

Submitted 28.10.20
Accepted 30.11.20

Основные тенденции в радиографии

Вниманию читателей предлагаются основные тенденции в рентгеновском контроле в Германии. Рассматриваются, в частности, выбор плоскостных детекторов, контроль качества рентгеновских изображений, компенсация рассеянного излучения при визуализации томограмм, применение стандарта DICOM и технологии цифровых близнецов.

A. V. Dmitriev¹

Main Trends in Radiography

The main trends in X-ray inspection in Germany are presented to readers. In particular, the selection of flat panel detectors, quality control of X-ray images, compensation of scattered radiation when imaging tomograms, the use of the DICOM standard and digital twin technology are considered.

Keywords: NDE-4.0, database, interfaces, information models

Плоскостные детекторы

В настоящее время практически полностью завершён переход от усилителей рентгеновского изображения к плоскостным детекторам (DDA), рис. 1. Подавляющее большинство систем, предлагаемых на рынке, комплектуются такими детекторами, кроме того, производится постепенная модернизация уже установленных систем. Типичным можно считать разрешение 100–200 мкм при размере стороны 20–40 см (8–16 дюймов) [1].

Качество детекторов постоянно растёт. Усовершенствования касаются как изменения состава сцинтиллятора с целью увеличения радиационной устойчивости и чувствительности, так и увеличения разрешения (существуют детекторы с размером пикселя 75 и даже 50 мкм). Следует отметить, что динамический диапазон детекторов заметно превышает динамику усилителей

изображения — если в случае усилителей динамический диапазон составляет 1:500, то в случае детекторов он может быть 1:5000 [2], достигая 1:10000 [1].

Выбор плоскостных детекторов

В настоящее время одним из основных стандартов, устанавливающих методику измерения параметров плоскостных детекторов, является стандарт ASTM E2597 [3]. Несмотря на то, что стандарт этот — американский, он широко применяется и в Германии, где используется стандарт E2597M-14 (буква «М» в наименовании стандарта указывает на метрическую систему, использованную для описания размеров эталонов, используемых для проверки качества детекторов, а «14» — это год принятия стандарта). Стандарт [3] предназначен по большей части для производителей детекторов и унифицирует методику измерения параметров и представление результатов проверок.

Основные измеряемые параметры:

- интерполированное разрешение детектора (iSRbdetector);
- эффективность (отношение сигнал/шум, нормированное на 1 мГр);
- контрастная чувствительность CSa;
- диапазон просвечиваемых толщин (SMTR);
- послесвечение детектора (Lag);
- выжигание детектора (Burn-In);
- битые пиксели детектора;
- внутреннее рассеянное излучение (ISR).

Пять первых параметров — основные, и по ним составляется «лестничная» диаграмма, на которой измеренные значения приведены к «классам». Например, разрешение детектора 100 мкм соответствует классу 9, а разрешение 200 мкм — классу 7. Таким образом, мы можем сравнивать детекторы. На рис. 2 изображены две диаграммы для двух детекторов разных типов, наложенные друг на друга. Хорошо видно, что детектор с более высоким разрешением обладает меньшей чувствительностью.

Обычно строится три диаграммы, полученные с применением измерительных эталонов, изготовленных из алюминия, титана и инконеля. Следует отметить, что процедура проверки устанавливается стандартом ASTM и не допускает отклонений.

Подобные диаграммы упрощают выбор и сравнение детекторов разных производителей применительно к требованиям конкретной рентгенографической системы.

Подобные диаграммы упрощают выбор и сравнение детекторов разных производителей применительно к требованиям конкретной рентгенографической системы.



