящий момент планируется детальное исследование данных образцов композитов на рентгеновских томографах компаний GE Sensing & Inspection Technologies GmbH (Германия) и ООО «Остек-СМТ» (Россия).

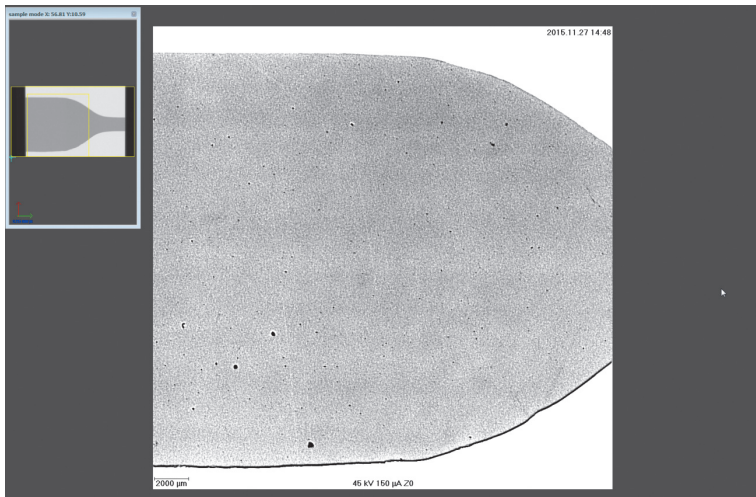


Рис. 1. Результаты рентгеноскопического анализа. Скан 2000 мкм

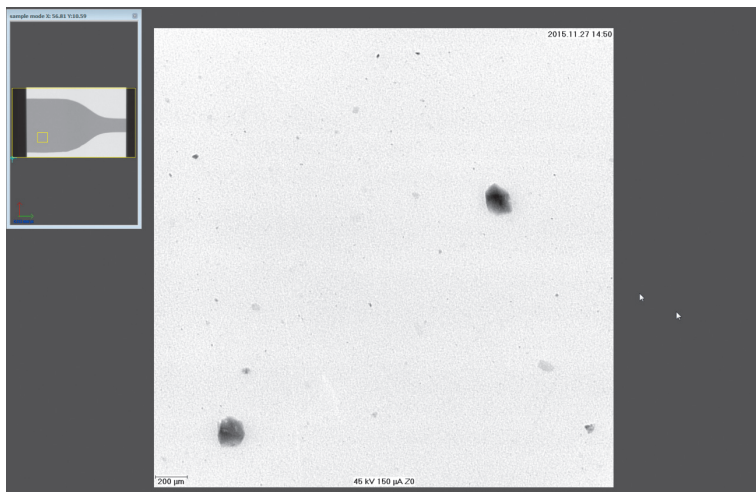


Рис. 2. Результаты рентгеноскопического анализа. Скан 200 мкм

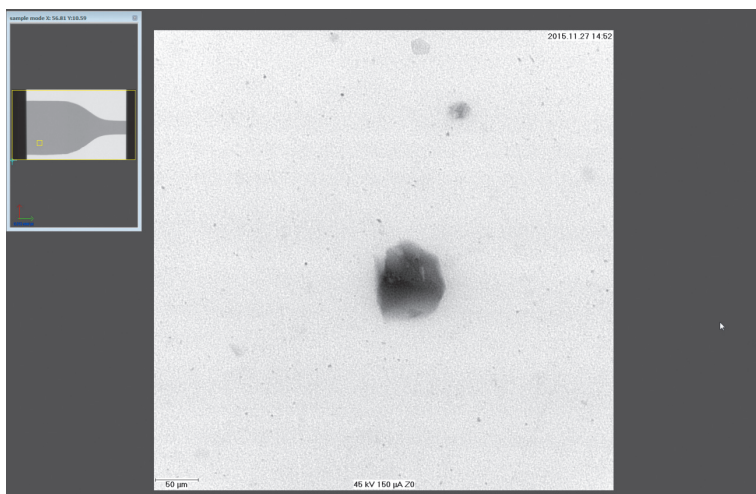


Рис. 3. Результаты рентгеноскопического анализа. Скан 50 мкм

Библиографический список

1. *Прусов Е. С.* Сборник тезисов докладов 3 Международной конференции «Новейшие технологии контроля». НТК, 2015.

III. НЕФТЬ И ГАЗ

ПРИМЕНЕНИЕ РКТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТЫХ СРЕД

Е. О. Стаценко, Т. Р. Закиров, А. А. Галеев, А. А. Коновалов

Казанский федеральный университет, г. Казань

e.statsenko@yahoo.com, timurz0@mail.ru

В работе рассматривается применение метода рентгеновской микрофотографии для расчета коэффициентов пористости и абсолютной проницаемости кернов нефтяных коллекторов Ашальчинского месторождения.

Для моделирования течения жидкости на основе цифровых томографических изображений поровых каналов использовано уравнение неразрывности [1] и стационарные уравнения Навье — Стокса [2]:

$$\operatorname{div} \vec{U} = 0, \quad [1]$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad}(P) + \mu \Delta \vec{U}. \quad [2]$$

Для визуализации процессов, происходящих в керне при течении флюида, проведены вычислительные эксперименты по фильтрации вязкой жидкости через исследуемый элемент пористой среды. Показано, что в рассмотренном для примера образце песчаника (рис. 1) фильтрация флюида равномерно распределена по объему керна и происходит преимущественно в порах диаметром 30–80 мкм.

