

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ (2.2.8)

УДК 620.179.1

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-155-165

Информативность результатов контроля изделий из металлических материалов методом рентгеновской компьютерной томографии

О.А. Крупнина, Е.И. Косарина, Н.А. Михайлова, А.А. Демидов

Информативность в рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) — качество и точность ее результатов. Несмотря на бесспорные преимущества РКТ перед другими методами неразрушающего контроля, повсеместного ее внедрения в промышленность по причинам высокой себестоимости и низкой производительности не произошло. Кроме того, в России отсутствует нормативно-техническая база, регламентирующая процедуру выбора параметров томографического контроля, в том числе, нет методик оценки качества результатов РКТ. В связи с этим выполнен анализ стандарта США ASTM E 1695 Standard Test Method for Measurement of Computed Tomography (CT) System Performance, регламентирующего процедуру количественной оценки качества томограмм цилиндрического тест-объекта, а именно, пространственного разрешения и контрастной чувствительности. Стандарт описывает способы и математический аппарат для вычисления функций передачи модуляции (MTF), распознавания контраста (CDF) и построения диаграммы контраст-детализации (CDD), учитывающей влияние и нерезкости, и шума на возможность обнаружения дефекта определенного размера и морфологии. Значения MTF, полученные при конкретных условиях сканирования и реконструкции, являются показателем качества результатов РКТ для объектов, исследованных при тех же условиях сканирования и изготовленных из аналогичного по коэффициенту ослабления материалов, и могут служить для оценки чувствительности контроля методом РКТ. Дано определение артефактов, как любого несоответствия между значениями коэффициента ослабления реконструированного объема и истинными коэффициентами ослабления объекта. Приведено объяснение причин появления артефактов, показаны их изображения на томограммах, представлены рекомендации по их минимизации. Указаны факторы, влияющие на информативность результатов рентгеновского томографического контроля.

Ключевые слова: рентгеновская компьютерная томография, информативность, пространственное разрешение, контраст, шумы томографического изображения, артефакт.

Для цитирования: Крупнина О.А., Косарина Е.И., Михайлова Н.А., Демидов А.А. Информативность результатов контроля изделий из металлических материалов методом рентгеновской компьютерной томографии // Вестник МЭИ. 2023. № 1. С. 155—165. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-155-165.

Information Value of the Results of Examining Metallic Products by the X-Ray Computer Tomography Method

О.А. Krupnina, E.I. Kosarina, N.A. Mikhailova, A.A. Demidov

The information value of X-ray computer tomography (X-CT) lies in the quality and accuracy of its results. Despite indisputable advantages of X-CT in comparison with other non-destructive examination methods, it has not received widespread use in the industry in view of its high cost and low throughput capacity. In addition, in Russia there is no regulatory and technical framework that would stipulate a standard procedure for selecting the tomographic examination parameters, nor are there standard techniques for estimating the quality of X-CT results. In view of this circumstance, the article analyses the US standard ASTM E 1695 Standard Test Method for Measurement of Computed Tomography (CT) System Performance. This standard stipulates a procedure for quantitatively assessing the

quality of tomograms of a cylindrical test specimen, namely, spatial resolution and contrast sensitivity. The standard describes methods and a mathematical tool for calculating the modulation transfer function (MTF), contrast discrimination function (CDF), and constructing a contrast-detail diagram (CDD), which takes into account the influence of both unsharpness and noise on the possibility of detecting a flaw of certain size and morphology. The MTF values obtained under specific scanning and reconstruction conditions are a quality indicator of the X-CT results for objects examined under the same scanning conditions and made of materials similar in terms of attenuation coefficient, and can be used to assess the sensitivity of examination by the X-CT method. The article defines artifacts as any discrepancy between the object's reconstructed volume and real attenuation factors. The reasons why artifacts appear are explained, their images on tomograms are shown, and recommendations for minimizing them are given. Factors affecting the information value of the X-ray tomographic examination results are pointed out.

Key words: X-ray computed tomography, information value, spatial resolution, contrast, tomographic image noise, artifact.

For citation: Krupnina O.A., Kosarina E.I., Mikhailova N.A., Demidov A.A. Information Value of the Results of Examining Metallic Products by the X-Ray Computer. Bulletin of MPEI. 2023;1:155—165. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-155-165.

Введение

Безотказную работу авиационной техники можно обеспечить при условии полного соответствия технологии ее производства и соблюдении правил эксплуатации [1 — 3]. Однако, даже при соблюдении всех требований, как в процессе производства авиационных материалов и изделий из них, так и при эксплуатации объектов авиационной техники, возникают дефекты, которые необходимо своевременно выявлять. В производстве авиационной техники, наряду с другими видами, такими как акустический [4, 5], радиационный неразрушающий контроль (НК), широко распространен радиографический метод [6]. Уровень современных технологий в материаловедении и производство изделий показывают, что традиционные методы неразрушающего контроля далеко не всегда объективно и полноценно оценивают качество функциональных материалов и выполненных из них изделий. Очевидна необходимость применения новых методов НК. Один из таковых — рентгеновская компьютерная томография (РКТ) (таблица), позволяющая:

- получать структурно-морфологические характеристики материалов и изделий в трех измерениях;
- определять размер и расположение пустот и ионодных включений, области с пониженной плотностью;
- проводить измерения геометрических величин и оценивать степень их соответствия конструкторской документации [7, 8].

Посредством РКТ, с одной стороны, можно качественно обнаружить аномалии в контролируемом объекте, с другой стороны, выполнить их количественную

оценку. Поскольку результатом РКТ является трехмерная модель объекта, то, по сравнению с радиографией, объем полезной информации об объекте контроля значительно больше.