Рис. 1. Плоскостной детектор Dynamic 41 I 200r фирмы Waygate Technologies

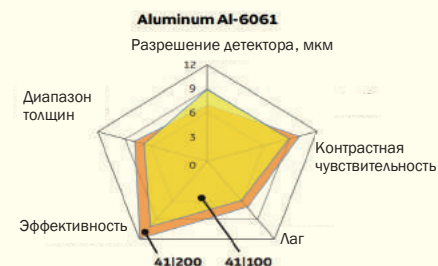


Рис. 2. Характеристика детекторов Dynamic 41 I 100 и 41 I 200r в соответствии с ASTM E2597-14 для AL (действительна для конкретных настроек усиления детектора)

¹ WaygateTechnologies, Wunstorf, Germany; andrey@dmtriev.de

Особенности, связанные с высоким динамическим диапазоном детекторов

Одной из особенностей рентгеновских детекторов по сравнению с усилителями рентгеновского изображения является высокий динамический диапазон получаемого изображения. В большинстве случаев усилители комплектовались 8–10, реже 12-битными камерами. Плоскопанельные детекторы как правило имеют в составе аналогово-цифровой преобразователь с разрядностью 14 бит или выше. Высокий динамический диапазон позволяет значительно увеличить диапазон толщин объекта контроля (ОК), просвечиваемых на одном изображении. В случае автоматической обработки высокая разрядность изображений не представляет особых проблем, однако при визуальном контроле возникает проблема с отображением подобных изображений на экране монитора. Дело в том, что стандартный монитор может отобразить лишь 256 градаций серого. Зачастую в неразрушающем контроле с успехом применяются специализированные «медицинские» мониторы, которые имеют матрицы с глубиной 10 бит, что соответствует 1024 градациям серого. Дальнейшее повышение глубины смысла не имеет — человеческий глаз не в состоянии различить такое количество градаций. Но даже несмотря на высокое качество таких мониторов мы просто не в состоянии увидеть небольшие изменения интенсивности, вызванные дефектами литья на шестнадцатитбитном изображении, содержащем до 65 тысяч градаций. Один из очевидных методов показа такого изображения на экране монитора — это визуализация узких диапазонов интенсивностей, соответствующих разным толщинам материала.

Основной недостаток этого метода заключается в том, что оператор рентгенографической системы вынужден постоянно переключаться между различными диапазонами интенсивностей, соответствующих разным толщинам материала, что увеличивает время проверки. Для того чтобы одновременно отобразить на экране монитора различные толщины и не «потерять» при этом дефекты, основные производители комплектуют программное обеспечение специальными фильтрами, сжимающими динамический диапазон. Один из хорошо известных примеров, это кратномасштабный фильтр (рис. 3), основанный на пирамиде Лапласиана (Multi-Scale Image Contrast Amplification или сокра-

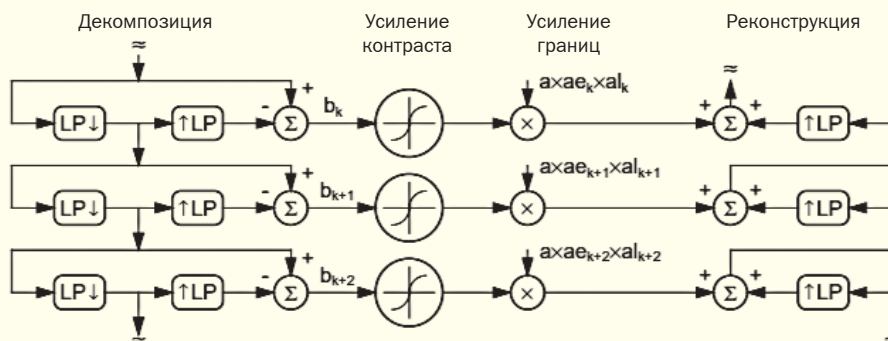


Рис. 3. Комбинированный многомасштабный фильтр

щённо MUSICA), разработанный компанией Агфа [4].

