

УДК 006.053

*В.И. Сырямкин, А.Ж. Казтаев, Д.С. Жданов, В.В. Бразовский,  
Г.С. Глушков, С.И. Бурмантов, С.О. Лунев, В.А. Бородин*

### **Метрологическое обеспечение цифровых рентгеновских микротомографов\***

*V.I. Syryamkin, A.Zh. Kaztaev, D.S. Zhdanov, V.V. Brazovsky,  
G.S. Glushkov, S.I. Burmantov, S.O. Lunev, V.A. Borodin*

### **Metrological Support for X-ray Computed Microtomography Systems**

Рассмотрены основные принципы работы разрабатываемого рентгеновского дефектоскопа (применимые к рентгеновскому томографу), проведен анализ современного состояния нормативной и законодательной базы метрологического обеспечения рентгеновского микротомографа.

**Ключевые слова:** метрологическое обеспечение, методы поверки, рентгеновский микротомограф, средства неразрушающего контроля, стандартизация.

**Введение.** Неразрушающий контроль и рентгеновская микротомография, в частности, применяются в тех областях, где метрологическое обеспечение является законодательно обязательным, имеет большое значение обеспечение единства и достоверности измерений с применением средств неразрушающего контроля, позволяющих получить при проведении контроля количественную информацию о параметрах или характеристиках объекта, прямо или косвенно влияющих на качество контроля. При этом технические средства, применяемые рентгеновские микротомографии позволяют оператору определиться с выбором того или иного своего решения (выявление дефекта, его развитие, выбор метода устранения дефекта и т.д.) при проведении контроля и диагностики.

Наиболее важное требование к техническим средствам неразрушающего контроля – предоставление дефектоскописту объективной, достоверной и точной информации об интересующих параметрах или характеристиках диагностируемого объекта. Получение недостоверных сведений может привести к порче оборудования, авариям и катастрофам в технических системах.

**Принцип получения изображения в рентгеновском микротомографе.** При прохождении через контролируемое изделие ионизирующего излучения оно поглощается и рассеивается. Степень ослабления зависит от толщины  $\delta$  и плотности  $\rho$  контролируемого объекта, а также интенсивности  $M$

This article describes the basic principles of the developed X-ray computed tomography system and the current state of normative and legislative base of metrological support for X-ray computed microtomography system.

**Key words:** metrological support, verification methods, X-ray computed micro tomography system, standardization.

и энергии  $E$  излучения. При наличии в изделии внутренних дефектов размером  $\Delta\delta$  изменяются интенсивность и энергия пучка излучения. Рисунок 1 иллюстрирует общие принципы получения изображения в рентгеновских методах неразрушающего контроля и рентгеновской микротомографии.

Из рисунка 1 видно, что засветка детектора (более темный участок) происходит больше в том месте, куда попало больше квантов ионизирующего излучения (в месте дефекта изделия 2), так можно определить размеры и локализацию дефекта в рентгеновской микротомографии [1].

Физические характеристики дефекта определяются тем, что при прохождении через вещество интенсивность рентгеновского излучения уменьшается по общему закону, характерному для электромагнитных волн (закон Ламберта-Бугера):

$$I = I_0 \exp(-\mu x), \quad (1)$$

где  $I$  и  $I_0$  – конечная и начальная интенсивности излучения соответственно;  $\mu$  – полный линейный коэффициент ослабления;  $x$  – толщина слоя вещества.

Причем коэффициент  $\mu$  зависит от длины волны и плотности поглощающего материала.

Основываясь на зафиксированной прибором томограмме, известных зависимостях  $\mu = f(\lambda, \rho)$  материала, размерах и других параметрах изделия, а также с учетом уравнения 1, удается получить максимальную информацию о дефекте.

\* Работа выполнена по госконтракту «Разработка и организация опытного производства рентгеновского микротомографа для исследования органических и неорганических объектов» (проект №6.523.11.3009) Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 гг».