Несмотря на перечисленные достоинства РКТ, использование данного метода не получило широкого применения в производстве [9]. Причины объективны:

- высокая стоимость;
- низкая производительность;
- отсутствие нормативно-технической базы по применению РКТ в промышленности.

Проведение радиографического контроля как за рубежом, так и в России регламентировано нормативными документами, соблюдение которых позволяет получить результат с заданной информативностью. Отсутствие в Российской Федерации нормативно-технической базы, регламентирующей процедуру выбора параметров томографического контроля, способы и средства оценки качества результатов РКТ, — серьезная причина, тормозящая внедрение РКТ в производство [10, 11].

Информативность рентгеновской компьютерной томографии

Состояние вопроса.

Ввиду низкой производительности и высокой стоимости рентгеновской компьютерной радиографии, ее основное преимущество — информативность результатов. Одной из основных проблем, требующих проведения исследований и затрудняющих внедрение метода РКТ в производственную практику, является отсутствие общепринятых подходов или утвержденной процедуры оценки информативности результатов

Функции рентгеновской компьютерной томографии

Визуализация и качественный анализ	Метрология и количественный анализ
Оценка внутренней морфологии	Геометрические измерения
Дефектоскопия: обнаружение пор, трещин, включений	Сравнение с CAD-моделью и обратное проектирование
Анализ ориентации волокон	Измерение толщины стенок
Оценка коррозионных повреждений и износа	Количественное определение гранулометрического состава; количественная оценка распределения плотности и волокна; установление объемной доли пор

РКТ, поскольку без количественных характеристик, позволяющих оценить качество и точность результатов томографии, информативность данного метода будет гипотетической.

Томография — многоэтапный процесс получения и преобразования данных об исследуемом объекте, и на каждом этапе вносятся свои погрешности. В работе [11] смоделирован процесс получения результата РКТ по этапам передачи и трансформации сигнала от генерации фотонов рентгеновской трубкой до визуализации данных на дисплее (рис. 1).

Подобным образом можно оценить изменения (в целом — ухудшение) исходного сигнала $f(x, y)$ в процессе детектирования и дискретизации в численные массивы $d(m, n)$ и до представления на дисплее в виде томограммы $c(m, n)$, которые на каждом шаге описываются некоторой функцией передачи H_i .

На каждом этапе преобразования данных, помимо полезной информации об ОК, формируются побочные сигналы, не имеющие отношения к ОК, вносящие шум в той или иной степени. Природа шумов различна, полностью исключить их образование невозможно, в большинстве случаев проблематично даже снизить их величину.

Для изображения, в том числе томографического, мерой полезной информации считаются четкость и контраст. Контраст — разница уровней серого между

фоновым и аномальным участками изображения. Четкость (пространственное разрешение) характеризуется тем, что на изображении отдельно различимы близко расположенные мелкие элементы. При воспроизведении мелких элементов контраст их изображения из-за шумовых процессов снижается иногда настолько, что они становятся неразличимыми.

Анализ стандарта ASTM E1695-20.

Для оценки четкости изображения и контрастной чувствительности нормативным документом США ASTM E1695-20 регламентирована процедура анализа томограммы специально изготовленного цилиндрического образца [12, 13]. В соответствии с рекомендациями ASTM E1695 к конструкции образца предъявляются следующие требования:

- материал в сочетании с диаметром цилиндра (диска), должен быть выбран таким образом, чтобы величина ослабления рентгеновского излучения образцом приближалась к величине ослабления излучения объектом контроля (ОК). Желательно, чтобы образец был изготовлен из того же сплава (материала), что и ОК;
- диаметр цилиндра (диска) следует выбирать таким, чтобы изображение образца занимало значительную часть реконструированного сечения, в том числе, чтобы величины ослабления дозы излучения образцом и ОК были аналогичны;
- толщина цилиндра (диска) должна быть больше высоты сечения (толщины среза при спиральном ска-