Суть этого весьма элегантного алгоритма заключается в декомпозиции, осуществляемой с помощью Лапласиан пирамиды, при этом каждый уровень пирамиды является уточнением предыдущих и соответствует отдельной полосе частот, затем осуществляется сжатие общего диапазона при помощи сигмаобразных кривых, и после последующей реконструкции общие значения интенсивности на разных толщинах примерно одинаковы, но дефекты и структуры (представляющие собой высокочастотные фракции), становятся хорошо видимыми [5], рис. 4.

Контроль качества рентгеновских изображений

Для контроля качества систем в Германии достаточно широко применяются стандарты ASTM (несмотря на наличие стандартов ISO). Одним из основных для 2D систем стал стандарт ASTM E2737-10 (2018) [6]. Многие немецкие предприятия имеют аккредитацию Nadcap (National Aerospace and Defence Contractors Accreditation Program), и одним из критериев успешной сертификации рентгеновской системы по этой программе является демонстрация возможности автоматического контроля качества согласно стандарту ASTM E2737. Следует отметить, что некоторые российские предприятия — ВСМПО-Ависма (Верхняя Салда), Каменск-Уральский металлур-

гический завод (ОАО КУМЗ), ЗАО ВолгАэро (Рыбинск) — также имеют эту аккредитацию. Не следует путать стандарт E2737 со стандартом E2597 [3]. Стандарт E2597 предназначен для измерения параметров детектора, в то время как стандарт E2737 предназначен для измерения параметров системы в целом (в данном случае на результаты измерений будет оказывать влияние не только параметры детектора, но и размер фокусного пятна, геометрическое увеличение, параметры рентгеновского излучения и т.д.). Следует понимать, что стандарт устанавливает методику измерения, но не определяет допуски.

Для измерения качества используется двухступенчатый эталон с двухпроводным индикатором и пенетраметрами, либо бесступенчатый клин.

По этой методике производится измерение следующих параметров:

- пространственное разрешение;
- отношение контраст шум и контрастная чувствительность;
- диапазон просвечиваемых толщин;
- отношение сигнал/шум и уровень сигнала;
- лаг детектора и прожиг детектора;
- смещение (уровень сигнала без рентгеновского излучения);
- распределение битых пикселей.

Стандарт устанавливает перечень тестов. Как правило «укороченный» тест проводится перед началом каждой рабочей смены, а полный тест выполняется после замены или ремонта детектора или рентгеновской трубки.

Томография: компенсация рассеянного излучения

Компьютерная томография получает всё большее распространение как для контроля литых деталей на предмет дефектов литья: пор, трещин, включений инородных материалов, так и для контроля геометрических размеров деталей (метрология). Однако зачастую артефакты томографических изображений

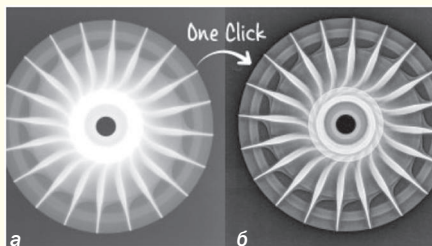


Рис. 4. Рентгенограмма крыльчатки воздушной турбины: а — без фильтра; б — с фильтром

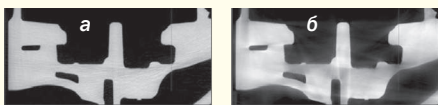


Рис. 5. Срезы с компенсацией (а) и без компенсации (б) рассеянного излучения

налагают ограничения на точность измерений. Одним из основных источников артефактов является рассеянное излучение, приводящее к тому, что значения интенсивностей в каждой точке проекций несколько отличаются от «истинных», что и приводит к искажениям и артефактам. Суть метода компенсации рассеянного излучения заключается в определении вклада такого излучения в общее изображение и вычитании его перед реконструкцией томографического изображения. Существует два принципиально различных подхода.

Первый подход к решению данной проблемы заключается в размещении перед детектором специальной решётки-сетки (называемой также Antiscatter Grid), отсекающей рассеянное излучение за счёт того, что отверстия направлены строго по направлению к фокальному пятну трубки [7].