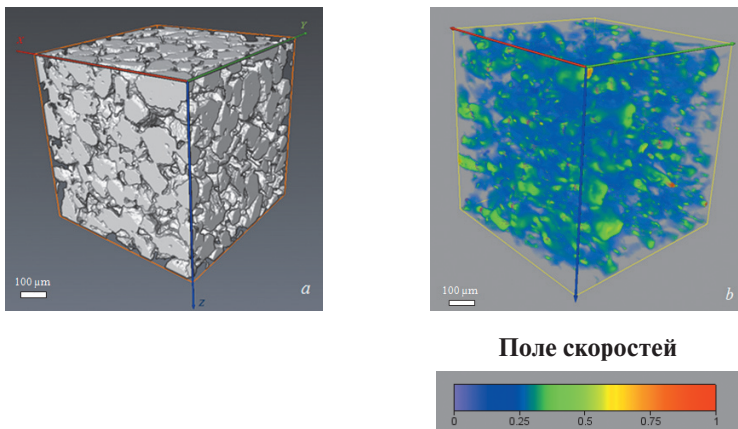


Рис. 1. Течение флюида в песчанике (фрагмент 200×200×200)

Коэффициенты проницаемости, полученные на основе построенной модели, сравнивались с фильтрационными характеристиками, рассчитанными с помощью формулы Козени — Кармана [3]:

$$k_{\text{Карман}} = \frac{m^3}{cS_V^2}. \quad [3]$$

Показано, что коэффициенты проницаемости, рассчитанные с помощью формулы Козени — Кармана, дают завышенные значения по сравнению с фильтрационными характеристиками, рассчитанными на основе уравнений Навье — Стокса и уравнения неразрывности (рис. 2).

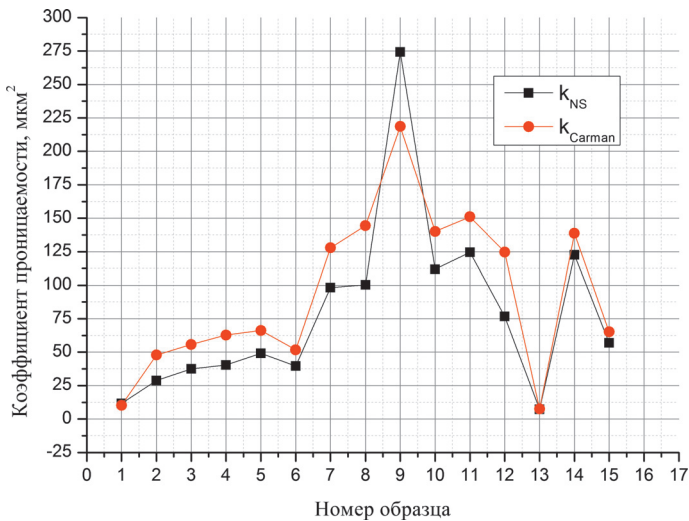


Рис. 2 Коэффициенты проницаемости

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 16-35-00155 мол_а).

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ В НЕФТЕГАЗОВОЙ СФЕРЕ

Д. Р. Гилязетдинова, Д. В. Корост

*Геологический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, кафедра геологии
и геохимии горючих ископаемых, г. Москва
gilyazetdinova_91@mail.ru*

Уникальным методом, применяемым для исследований изменений, происходящих в строении горных пород, является рентгеновская компьютерная томография. Наряду со стандартными лабораторными методами изучения пород, такими как определение фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС), минерального состава и структуры порового пространства и др., рентгеновская томография позволяет неинвазивно и детально изучить внутреннее строение рассматриваемого объекта. Научным коллективом лаборатории природных резервуаров кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых было проведено немало работ, посвященных экспериментальным и обзорным исследованиям горных пород. Основные и наиболее интересные примеры будут освещены ниже.

На сегодняшний день одной из самых популярных тем исследований в нефтяной геологии является исследование нефтяных сланцев. Для понимания механизмов первичной миграции нефти и газа в нефтематеринских породах, а также для исследования признаков, способных повлиять на изменение порового пространства пород в ходе миграции, был проведен эксперимент. Эксперимент заключался в одноэтапном прогреве горных пород до 500 °С. До и после прогрева образцы пород сканировались на компьютерном микротомографе Skyscan 1172, разрешение съемки составило порядка 3 мкм. Анализ полученных данных показал следующие результаты.

1. Объем органического вещества, заключенного в породе, может влиять на внутреннее строение образца в ходе его прогрева.
2. Текстурные признаки пород также являются контролирующим фактором, способным повлиять на морфологию горной породы в ходе первичной миграции углеводородов.

На рис. 1 приведены бинарные изображения пустотного пространства образца до и после прогрева. Образец характеризовался слоистой текстурой. В ходе прогрева пустотное пространство значительно изменилось — образовались новые трещины.

Еще один не менее интересный пример применения компьютерной томографии — исследование пиритизированных раковин радиоларий, сохранившихся в горных породах. За счет пиритизации их выделение

на рентгеновских плотностных срезах было облегчено. Анализ разных типов биогенных форм позволил определить виды радиолярий, проживавших во время захоронения изучаемой горной породы (рис. 2).

Работа частично выполнена при финансовой поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований № 16-35-00576 и Российского научного фонда № 14-17-00658.