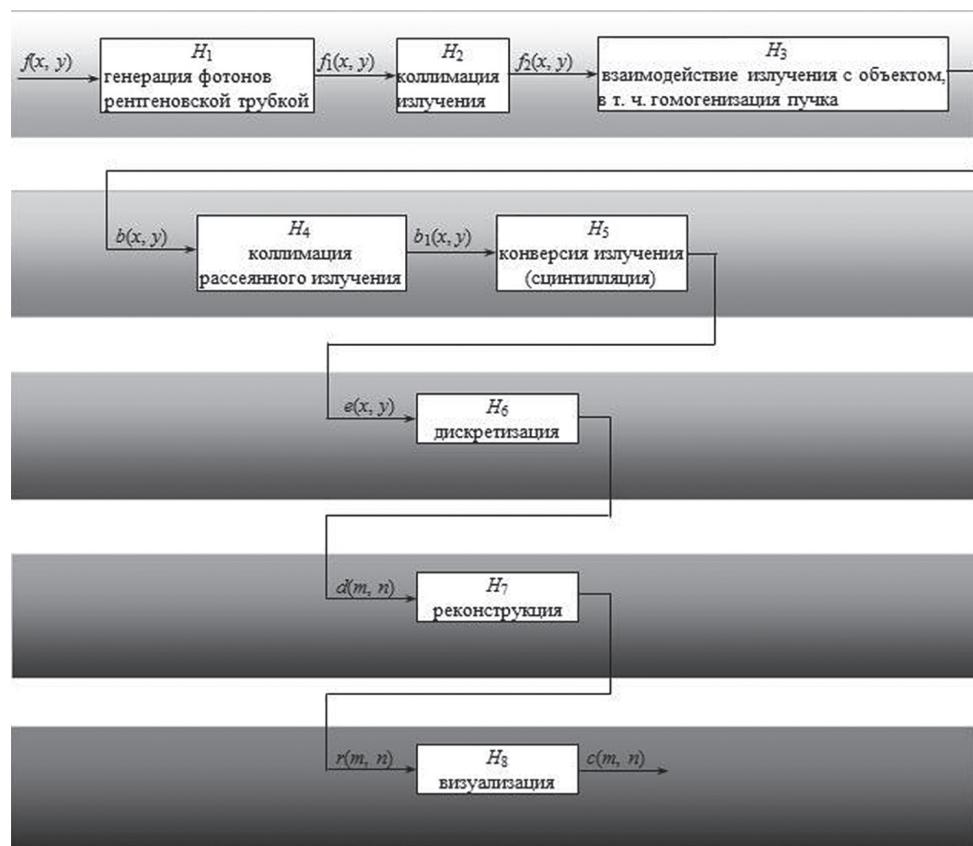


Рис. 1. Процесс получения томографического изображения как этапы передачи и трансформации сигнала

нировании или размера вокселя при сканировании в конусном пучке);

- шероховатость поверхности цилиндра (диска) не может нарушать точность измерения нерезкости;

- ось цилиндра (диска) должна быть перпендикулярна поверхности, используемой для крепления образца к поворотному столу томографа, что не даст ошибок при измерении нерезкости.

Пространственное разрешение получаемого изображения количественно характеризуют функцией передачи модуляции (ФПМ или МТФ), представляющей собой зависимость относительного контраста изображения от пространственной частоты $v = 1/x$, мм^{-1} (x — пространственная координата, мм). На рисунке 2 представлены идеальное и реальное изображения некоторой миры с постоянным уменьшением ширины штрихов. На идеальном изображении штриховой миры контраст между штрихами абсолютный — они имеют четкие границы. Реальное изображение (синусоидальная мира, для которой переход между темными и светлыми участками меняется по синусоидальному закону в перпендикулярном к штрихам направлении) размыто из-за нерезкости, проявляющейся тем заметнее, чем меньше ширина элементов миры. Нечеткость изображения на широких элементах (низких частотах) практически не влияет на контраст изображения.

Для элементов малой ширины (высоких частот) изображение вуалируется, и контраст снижается. Чем выше пространственная частота, тем ниже контраст передаваемого изображения.

Контрастная чувствительность определяется различным превышением уровня серого, соответствующего изображению аномалии над шумовыми колебаниями уровня серого, подобного изображению фоновых участков. Нормативный документ ASTM E1695-20 вводит понятие функции контрастного разрешения (CDF, Contrast Discrimination Function), — способности различать контрастный элемент размером D^* вокселяй на однородном фоне, содержащем определенной величины шум. Чтобы рассчитать контрастную чувствительность, экспериментально определяют величины среднего значения уровня серого и стандартного отклонения для областей интереса различных размеров в центральной части произвольного сечения томограммы цилиндрического тест-образца. Стандартное отклонение σ_m рассчитывают, используя выборку из N измерений уровня серого для областей интереса различных размеров по формуле

$$\sigma_m(gv_i) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (gv_i - \bar{gv})^2},$$

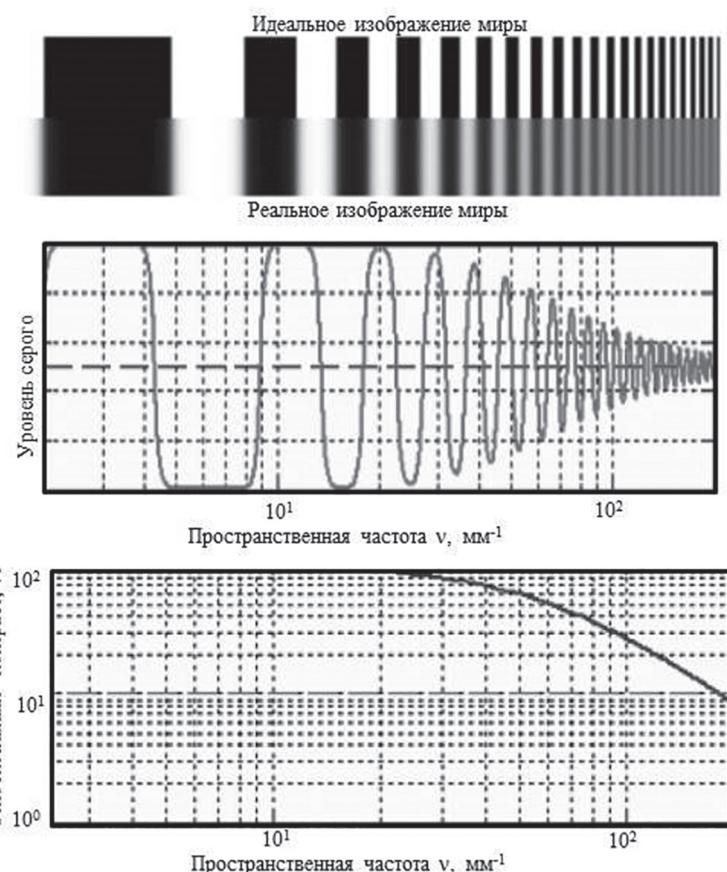


Рис. 2. Идеальное и реальные изображения миры, а также функция передачи модуляции изображения объекта и его контрастно-частотная характеристика

где gv_i и \bar{gv} — i -е и среднее значения уровня серого в выборке.