Выполняя сканирование с сеткой и без сетки, становится возможным определить вклад рассеянного излучения, скомпенсировать его и получить лучшее качество реконструированного изображения [5], рис. 5.

Второй подход — математический, в котором строится модель математического ожидания рассеянного излучения, основанного на симулированной реконструкции. Если у нас доступна CAD-модель изделия, то мы можем получить «идеальное» томографическое изображение, затем вычесть его из реального, таким образом определить вклад рассеянного излучения [8].

Ещё одна разновидность математического подхода — Simulation-Based Artifact Correction (SBAC) — использует методы глубокого обучения, и это наиболее современный подход. Методы, описанные выше, работают в реальном времени, но они используют различные допущения и приближения и могут быть недостаточно точными. Более сложные подходы, основанные на методе Монте-Карло, дают повышенную точность, но они слишком медленные. Для совмещения точности и производительности была предложена так называемая оценка глубокого рассеяния DSE, основная идея которой заключается в обучении глубокой свёрточной нейронной сети (DCNN) для воспроизведения оценок рассеяния метода Монте-Карло [8].

Коллимированные линейные детекторы

Изложенная коррекция рассеянного излучения не является необходимой в случае применения линейных детекторов (состоящих из одной линейки пикселей). При использовании таких детекторов можно использовать сильно коллимированный источник, а также дополнительный коллиматор на входе детектора, что значительно уменьшает ошибку, вызванную рассеянным излучением. Наилучшие результаты получены при применении изогнутых детекторов, у которых расстояние от каждого пикселя до фокусного пятна одинаково (они рассчитаны на строго определённое расстояние детектор — источник). В основном такие детекторы применяются для встраивания в системы контроля турбинных лопаток, где требуется проводить томографию отдельных срезов для контроля толщины стенок и глубины охлаждающих каналов.

Стандарт DICONDE

Этот стандарт, основанный на медицинском стандарте DICOM, получает всё большее распространение в Европе и Германии. Изначально DICONDE (Digital Imaging and Communication in NDE) использовался в основном применительно к авиационному НК, где весьма высоки требования к долгосрочной и унифицированной архивации рентгеновских изображений турбинных лопаток и других деталей. С появлением компаний, предоставляющих услуги НК, всё большее предпочтение отдаётся формату DICONDE. Следует отметить, что DICONDE это не просто формат хранения изображений с метаданными, но также и коммуникационный протокол, что даёт возможность производить интеграцию систем разных поставщиков в единую систему обмена данными. Унификация метаданных определяется стандартом ASTM E2339-15 [9] и другими стандартами. Таким образом, не только собственно рентгеновское изображение, но и важные атрибуты, такие как серийный номер изделия, параметры просвечивания и т.д. используются одинаковым образом независимо от производителя программного обеспечения.

Цифровые близнецы («Digital Twins»)

Это весьма интересный тренд, использующий возросшие мощности вычислительной техники и современные решения визуализации для создания

«виртуальных близнецов» реально действующих систем. Как правило, используется трёхмерная CAD-модель системы, причём модель поддерживает промышленные протоколы для связи с виртуальной АСУТП (например, OPC UA). Основным сценарий использования — упрощение пуска наладки оборудования НК на всех этапах производственного процесса. В качестве примера такого решения можно привести пакет iPhysics от компании machineering GmbH & Co. KG [10]. Следует заметить, что симуляция перемещения всех механических компонентов производится в соответствии с законами физики и учётом всех свойств манипуляторов, что даёт возможность проверить такие важные параметры как время цикла НК, что очень важно для систем НК, работающих в составе автоматизированного конвейерного производства. Ещё одно применение «цифровых близнецов» применительно к рентгеновскому контролю — возможность оптимизации плана проверки изделия ещё на этапе постройки системы [11]. Например, для полного контроля головки блока цилиндров требуется приблизительно 50–80 позиций и «цифровой близнец» позволяет загрузить CAD-модель изделия, выбрать подходящие позиции просвечивания (ведутся экспериментальные работы по автоматизации этого процесса) и оценить время проверки при использовании детекторов различных размеров, что позволяет заметно сократить общее время пуска наладки оборудования. Также «цифровые близнецы» являются хорошим подспорьем в условиях пандемии, так как значительную часть программирования АСУТП можно выполнить, не покидая домашнего офиса.