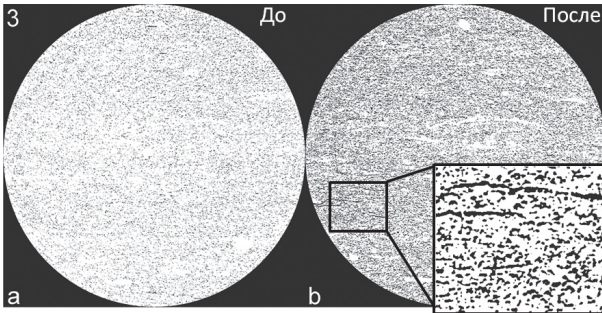


Рис. 1. Бинарные изображения рентгено-плотностных срезов образца до и после прогрева

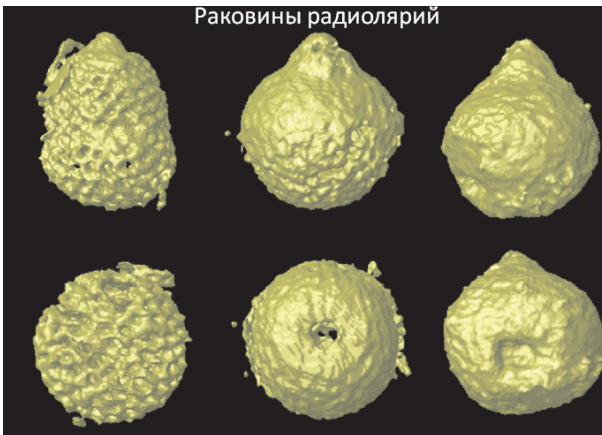


Рис. 2. Объемные модели захоронившихся раковин радиолярий

РЕНТГЕНОВСКАЯ МИКРОТОМОГРАФИЯ В ПОЧВЕВЕДЕНИИ. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

К. Н. Абросимов¹, Е. Б. Скворцова¹, Е. В. Шеин^{1,2}, К. М. Герке^{1,3},
К. А. Романенко¹, Д. В. Корост^{1,2}, А. В. Дембовецкий², В. А. Белохин²,
Н. А. Шнырев²

¹Почвенный институт имени В. В. Докучаева, г. Москва

²МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва

³Институт динамики геосфер Российской академии наук, г. Москва,
cheshik@yahoo.com, kv2@bk.ru, evgeny.shein@gmail.com

В ноябре 2012 года в Почвенном институте имени В. В. Докучаева был установлен микротомограф SkyScan 1172 (Бельгия). Большинство микротомографических исследований почв в нашей стране проводится на этом приборе. В данном сообщении рассмотрены некоторые результаты, полученные нами за последние годы, и сформулированы основные направления дальнейших работ в области почвенной томографии.

Основными объектами томографических исследований до настоящего времени являлись почвы лесной, лесостепной и степной биоклиматических зон европейской территории России. Помимо этого, исследовали отдельные горизонты почв пустынной и полупустынной зоны, эндолитные педогенные образования Антарктиды, различные насыпные модели почв и грунтов, другие минеральные и органические объекты.

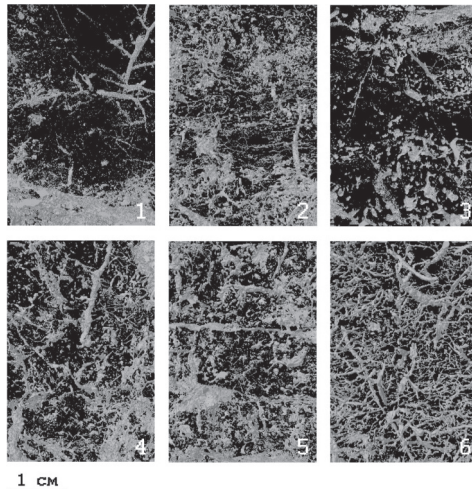


Рис. 1. Объемные модели порового пространства почвенных горизонтов:
1 — AY; 2 — AEL; 3 — EL; 4 — BEL; 5 — BT1; 6 — BT2. SkyScan 1172

Наиболее доступным почвенным объектом томографического анализа является поровое пространство. Нами получена серия двумерных изображений и трехмерных моделей порового пространства различных генетических горизонтов целинных и пахотных почв в основных биоклиматических зонах европейской территории России. Показано, что 3D модели порового пространства хорошо иллюстрируют структурные различия почвы (рис. 1). Эти и другие материалы можно расценивать как начальный этап создания базы изображений (образов) структуры и порового пространства различных почв.

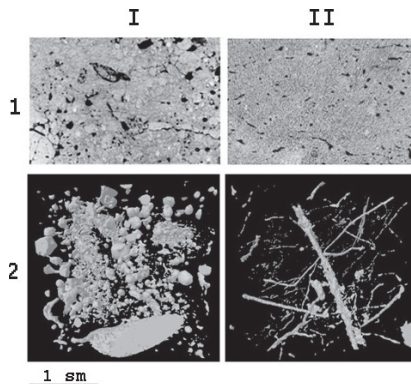


Рис. 2. Поровое пространство EL (I) и BC (II) дерново-подзолистой почвы: 1 — фрагмент томографического среза; 2 — модель порового пространства. SkyScan 1172

Исследования порового пространства почвы показали большое почвенно-генетическое значение 3D томографических моделей. Так, в двумерных срезах форма пор в горизонте EL и горизонте BC дерново-подзолистой почвы имеет одностипный характер (рис. 2, 1). Однако объемные изображения (рис. 2, 2) показывают, что в горизонте EL большинство пор с округлыми срезами представляют собой изолированные или связанные тонкими каналами пузырьки. Напротив, в горизонте BC пузырьковые поры присутствуют единично, практически все поры с округлыми срезами являются современными или реликтовыми ходами корней [1].