На рисунке 3 изображены два сечения томограмм специально изготовленного цилиндрического образца с разным уровнем шума.

Влияние каждого из проанализированных параметров качества томографических изображений (пространственного разрешения и контрастной чувствительности) на выявляемость несплошностей следует оценивать в совокупности. Даже если выполнены условия для пространственного разрешения дефекта, но контраст его изображения невелик, он может быть неразличим в шумовых колебаниях фона.

На основании вычисленных значений ФПМ (MTF) и функции распознавания контраста (CDF) строят так называемую диаграмму контрастной детализации CDD (Contrast-Detail Diagram), учитывающую влияние и нерезкости, и шума на возможность обнаружения дефекта определенного размера и морфологии. Данная зависимость — показатель качества томографических данных, может применяться для оценки чувствительности контроля методом РКТ (рис. 4). Несплошности, размер и относительный контраст которых попадают в область, лежащую правее графика контрастной детализации CDD, могут быть обнаружены на томограмме.

Чувствительность томографического контроля определяется не только величинами MTF и CDF. Для выявляемости дефектов по результатам РКТ реального объекта решающие значение имеют артефакты, практически всегда присутствующие на томограмме.

Артефакты в рентгеновской компьютерной томографии

Артефактами в компьютерной томографии называют любое несоответствие между значениями коэффициента ослабления реконструированного объема и истинными коэффициентами ослабления объекта [14, 15].



Рис. 4. Зависимости контрастных детализации и разрешения, построенные в осях относительный контраст — диаметр несплошности в вокселях

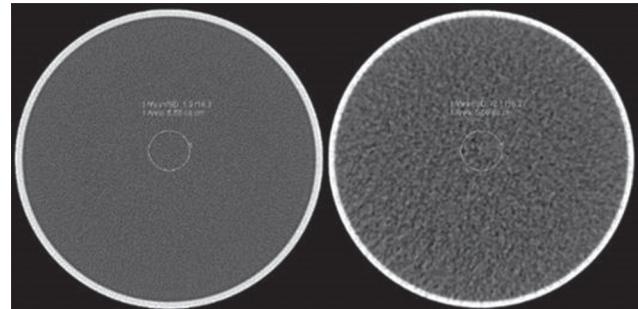


Рис. 3. Сечения томограмм цилиндрического образца с разным уровнем шума

Ошибки реконструкции могут быть вызваны как недостатком данных, так и наличием различных шумов, не позволяющих при помощи существующего математического аппарата корректно решить обратную задачу по восстановлению величины коэффициента ослабления рентгеновского излучения ОК. Артефакты проявляются в виде полос (ошибка в отдельном измерении), затемнений (постепенное изменение отклика группы пикселей детектора), колец (ошибки калибровки отдельного пикселя детектора), искажений (спиральная реконструкция). Основные причины появления артефактов:

- физические процессы, связанные со взаимодействием рентгеновского излучения с веществом;
- неисправность оборудования;
- не оптимальные геометрия или параметры сканирования.
- несовершенство математического аппарата, применяемого для реконструкции.

Влияние энергии излучения.

Фотоны, генерируемые рентгеновской трубкой, имеют широкий энергетический спектр. Когда рентгеновское излучение проходит сквозь плотный материал, электроны с меньшей энергией поглощаются интенсивнее фотонов с более высокими уровнями энергии (рис. 5) [11]. В целом, для широкого энергетического спектра коэффициент ослабления излучения неоднороден, но по мере прохождении излучения сквозь материал он становится более однородным по своему спектральному составу, и относительная доля фотонов с высокой энергией в нем выше первичного [16]. Алгоритмы реконструкции не учитывают изменение спектрального состава излучения при прохождении через объект. Это несоответствие между допущением и реальностью ведет к ошибкам при восстановлении коэффициента ослабления материала.

Типичные проявления подобного артефакта изображены на рис. 6, где на реконструированном изображении прутка из никелевого сплава диаметром 7,0 мм контур объекта ярче, чем центральная часть (режим просвечивания — 220 кВ, 240 мкА). Существуют методы устранения артефактов, вызванных изменением энергетического состава спектра излучения по мере его прохождения сквозь объект. Их делят на методы

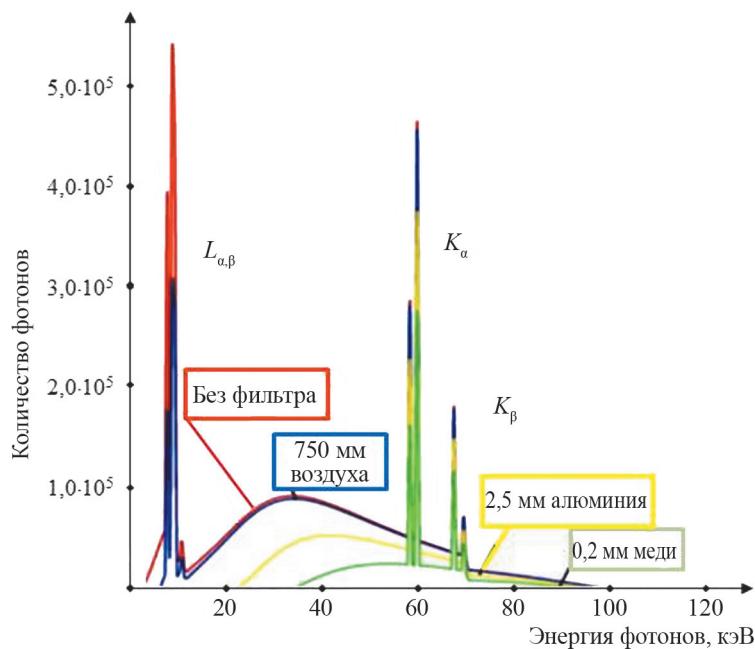


Рис. 5. Изменение спектра рентгеновского излучения при прохождении объектов различного материала и толщины [11]