Аддитивные технологии

В настоящее время часть литых деталей заменяется на детали, отпечатанные на 3D-принтерах. С точки зрения НК принципиальной разницы нет, но есть определённые специфические особенности, на которые следует обращать внимание при НК деталей, полученных методом печати. Прежде всего, это несколько иные типы дефектов, возникающие из-за возможных проблем с отдельными слоями — они могут выглядеть как тонкие трещины в направлении слоёв. Вторая проблема — несоответствие геометрическим размерам, вызванное нарушениями перемещения печатающего сопла. Таким образом, важным параметром является метрологический контроль, который в основном

осуществляется в томографических системах путём сравнения томографического изображения с референсной CAD моделью изделия [12].

Применение методов машинного обучения

В последние годы в области машинного зрения растёт популярность методов машинного обучения, развиваются библиотеки фреймворки, такие как TensorFlow и другие. В настоящее время осуществляются попытки применения методов машинного обучения для автоматизированного поиска дефектов. Основная проблема заключается в накоплении достаточного количества материала для обучения. Примерно год назад интересный эксперимент был проведён компанией «Северсталь», в рамках которого проводился конкурс по поиску дефектов проката. Для радиографического контроля представляется возможным подход с комбинацией традиционных методов с методами машинного обучения (изображения с дефектами дополнительно проверяются методами машинного обучения для уменьшения количества брака). Также многообещающим является подход с обучением алгоритмов при помощи синтезированных изображений, в которые искусственно добавляются дефекты для обучения. И хотя полноценных решений для поиска дефектов ещё нет, но уже существуют системы для контроля SMD компонентов в подающих лентах, основанные на облачных технологиях.

НК аккумуляторных батарей

В настоящее время мы переживаем «бум» смартфонов, гаджетов, растёт количество электромобилей, в составе которых применяются аккумуляторные батареи различных типов. Дефекты этих устройств могут приводить к самовозгоранию батарей, кроме того важно отсутствие дефектов в корпусах, могущих повлиять на безопасность, например при ДТП. В случае литий-полимерных батарей возможны нарушения геометрии

анодов и катодов, могущие приводить к внутренним коротким замыканиям.

НК небольших батарей, применяемых в смартфонах, имеет свои особенности [13], рис. 6. Во-первых, важна высокая разрешающая способность системы — практически до единиц микрон, а во-вторых, требуются специальные методы анализа изображений для проверки геометрии электродов. Также требуется высокая скорость проверки, связанная с необходимостью обеспечить большую пропускную способность автоматизированной линии проверки.

Использование ускорителей в рентгенографическом контроле

До настоящего момента системы НК с использованием ускорителей пока не получали широкого распространения, однако в этом году была представлена система с ускорителем 9 МэВ [14], рис. 7.

Эта система представляет собой гибридную конструкцию, включающую в себя не только ускоритель, но и «традиционную» двухполюсную трубку, а также плоскостной детектор, скомбинированный с линейным детектором.

NDT 4.0

Обзор современных трендов в радиационном НК был бы, пожалуй, неполным без упоминания «NDT 4.0». Термин этот появился по аналогии с «Промышленностью 4.0». Первой «технологической революцией» принято считать появление паровых машин и простой механизации труда, второй — использование электричества, третьей — начало использования компьютеров и появление автоматизированных линий и роботов. Четвёртая революция — переход к цифровым унифицированным коммуникациям (на основе 5G), применение машинного обучения. И хотя сейчас наблюдается определённая «технологическая полка» в развитии, но определённые изменения хорошо заметны: полевые шины (например, Profibus) заменяются Industrial Ethernet, всё шире внедря-