Исследование ортштейнов в дерново-сильноподзолистой суглинистой глубокооглеенной почве показало трансформацию их внутреннего строения по мере роста ортштейнов в условиях гидроморфизма (рис. 3) [2].

Анализ солевых новообразований позволил уточнить размер кристаллов новообразований и их приуроченность к элементам микростроения. В формате 3D были зафиксированы этапы постепенного

растворения кристаллов гипса с образованием пор — отрицательных кристаллов [3].

Возможность томографического сканирования образцов при различной влажности позволила исследовать новые аспекты набухания и усадки почвенной массы. Микромоноплиты почвы сканировали сначала при полевой влажности, затем при капиллярном насыщении и, наконец, после высушивания до воздушно-сухого состояния. Сравнение показало, что во всех генетических горизонтах в процессе набухания и усадки происходит уменьшение содержания тонких биогенных каналов. Исключение составляет горизонт BEL, где широко представлены крупные пузырьковые поры, устойчивые к набуханию и сжатию [4].

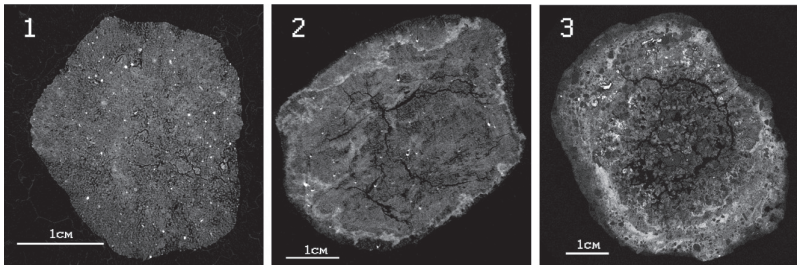


Рис. 3. Орштейны в дерново-подзолистой почве: 1 — маленькие; 2 — средние; 3 — крупные. SkyScan 1172

Лабораторный опыт по многократному замораживанию и оттаиванию растертого до 1 мм и капиллярно увлажненного материала различных почв показал, что при фронтальном промораживании образцов сверху вниз основная часть ледяных трещин формируется в верхней части образца. В цилиндрических образцах $d = 8$ мм и $h = 10$ мм зона активного трещинообразования имеет толщину от 1000 до 2000 мкм. Многократное промораживание способствует разрушению почвенных микроагрегатов, причем в гумусовом горизонте дерново-подзолистой почвы разрушение выражено сильнее, чем в черноземе и горизонте Vca целинного солонца [5].

Микротомографический анализ, будучи изначально компьютерным численным методом, является основой для проведения компьютерного моделирования физического строения и свойств почвы. При таком моделировании в качестве входных данных используется бинаризованное изображение порового пространства, на котором напрямую или же с помощью различных упрощений рассчитывается течение одного или более флюидов, электрические и прочностные характеристики, многие другие свойства.

На сегодняшний день можно перечислить следующие предпочтительные направления томографических исследований в почвоведении: формирование базы данных о 3D строении почв России; математическое описание и моделирование почвенной структуры; анализ и моделирование физических и биогенных процессов в почвах; экспресс-диагностика и мониторинг структурного состояния почвы для целей землепользования.

Библиографический список

1. *Скворцова Е. Б., Герке К. М., Корост Д. В., Абросимов К. Н.* Строение порового пространства в подзолистых горизонтах суглинистых почв (Анализ 2D и 3D изображений) // Бюллетень почвенного института им. В. В. Докучаева. 2013. Вып. 71. С. 65–79.
2. *Зайдельман Ф. Р., Абросимов К. Н.* Микротомографические исследования почвенных ортштейнов // Материалы Всероссийской конференции «Практическая микротомография», 2013. С. 79–85.
3. *Ямнова И. А., Абросимов К. Н.* Опыт применения рентгеновского томографа для морфоминералогического анализа гипсовых и карбонатных горизонтов гипсоносных почв // Материалы Всероссийской конференции «Практическая микротомография», 2013. С. 179–187.
4. *Skvortsova E. B., Shein E. V., Dembovetsky A. V., Abrosimov K. N., Shnyrev N. A., Gerke K. M., Romanenko K. A., Skvortsov A. B.* A study of loamy soil's microstructural changes during swelling and shrinkage using x-ray microtomography // Proceedings International Conference «Applied Ecology: Problems, Innovations» ICAE-2015 7-10 May, 2015, Tbilisi — Batumi. Tbilisi, 2015. P. 105–109.
5. *Romanenko K., Abrosimov K.* Soil pore space dynamics research in freezing/melting conditions // Micro-CT User Meeteng. Abstract book. Bruges, Belgium, 2015. P. 218.

Исследования проведены при поддержке РФФ, проект № 14-16-00065 и РФФИ, проект № 13-04-00409а.