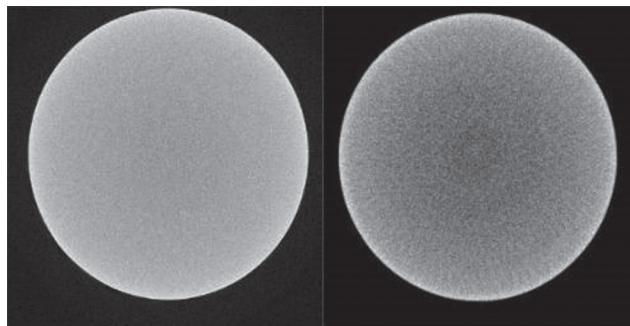


Рис. 6. Проявление артефакта при изменении энергетического состава излучения на томограмме:

справа — сечение образца, полученное без фильтра; слева — тот же объект, просвещенный с применением медного фильтра толщиной 1 мм

предварительной фильтрации, методы постобработки и метод дуальных энергий.

Метод предварительной фильтрации. Фильтр — тонкая пластина из однородного материала, помещаемая между источником рентгеновского излучения и исследуемым объектом и позволяющая осуществить предварительную фильтрацию пучка с целью поглощения фотонов с низкой энергией. Этот метод фильтрации прост и эффективен для применения на практике, но, в то же время, снижает отношение сигнал/шум, уменьшая общее количество фотонов и, следовательно, дозу. Разработаны и методы численной коррекции эффекта гомогенизации пучка. Под гомогенизацией пучка понимается повышение его однородности по энергетическому составу спектра. По мере прохождения излучения фотоны с малой энергией поглощаются в верхних слоях материала. Остаются фотоны с более

высокой проникающей способностью, т. е. с более высокой энергией.

Методы постобработки применяют на этапе реконструкции данных, полученных в результате сканирования. Для минимизации артефакта, вызванного изменением энергетического состава спектра излучения при прохождении объекта контроля, используют полиномиальную аппроксимацию второго и третьего порядков [14, 16], а также итерационные методы.

На томограмме артефакты, вызванные изменением энергетического состава спектра излучения, проявляются в виде полос (рис. 7) и некорректной яркости вокселей на границе с воздухом. Артефакты в виде полос частично корректируются на этапе реконструкции, если в программном обеспечении используется метод линеаризации на основе физической модели [17].

Кольцевые артефакты.

Если один или несколько пикселей детектора не откалиброваны, сигнал от них содержит ошибочные показания в каждом угловом положении объекта контроля, следовательно, на томограмме возникает круговой артефакт. Томографические изображения, реконструированные по проекционным данным, полученным на плоскопанельные детекторы, подвержены кольцевым артефактам, поскольку все пиксели детектора являются отдельными элементами матрицы [17]. Наличие кольцевых артефактов сильно зашумляет данные (рис. 8).

При неполноценной калибровке пикселей можно минимизировать наличие кольцевых артефактов на томограмме как в процессе реконструкции, так и применяя фильтрацию к уже реконструированному объему.

Артефакт подвыборки.

Количество проекций, использованных для реконструкции, — один из определяющих факторов качества данных [18]. Можно довольно точно воспроизвести

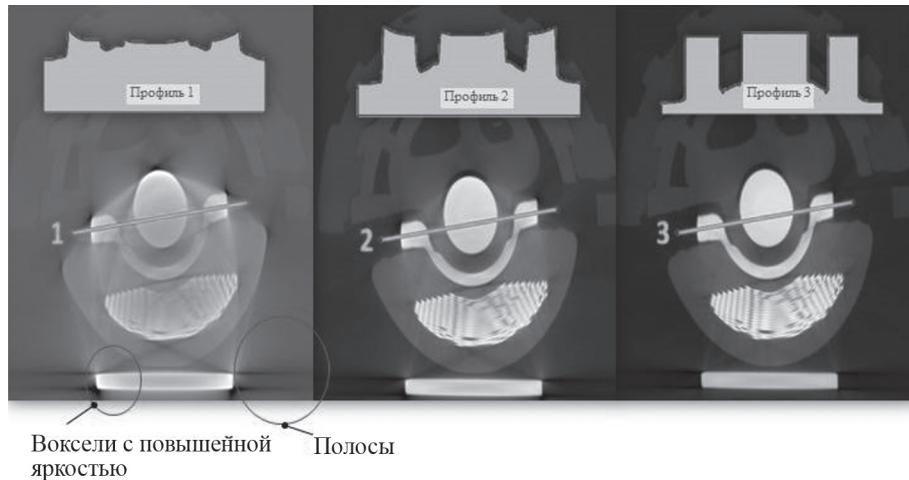


Рис. 7. Проявление артефакта в виде полос и повышенной яркости voxelей на границе с воздухом [7]