ется протокол OPC UA (Open Platform Communications — Unified Architecture), на предпоследней выставке Control в Ганновере был открыт павильон 5G. НК, следуя тренду, определяет NDT 1.0 как оптический контроль, NDT 2.0 как появление рентгеновского (с использованием плёнки) контроля и других методов, NDT 3.0 ознаменовался внедрением цифровых технологий и компьютерной обработки, ну и вот теперь NDT 4.0, куда включаются методы машинного обучения, облачные технологии, связь 5G, хотя разница между 3.0 и 4.0 довольно размыта, поскольку принципиального взрывного «скачка» технологий пока что не наблюдается [11].

Литература

1. Dynamic 41 digital detectors. Waygate Technologies, 2020. (Access <https://dam.bakerhughesds.com/m/22747456343a9298/original/Phoenix-Dynamic-41-EN-BH-PD31354-072020.pdf>)
2. Seibert J.A. Flat-panel detectors: how much better are they? — Pediatric Radiology. 2006. V. 36. Suppl 2. P. 173–181.
3. ASTM E2597/E2597M-14. Standard Practice for Manufacturing Characterization of Digital Detector Arrays. — ASTM International, 2014. — 19 p.
4. Vuylsteke P., Schoeters E. Image Processing in Computed Radiography. — In: Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology/DGZP Proceedings BB 67-CD. — Berlin: March 15–17, 1999, p. 87–101.
5. Industrial Computed Tomography Innovations. Waygate Technologies, 2020. (Access https://www.bakerhughesds.com/sites/g/files/cozyhq596/files/2020-06/phoenix-ct-innovations-overview-en_bhpd-31358-052020.pdf)
6. ASTM E2737–10 (2018). Standard Practice for Digital Detector Array Performance Evaluation and Long-Term Stability. — ASTM International, 2018. — 19 p.
7. Tang X. Scatter correction methods and apparatus/Patent US20040264629A1. — GE Medical Systems Global Technology Co LLC, 2003.
8. Maier J. Artifact Correction and Real-Time Scatter Estimation for X-Ray Computed Tomography in Industrial Metrology. — ZfP – Zeitung. 2020. Nr. 171. S. 34–46.
9. ASTM E2339–15. Standard Practice for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation (DICONDE). — ASTM International, 2015. — 11 p.
10. Das unkomplizierte, flexible und visuelle Tool zur virtuellen Inbetriebnahme. (Access <https://www.machining.com>)
11. Schulenburg L. NDT 4.0 — Opportunity or threat? — Materials Evaluation. 2020. V. 78. No. 7.
12. Schulenburg L. Computer Tomographie für additiv gefertigte Teile — Chancen und Limitierungen, VisiConsult GmbH, 2020.
13. CT for Lithium-Ion battery inspection in laboratory and shopfloor, Waygate Technologies, 2020 (Access https://www.bakerhughesds.com/sites/g/files/cozyhq596/files/2020-01/bhcs34594_lithium_ion_battery_flyer_r1.pdf)
14. High Energy CT Inspection, Waygate Technologies, 2020. (Access <https://www.bakerhughesds.com/waygate-technologies/radiography-high-energy-ct-inspection>)

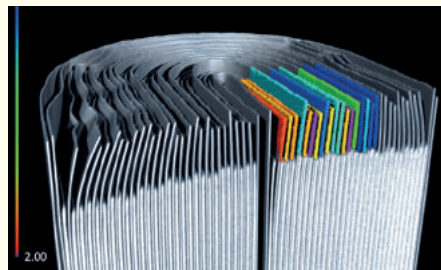


Рис. 6. Визуализация структуры и геометрии литий-ионного аккумулятора



Рис. 7. Система фирмы Waygate Technologies с ускорителем 9 МэВ

Статья получена 28 октября 2020 г.,
в окончательной редакции — 30 ноября.