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СУЛЬФИДНЫХ ФАЗ МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ (НА ПРИМЕРЕ ПОРОД ЙОКО-ДОВЫРЕНСКОГО РАССЛОЕННОГО МАССИВА)

А. Н. Хомяк¹, А. А. Арискин²

¹Геологический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва

²Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, г. Москва
khomyak.an@yandex.ru

Эффективность массопереноса и накопления сульфидов при затвердевании мафит-ультрамафитовых интрузивов в значительной мере зависит от возможности смачивания сульфидной жидкостью зерен породобразующих силикатов и пористости вмещающей среды (проницаемости кумулуса). Эти соотношения «записаны» в морфологии сульфидных фаз и их распределении по объему пород. Получить эту информацию позволяют современные методы компьютерной рентгеновской томографии. Они используют эффект ослабления рентгеновского поглощения при прохождении через образец, причем для разных минеральных фаз степень поглощения зависит от их плотности и эффективного атомного номера ($Z_{\text{эф}}$) минералообразующих элементов. Таким образом, для высокоплотной сульфидной фазы появляется возможность определения формы, размера и степени связанности магматических сульфидов (Barnes et al. 2008). В работе представлены предварительные результаты макро- и микротомографических исследований для серии минерализованных габброритов и ультрамафитов из Йоко-Довыренского массива в Северном Прибайкалье. Всего изучено 19 образцов размером от $\sim 2 \times 2 \times 2$ до $7 \times 7 \times 35$ см; разрешение при проведении измерений варьировалось от 14 до 150 мкм. Анализ 3D-изображений позволил разделить сульфидные включения на три главных типа: 1) изолированные стяжения, 2) локально-связанные включения и 3) полностью связанные по всему объему.

Для изучения были выбраны породы с различной степенью минерализации; всего исследовалось пять типов.

1) Хромитсодержащий дунит с убогой сульфидной минерализацией.

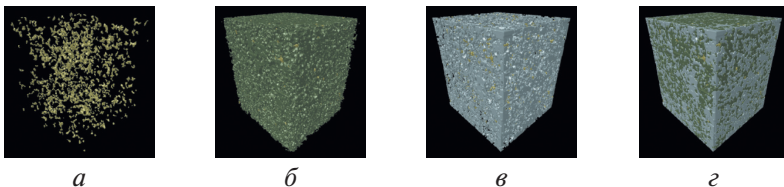


Рис. 1. Стереологические модели выделенных рентгеноконтрастных фаз: *а* — сульфиды и хромит; *б* — оливин; *в* — плагиоклаз; *г* — все фазы вместе. Основная масса представлена оливином, сульфидная фаза — в основном пентландитом

Следует отметить, что в одной рентгеноконтрастной фазе с сульфидами выделяются и хромиты, которые концентрируются в интерстициях, выполненных плагиоклазом. В настоящее время проводится поиск оптимальных режимов сканирования, которые позволят отделить хромит от сульфида. Данный тип пород характеризуется наличием изолированных и локально связанных включений.

2) Минерализованные габбро-нориты верхней приконтактной зоны.

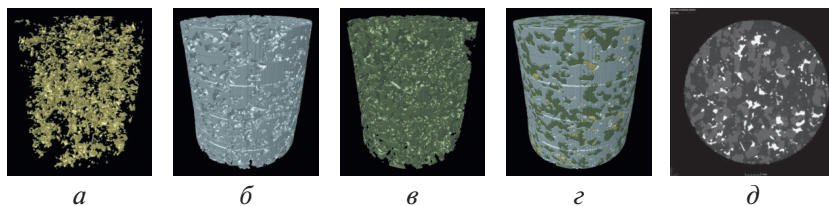


Рис. 2. *a* — сульфиды; *б* — плагиоклаз; *в* — пироксены; *г* — все фазы вместе; *д* — плотностной рентгеновский срез

3) Густовкрапленные сульфиды габбро-диабазовой дайки.

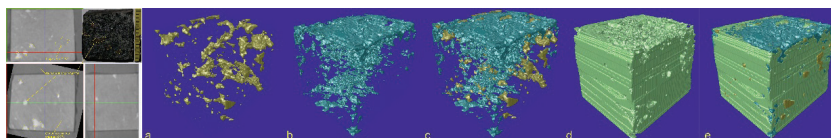


Рис. 3. Золотистым цветом выделены участки сульфидной минерализации

4) Минерализованный лерцолит (сетчатая руда).

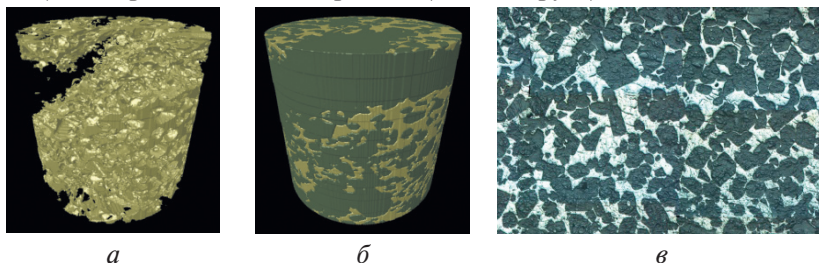


Рис. 4. *a* — сульфиды; *б* — все фазы вместе, сульфиды и основная масса; *в* — фотография породы в отраженном свете. Вмещающая матрица представлена кумулюсным оливином. Интерстиции выполнены сульфидной фазой.

Морфологически это третий тип включений, полностью связанных по всему объему образца.

5) Диопсидит с крупными кристаллами глиноземистой шпинели.

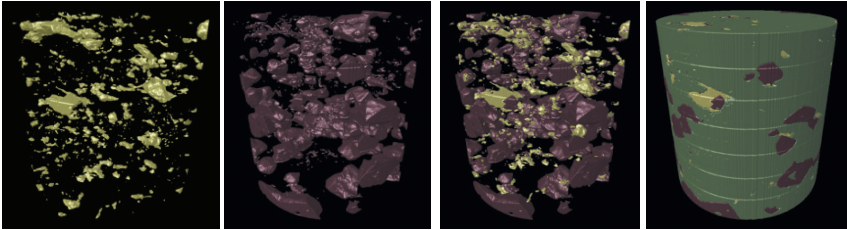
*a**б**в**г*

Рис. 5. *a* — сульфиды; *б* — глиноземистая хромшпинель оливин;
в — сульфиды и хромшпинель; *г* — все фазы вместе.