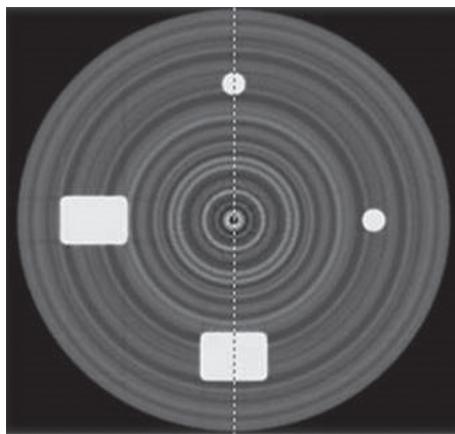


Рис. 8. Кольцевые артефакты

изображение объекта, если увеличить число проекций. Их количество существенно влияет на точность восстанавливаемого изображения: чем меньше количество проекций, тем ниже точность восстанавливаемого изображения. Однако, при проведении реальной томографии число проекций ограничено, т. к. при увеличении числа проекций производительность контроля снижается.

Минимальная потеря информации при заполнении пространства Фурье в процессе реконструкции томограммы возможна, если количество проекций N_{\min} удовлетворяет условию $N_{\min} \geq \pi D/2$, где D — максимальная ширина проекции ОК на детектор, измеренная в пикселях. Уменьшение количества проекций (недостаточная выборка) ведет к недостаточной регистрации информации, относящейся к острым краям и мелким деталям. Это дает эффект, известный как наложение (Aliasing). Артефакт проявляется в виде тонких полос, отходящих от края плотной структуры и параллельных ее краям (рис. 9).

Артефакт конической геометрии.

Схема сканирования коническим пучком с регистрацией на матричный детектор лучше всего подходит для промышленной РКТ ввиду высокой производи-

тельности [19]. Если пучок излучения имеет форму конуса, то на матричный детектор без искажения проецируется только центральное сечение, все остальные сечения претерпевают размытость, тем большую, чем дальше они расположены от центрального сечения (рис. 10).

Чтобы избежать присутствия этого артефакта, используют спиральную схему сканирования. Минимизировать проявление артефакта конической геометрии можно, снижая габариты проекции объекта контроля на детектор в высотном направлении при помощи оснастки. Чем больше фокусное расстояние, тем ближе конусный пучок к параллельному, поэтому для каждого объекта величина фокусного расстояния не должна быть меньше некоторого минимального значения.

Искажения, вносимые артефактами, можно снизить или минимизировать, но полностью исключить их невозможно.

Информативность или качество результатов РКТ определяется по величинам пространственного и контрастного разрешений, с учетом их снижения при возникновении ошибок измерений или артефактов [20]. Для достижения максимальной информативности результатов РКТ необходим комплексный подход, учитывающий все факторы, влияющие на результаты РКТ (рис. 11).

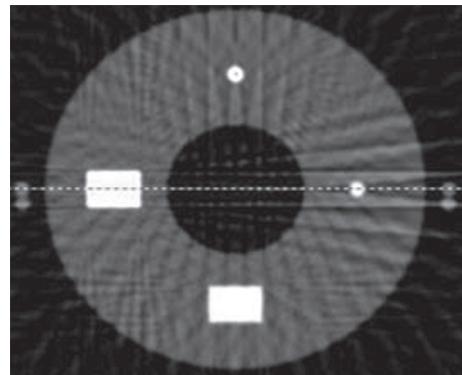


Рис. 9. Артефакт, вызванный недостаточным количеством проекций

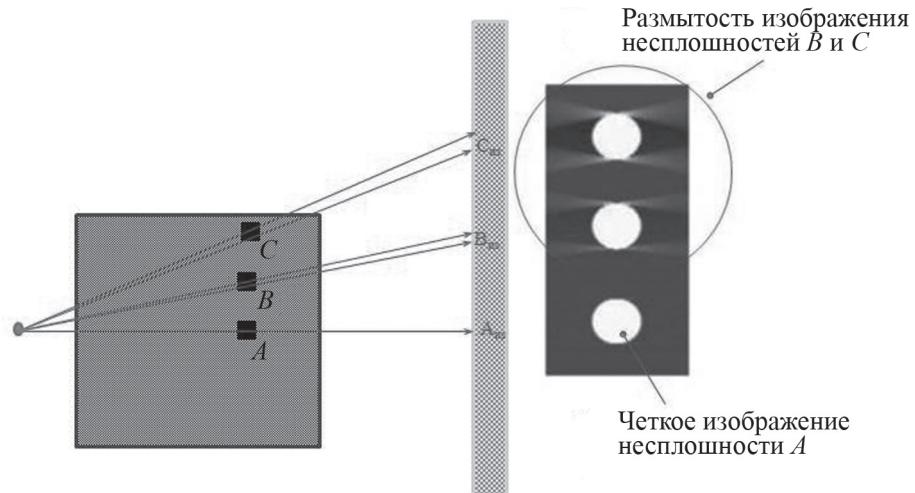


Рис. 10. Артефакт, вызванный конической формой пучка излучения



Рис. 11. Факторы, влияющие на информативность результатов РКТ

Заключение

Рентгеновская компьютерная томография — сложная система, и факторы, влияющие на точность или информативность ее результатов, можно разделить на пять групп:

- применяемое оборудование;
- внешние условия среды;
- обработка данных;
- особенности исследуемого объекта;
- технология или методика проведения РКТ (см. рис. 11).

Разработка оптимальной технологии, гарантирующей качество результатов контроля, основывается на изучении и исследовании влияния на информативность результатов РКТ параметров и геометрии сканирования, параметров реконструкции, способов обработки полученных данных.

Информативность результатов контроля методом РКТ может быть оценена по показателям величины шума (среднее значение и стандартное отклонение уровней серого на томограмме ОК) и пространственного разрешения (значение пространственной частоты, передаваемой с различимым на фоне шума контрастом).

Литература

1. **Каблов Е.Н.** Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник РАН. 2020. Т. 90. № 4. С. 331—334.
2. **Каблов Е.Н.** ВИАМ: Материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7—8. С. 54—58.
3. **Каблов Е.Н.** Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Сб. тезисов XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
4. **Чертищев В.Ю., Оспенникова О.Г., Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С.** Определение размера и глубины залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ по величине механического импеданса // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 3. С. 72—94.
5. **Чертищев В.Ю.** Оценка вероятности обнаружения дефектов акустическими методами в зависимости от их размера в конструкциях из ПКМ для выходных данных контроля в виде бинарных величин // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3. С. 65—79.
6. **Косарина Е.И., Крупнина О.А., Демидов А.А., Михайлова Н.А.** Цифровое оптическое изображение и его зависимость от радиационного изображения при неразрушающем контроле методом цифровой рентгенографии // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1. С. 37—42.
7. **Villarraga-Gómez H.** Studies of Dimensional Metrology with X-ray CAT Scan. University of North Carolina at Charlotte, 2018.
8. **Петровская В.В. и др.** Возможности компьютерной томографии в определении структуры эндодонтического материала и качества лечения зубов (в эксперименте) // Сб. докл. V Всерос. науч.-практич. конф. производителей рентгеновской техники. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. С. 44—47.
9. **Демидов А.А., Крупнина О.А., Михайлова Н.А., Косарина Е.И.** Исследование образцов из полимерных композиционных материалов методом рентгеновской компьютерной томографии и обработка томограмм с изображением объемной доли пористости // Труды ВИАМ. 2021. № 5. С. 105—113.
10. **РД ЭО 1.1.2.25.0487—2015.** Разработка технического задания, проведение испытаний и условия применения средств и методик неразрушающего контроля на атомных станциях.
11. **Buzug T.M.** Computed Tomography: from Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT. N.-Y.: Springer Sci. & Business Media, 2008.
12. **ASTM E1441.** Standard Guide for Computed Tomography (CT).
13. **ASTM E 1695.** Standard Test Method for Measurement of Computed Tomography (CT) System Performance.

References

1. **Kablov E.N.** Materialy Novogo Pokoleniya i Tsifrovye Tekhnologii ikh Pererabotki. Vestnik RAN. 2020; 90:4:331—334. (in Russian).
2. **Kablov E.N.** VIAM: Materialy Novogo Pokoleniya dlya PD-14. Kryl'ya Rodiny. 2019;7—8:54—58. (in Russian).
3. **Kablov E.N.** Rol' Fundamental'nykh Issledovaniy pri Sozdaniy Materialov Novogo Pokoleniya. Sb. Tezisov XXI Mendelevskogo S'ezda po Obshchey i Prikladnoy Khimii. SPb., 2019;4:24. (in Russian).
4. **Chertishchev V.Yu., Ospennikova O.G., Boychuk A.S., Dikov I.A., Generalov A.S.** Opredelenie Razmera i Glubiny Zaleganiya Defektov v Mnogosloynikh Sotovykh Konstruktsiyakh iz PKM po Velichine Mekhanicheskogo Impedansa. Aviatsionnye Materialy i Tekhnologii. 2020;3:72—94. (in Russian).
5. **Chertishchev V.Yu.** Otsenka Veroyatnosti Obnuzheniya Defektov Akusticheskimi Metodami v Zavisimosti ot Ikh Razmera v Konstruktsiyakh iz PKM dlya Vykhodnykh Danniyh Kontrolja v Vide Binarnykh Velichin. Aviatsionnye Materialy i Tekhnologii. 2018;3:65—79. (in Russian).
6. **Kosarina E.I., Krupnina O.A., Demidov A.A., Mikhaylova N.A.** Tsifrovoe Opticheskoe Izobrazhenie i Ego Zavisimost' ot Radiatsionnogo Izobrazheniya pri Nerazrushayushchem Kontrole Metodom Tsifrovoy Rentgenografii. Aviatsionnye Materialy i Tekhnologii. 2019; 1:37—42. (in Russian).
7. **Villarraga-Gómez H.** Studies of Dimensional Metrology with X-ray CAT Scan. University of North Carolina at Charlotte, 2018.
8. **Petrovskaya V.V. i dr.** Vozmozhnosti Komp'yuternoy Tomografii v Opredelenii Struktury Endodonticheskogo Materiala i Kachestva Lecheniya Zubov (v Eksperimente). Sb. Dokl. V Vseros. Nauch.-praktich. Konf. Proizvoditeley Rentgenovskoy Tekhniki. SPb.: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2018:44—47. (in Russian).
9. **Demidov A.A., Krupnina O.A., Mikhaylova N.A., Kosarina E.I.** Issledovanie Obraztsov iz Polimernykh Kompozitsionnykh Materialov Metodom Rentgenovskoy Komp'yuternoy Tomografii i Obrabotka Tomogramm s Izobrazheniem Ob'emnoy Doli Poristosti. Trudy VIAM. 2021;5:105—113. (in Russian).
10. **RD EO 1.1.2.25.0487—2015.** Razrabortka Tekhnicheskogo Zadaniya, Provedenie Ispytaniy i Usloviya Primeniya Sredstv i Metodik Nerazrushayushchego Kontrolja na Atomnykh Stantsiyakh. (in Russian).
11. **Buzug T.M.** Computed Tomography: from Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT. N.-Y.: Springer Sci. & Business Media, 2008.
12. **ASTM E1441.** Standard Guide for Computed Tomography (CT).
13. **ASTM E 1695.** Standard Test Method for Measurement of Computed Tomography (CT) System Performance.