Кристаллы Al-шпинели возникли как результат перекристаллизации первичного хромшпинелида с удалением части Cr_2O_3 в реакционный диопсид. Этот минерал слагает основную массу, цементирующую реликты трещиноватых кристаллов оливина.

Библиографический список

1. *Корост Д.В.* Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук, 2012 г.
2. *Barnes S. J. et al.* // *Geology*. 2008. V. 36. No. 8. P. 655–658.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ

В. И. Исаев¹, К. Ю. Шепель^{1,2}, А. А. Мухамадиев³, Р. Р. Сафин⁴

¹*РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, г. Москва;*

²*ОАО «ВНИПИ взрывгеофизика», г. Раменское, Московская область;*

³*ОАО «НИИнефтепромхим», г. Казань; ⁴ОАО «РциХимТех», г. Казань
isa@gubkin.ru, shepel@vni pivzryv.ru, ruslan779116@mail.ru*

Методы неразрушающего контроля, к которым относится метод рентгеновской томографии, позволяют проводить качественный анализ и регистрацию различных результатов исследований без нарушения целостности лабораторных образцов пласта [1–4].

Нами (РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, г. Москва; ОАО «ВНИПИ взрывгеофизика», г. Раменское) проведены совместные исследования с ОАО «РциХимТех» (г. Казань) на трех различных группах перфорированных и неперфорированных искусственных образцов продуктивного пласта до и после кумулятивной перфорации штатной перфосистемой и перфосистемой «Спарка» с использованием рентгеновской томографии. Результаты этих работ подтвердили возникновение дополнительного трещинообразования между каналами перфорации, созданными перфосистемой «Спарка». Это дополнительное трещинообразование влияет на улучшение фильтрационных характеристик в прискважинной области пласта при вторичном вскрытии нефтяных и газовых скважин.

В 2012–2015 гг. проведены вторичные вскрытия нефтегазовых скважин на Саматлорском, Южно-Володаровском месторождениях при подготовке скважин к последующему гидроразрыву пласта. Также вторичные вскрытия пластов проведены на Покровском, Кодяковском, Росташинском, Бобровском, Гаршинском, Тананыкском, Усинском месторождениях при создании гидродинамической связи продуктивного пласта со скважиной с использованием перфосистемы «Спарка».

Результаты рентгеновской томографии (рентгеновские снимки до и после перфорации; оценка пористости прострелянных и непрострелянных образцов) позволили нам объяснить эффективность использования перфосистемы «Спарка» при вторичном вскрытии нефтяных и газовых скважин.

Библиографический список

1. *Исаев В. И., Ликотов А. Р., Василенко И. Р., Шепель К. Ю.* Способ вскрытия пласта и испытания моделей крепи скважины // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. 2015. № 2. С. 7–12.
2. Патент на изобретение РФ № 2493357 кл. E21B 43/117, опубликован 20.09.2013. Бюл. № 26 «Способ вскрытия пласта кумулятивными зарядами» / *Ликотов А. Р., Меркулов А. А., Шепель К. Ю. и др.*
3. *Rajani Satti, Dong Kim, Minsuk Ji, Derek Bale.* From Computerized Tomography to CFD: Production Flow Prediction in Realistic Perforation Tunnels // SPE-174244-MS. 2015.
4. *Satti R. P., White R., Ochsner D., Osarumwense O., Zuklic S. N., Sampson T.* New Insights into Optimizing Perforation Clean Up and Enhancing Productivity with Zinc-Case Shaped Charges // SPE-178935-MS. 2016.

IV. ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МИКРОФОКУСНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ И ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

И. Д. Петров

*ВНИИА им. Н. Л. Духова, г. Москва
ivandm_p@mail.ru*

Целью доклада является представление результатов исследования микроэлектронных устройств и датчиков давления на наличие дефектов с помощью микрофокусной томографии.

Традиционные способы контроля в ряде случаев не позволяют проверить качество электрических цепей и состояние проводящих элементов. В производственном цикле могут возникать следующие дефекты: обрыв проводящей проволоки, некачественная сварка или некачественная посадка кристалла. Чувствительные элементы датчиков давления проверяют визуально и с помощью течеискателя. Возможны случаи, когда течеискатель показывает нарушение герметичности, но причину протечки выявить традиционными способами не представляется возможным.

В докладе приведены сечения различных элементов датчиков давления и микроэлектронных устройств с выявленными дефектами и показаны возможности данного метода для их неразрушающего контроля.

Проиллюстрированы различные дефекты и структуры, такие как поры в стеклоспае, обрыв проводов, неоднородность структуры, показаны проводящие элементы конструкции датчиков давления, полости и места приварки.

Приведен пример отображения структуры кремния на кристалле сапфира методом рентгеновской томографии. На снимках рентгеновской томографии показаны дефекты посадки кристалла.

Приведен пример рентгеновской томографии макета микроэлектронного устройства, состоящего из элементов с близкой рентгеновской плотностью, что представляет сложность для рентгеновской томографии.

Библиографический список

1. *Шмаков М.* Выбор системы рентгеновского контроля. Взгляд технолога // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 4. С. 60–68.
2. *Илюшин А. С., Орешко А. П.* // Введение в дифракционный структурный анализ. МГУ, 2008.
3. *Блохин М. А.* // Физика рентгеновских лучей. М.: ГИТТЛ, 1953.
4. *Уманский Я. С.* Рентгенография металлов и полупроводников. М.: Металлургия, 1969.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОГРАФИИ ПРИ АНАЛИЗЕ ОТКАЗОВ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ (ЭКБ)

И. П. Горбачёв

*ОАО «Российские космические системы», г. Москва
GorbachevIP84@yandex.ru*

Оперативный и достоверный анализ отказов на предприятиях — изготовителях радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) позволяет своевременно внести коррективы в процессы изготовления РЭА и программы испытаний ЭКБ, а кроме того, в представление о надежности применяемой ЭКБ.

При анализе отказавших изделий очень важно определить причину нарушения функционирования аппаратуры. Зачастую из-за влияния объективных либо субъективных факторов данное требование не выполняется, в результате чего происходит потеря важной информации об отказе, что затрудняет, а в ряде случаев делает невозможным однозначно определить причины и механизм отказа. Например, при локализации сделано предположение, что одна из микросхем на плате функционирует некорректно. Микросхему демонтируют, ставят новую и работоспособность прибора восстанавливается. Однако при автономной проверке демонтированной микросхемы выясняется, что она соответствует нормам. В результате невозможно однозначно определить причину отказа аппаратуры. Поэтому тщательный подход к анализу изделия, виновного в нарушении работоспособности РЭА, нередко предопределяет успех дальнейших исследований.

Основные проблемы при проведении работ по АО:

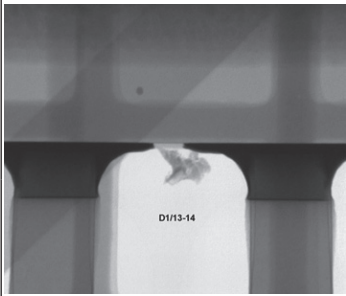
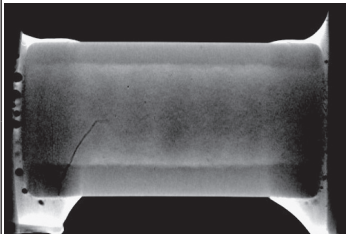
- 1) однозначность локализации отказавшего изделия в аппаратуре. Иногда невозможно сделать достоверные выводы о причинах отказа — замена подозрительного ЭРИ на заведомо исправное приводит к восстановлению работоспособности РЭА, при этом автономная проверка ЭРИ показывает его работоспособность;
- 2) достоверность классификации дефекта отказавшего ЭРИ. Логичным завершением работ по АО считается классификация дефекта (производственный, эксплуатационный, конструктивный и т. п.), определение его распространенности и выработка рекомендаций по исключению подобных дефектов в будущем;
- 3) потеря признаков отказа — самоустранившийся отказ. Данная проблема аналогична проблеме, названной в пункте 1, только в этом случае отказ аппаратуры связан с внутренним дефектом


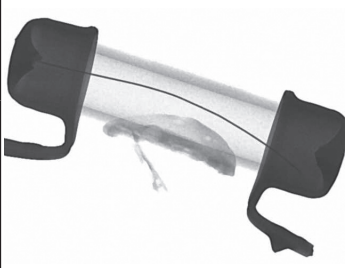
изделия ЭКБ, признаки которого устранились в результате манипуляций с изделием в процессе локализации или подготовки к проведению анализа (выпаивание, демонтаж, транспортировка и т. п.).

Существующие проблемы могут привести к некорректному определению причин отказа и, как следствие, повторным отказам в будущем, что непосредственно влияет на надежность выпускаемой аппаратуры.

Одним из инструментов по исследованию отказов и определению их причин является рентгенография. В частности, в нашей организации для рентгенографического анализа применяется рентгеновская установка с минимальным размером обнаруживаемых элементов 0,2 мкм и контрастным разрешением не ниже 0,5%, поставленная компанией Остек. Применение рентгенографии в работах по АО позволяет в большинстве случаев решить вышеописанные проблемы.

Несколько примеров практического применения рентгенографии при анализе отказавших изделий. Для сравнения будут рассмотрены эти же ситуации, но в предположении, что рентгенография не проводилась.

	X-Ray	Отказ обусловлен замыканием двух выводов ИС посторонней проводящей частицей. Проведен инструктаж с персоналом
	X-Ray	Отказ обусловлен наличием трещины в теле конденсатора. Изготовитель разработал меры по недопущению подобных отказов в будущем
	—	Автономная проверка конденсатора показала, что он полностью соответствует ТУ. Причина отказа не установлена

	X-Ray	Некачественное сварное соединение провода обмотки реле. Рекламация принята. Разработаны меры по недопущению подобных отказов
	—	Вероятная причина — превышение допустимого уровня механических нагрузок (ложная идентификация и бесполезные меры)
	X-Ray	Внутренний обрыв проволоки в области его припайки к колпачку
	—	Разрушение по причине срабатывания — прохождение тока сверх порога срабатывания (ложная идентификация и бесполезные меры)

Обобщая вышеизложенное, можно сделать вывод, что применение рентгенографии при анализе отказов позволяет решить ряд проблем, возникающих при его проведении, избежать ошибочной квалификации и классификации дефектов, затрат времени и ресурсов на выполнение неэффективных мероприятий по предупреждению подобных отказов, тем самым повысив качество, достоверность и сократив время, затраченное на проведение АО.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО МЕТОДА ДЛЯ АНАЛИЗА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

А. Н. Новикова,
ООО «СИНЕРКОН», г. Москва
nan@synercon.ru

Определение толщины покрытий является одним из основных критериев соответствия покрытия техническим и экономическим требованиям. Выбор метода определения толщины зависит от многих факторов: вида покрытия, точности измерения, допустимости разрушения покрытия или самой детали.