14. Ингачева А.С., Шешкус А.В., Чернов Т.С., Лимонова Е.Е., Арлазаров В.В. Рентгеновский компьютерный томограф — новый инструмент в распознавании // Труды ИСА РАН. 2018. Спецвыпуск. С. 90—99.
15. Krumm M., Kasperl K., Franz M. Reducing Non-linear Artifacts of Multi-material Objects in Industrial 3D Computed Tomography // NDT & E International. 2008. V. 41. No. 4. Pp. 242—251.
16. Van de Castele E., Van Dyck D., Sijbers J., Raman E. A Model-Based Correction Method for Beam Hardening Artefacts in X-ray Microtomography // J. X-ray Sci. Technol. 2003. No. 2(1). Pp. 53—58.
17. Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Петягин Г.И., Спектор А.А. Цифровая обработка изображений в информационных системах. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002.
18. Петровская В.В. и др. Возможности компьютерной томографии в определении структуры эндодонтического материала и качества лечения зубов (в эксперименте) // Сб. докл. V Всерос. науч.-практич. конф. производителей рентгеновской техники. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. С. 44—47.
19. Трофимов О.Е., Лихачев А.В. Сравнение некоторых алгоритмов томографической реконструкции в конусе лучей // Сибирский журнал индустриальной математики. 2008. Т. 11. № 3. С. 126—134.
20. Villarraga-Gómez H., Lee C., Smith S.T. Dimensional Metrology with X-ray CT: a Comparison with CMM Measurements on Internal Features and Compliant Structures // Precision Eng. 2018. V. 51. Pp. 291—307.
14. Ingacheva A.S., Sheshkus A.V., Chernov T.S., Limonova E.E., Arlazarov V.V. Rentgenovskiy Kom-p'yuternyy Tomograf — Novyy Instrument v Raspoznavanii. Trudy ISA RAN. 2018. Spetsvypusk:90—99. (in Russian).
15. Krumm M., Kasperl K., Franz M. Reducing Non-linear Artifacts of Multi-material Objects in Industrial 3D Computed Tomography. NDT & E International. 2008;41;4:242—251.
16. Van de Castele E., Van Dyck D., Sijbers J., Raman E. A Model-Based Correction Method for Beam Hardening Artefacts in X-ray Microtomography. J. X-ray Sci. Technol. 2003;2(1):53—58.
17. Gruzman I.S., Kirichuk V.S., Kosykh V.P., Peretyagin G.I., Spektor A.A. TSifrovaya Obrabotka Izobrazheniy v Informatsionnykh Sistemakh. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2002. (in Russian).
18. Petrovskaya V.V. i dr. Vozmozhnosti Kom-p'yuternoy Tomografii v Opredelenii Strukturny Endodonticheskogo Materiala i Kachestva Lecheniya Zubov (v Eksperimente). Sb. Dokl. V Vseros. Nauch.-praktich. Konf. Proizvoditeley Rentgenovskoy Tekhniki. SPb.: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2018:44—47. (in Russian).
19. Trofimov O.E., Likhachev A.V. Sravnenie Nekotorykh Algoritmov Tomograficheskoy Rekonstruksii v Konuse Luchey. Sibirski Zhurnal Industrial'noy Matematiki. 2008;11;3:126—134. (in Russian).
20. Villarraga-Gómez H., Lee C., Smith S.T. Dimensional Metrology with X-ray CT: a Comparison with CMM Measurements on Internal Features and Compliant Structures. Precision Eng. 2018;51:291—307.

Сведения об авторах:

Крупнина Ольга Александровна — старший научный сотрудник сектора рентгеновских методов контроля лаборатории неразрушающих методов контроля, НИЦ «Курчатовский институт» — Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, e-mail: Fess.m.d@gmail.com

Косарина Екатерина Ивановна — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории неразрушающих методов контроля, НИЦ «Курчатовский институт» — Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, e-mail: ekaterina-kosar@mail.ru

Михайлова Наталья Александровна — кандидат технических наук, ведущий инженер сектора рентгеновских методов контроля лаборатории неразрушающих методов контроля, НИЦ «Курчатовский институт» — Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, e-mail: natsavv@inbox.ru

Демидов Александр Александрович — начальник сектора рентгеновских методов контроля лаборатории неразрушающих методов контроля, НИЦ «Курчатовский институт» — Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, e-mail: lagazz@yandex.ru

Information about authors:

Krupnina Olga A. — Senior Researcher of the Sector of X-ray Control Methods of the Non-destructive Testing Methods Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» — All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, e-mail: Fess.m.d@gmail.com

Kosarina Ekaterina I. — Dr.Sci. (Techn.), Professor, Chief Researcher of the Non-destructive Testing Methods Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» — All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, e-mail: ekaterina-kosar@mail.ru

Mikhailova Natalya A. — Ph.D. (Techn.), Leading Engineer of the Sector of X-ray Control Methods of the Non-destructive Testing Methods Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» — All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, e-mail: natsavv@inbox.ru

Demidov Aleksandr A. — Head of the Sector of X-ray Control Methods of the Non-destructive Testing Methods Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» — All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, e-mail: lagazz@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 25.04.2022
The article received to the editor: 25.04.2022

Статья принята к публикации: 24.10.2022
The article has been accepted for publication: 24.10.2022