Для решения поставленной задачи компания Oxford Instruments предлагает рентгенофлуоресцентный метод (РФА). Приборы, основанные на РФА, позволяют решать одновременно следующие задачи:

- неразрушающий контроль химического состава и толщины однослойных и/или многослойных металлических покрытий;
- 100 %-й контроль толщины покрытия на готовых изделиях;
- оперативный контроль гальванических ванн на содержание основного металла.

Преимуществами метода РФА перед другими методами контроля являются следующие факторы:

- 100 %-й неразрушающий анализ;
- не требуется подготовка образца;
- высокая точность измерения (относительная погрешность 5 %);
- одновременный анализ толщины и химического состава;
- основание — любой материал (в том числе металл, пластик, стекло);
- анализ в заданной точке;
- приборы внесены в реестр средств измерения;
- время измерения от 5 секунд.

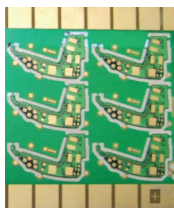
Примеры применения приборов Oxford Instruments

1. Никелирование

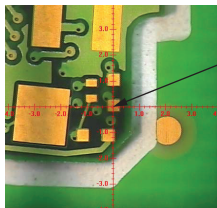
Покрытие	Диапазон	Ошибка
P	3,4–11,2 %	0,4 %
PNi	5–23 мкм	0,3 мкм

Данный пример показывает возможность прямого измерения содержания P в покрытии NiP при одновременном измерении толщины покрытия.

2. Иммерсионное золочение



Изображение
образца



Увеличенное изображение
на экране

Перекрестие используется
для точного определения
положения проведения
анализа на образце

Покрытие ENEPIG на медной подложке.

		Аu, мкм	Pd, мкм	Ni, мкм	
Коллиматор 0,3 мм	Среднее от 10 измерений	0,041	0,086	0,240	4,07
	Заданное значение	0,042	0,090	0,240	3,91
	Стандартное отклонение	0,001	0,004	0,004	0,02

3. Фотоэлементы CIGS

ZnO — контакт к передней поверхности (0,4–0,6 мкм)
CdS — слой окошка (~0,05 мкм)
CIGS — поглотитель (2–4 мкм)
Mo — контакт к тыльной поверхности (~1 мкм)
Подложка (например, стекло)

Результаты измерения ZnO/CdS/CIGS/Mo/Стекло

	Слой Zn	Слой Cd	CIGS слой				Слой Mo	
	Толщина, мкм	Толщина, мкм	Толщина, мкм	Cu, %	In, %	Ga, %	Se, %	Толщина, мкм
Заданное значение	2,97	0,09	2,27	17,6	15,0	4,6	62,8	0,29
Средний результат	2,96	0,09	2,28	17,5	15,0	4,5	63,0	0,29
Стандартное отклонение	0,01	<0,01	0,02	0,2	0,1	0,2	0,2	0,004

В данном примере продемонстрирована возможность одновременно с послойным измерением толщины четырехслойного покрытия измерять химический состав третьего слоя поглотителя.

Приведенные примеры иллюстрируют лишь несколько областей применения. Анализаторы Oxford Instruments выполняют анализ многослойных покрытий для различных отраслей промышленности, включая электронику, машиностроение, производство кабеля, приборостроение и т.д. в любом производстве, где применяются металлические покрытия.

Применение анализаторов Oxford Instruments в условиях предприятия позволит:

- повысить производительность с лучшим управлением процессом;
- минимизировать издержки производства металлизации, обработки и увеличить выпуск продукции;
- проводить быстрый, неразрушающий анализ химического состава сплавов, в том числе сплавов драгоценных металлов;
- проводить измерение толщины до четырех слоев покрытия одновременно;
- проводить неразрушающий контроль толщины и химический анализ, в том числе на готовых изделиях;
- в 10 раз сократить время проведения анализа толщины покрытий (по сравнению с металлографическим методом);
- в 1,5 раза сократить расход исходных материалов;
- уменьшить себестоимость готовой продукции за счет сокращения расходов на материалы и время контроля;
- повысить качество выпускаемой продукции за счет получения равномерного покрытия.

**4-я Международная конференция
«Новейшие технологии контроля» — 2016
6–7 апреля 2016 года.
Москва, Владимир. Тезисы.**

Редактор — Е. В. Незнанова
Компьютерная верстка — С. С. Бегунов
Корректор — О. Ч. Кохановская
Дизайн обложки — Н. А. Данилова

Подписано в печать 10.06.2016
Гарнитура Ньютон
Формат 60х90/16

Печ. л. 3. Тираж 100 экз.
Бумага матовая мелованная 115 г/м²

ООО «Остек-СМТ»
123592, г. Москва, ул. Кулакова, д. 20, стр. 1Г
Тел.: (495) 788-44-44. Факс: (495) 788-44-42

Отпечатано в типографии
ООО «ВЕСТА-ПРИНТ»
115114, г. Москва, ул. Дербеневская, д. 20/2, стр.19



Channel Partner
GE Oil & Gas

Группа компаний Остек
ООО «Остек-СМТ»
Направление технологий контроля

123592, Российская Федерация
г. Москва, ул. Кулакова, д. 20, стр. 1Г
телефон: +7 (495) 788-44-44
факс: +7 (495) 788-44-42
e-mail: info@ostec-ct.ru
www.ostec-ct.ru



Узнайте больше
на нашем интернет-сайте