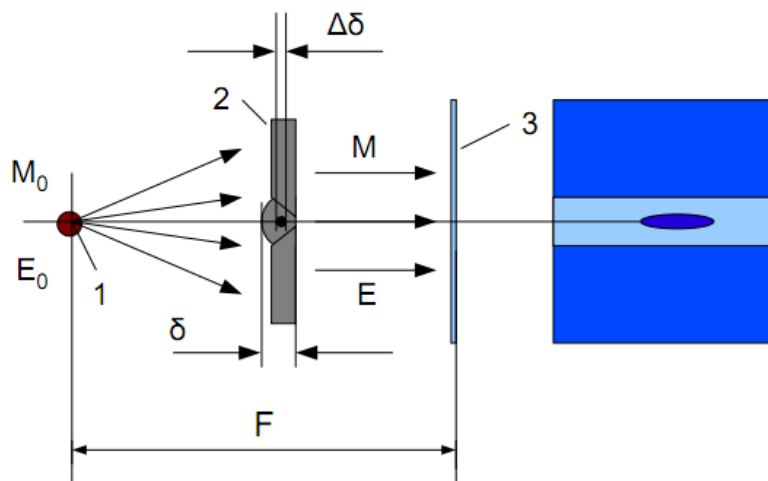


Рис. 1. Схема просвечивания и получения изображения в рентгеновской микротомографии:  
1 – источник; 2 – изделие; 3 – детектор

**Источники возникновения погрешностей рентгеновской микротомографии.** Суммарная погрешность рентгеновской микротомографии складывается из параметров рентгеновской трубки (размера фокусного пятна) и разрешающей способности детектора (для томографа добавляется еще и погрешность системы позиционирования объекта). Поэтому суммарную погрешность дефектоскопов и томографов иногда называют степенью геометрической нерезкости [2]. Для расчета геометрической нерезкости рентгеновской микротомографии нужно знать:  $d$  – размер источника излучения;  $\delta^*$  – расстояние от элемента объекта контроля до детектора;  $F_0$  – расстояние от источника излучения до объекта контроля;  $F$  – фокусное расстояние (рис. 2).

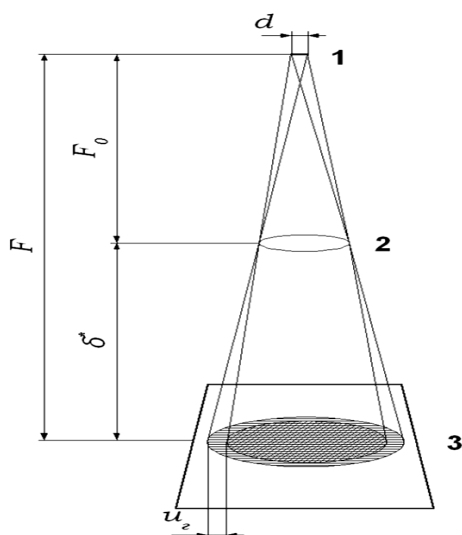


Рис. 2. Схема формирования геометрической нерезкости от фокусного расстояния: 1 – источник излучения; 2 – элемент объекта контроля; 3 – матрица детектора

Если детектор помещать в непосредственной близости от объекта контроля, то  $\delta^*$  можно считать равной толщине объекта  $\delta$ . Тогда условие соразмер-

ности геометрической и внутренней нерезкости определяют из неравенств:  $u_z \leq u_g$  – при просвечивании тонкостенных изделий;  $u_z \leq u_p$  – при просвечивании изделий большой толщины, когда рассеянное излучение существенным образом ухудшает выявляемость дефектов.

Для уменьшения геометрической нерезкости следует применять источники излучения с малым фокусным пятном, что конструктивно и достигается рентгеновской микротомографией.

Фокусное расстояние  $F$  следует выбирать таким образом, чтобы геометрическая нерезкость  $u_z$  была соизмерима со значением внутренней нерезкости  $u_g$  ( $u_g \approx u_z$ ).

Для определения фокусного расстояния в рентгеновской микротомографии используют соотношение 2:

$$F = \delta^* \left( \frac{d}{u_g} + 1 \right). \quad (2)$$

Увеличение фокусного расстояния  $F$  позволяет уменьшить нерезкость, но при этом снижается интенсивность излучения и увеличивается время экспозиции, поэтому в рентгеновской микротомографии этим параметрам уделяется основное внимание. Они же являются и главными источниками возникновения погрешности метода.

**Нормативная и законодательная база для метрологического обеспечения рентгеновской микротомографии.** Развитие и повышение уровня надежности средств неразрушающего контроля и рентгеновской микротомографии, в частности, невозможны без создания высокоразвитой нормативно-технической базы, которая должна быть взаимосвязана и с законодательной, и с правовой базой методов неразрушающего контроля [3].

Анализ зарубежного (страны ЕС) опыта в области неразрушающего контроля показывает, что нормативное обеспечение этой сферы деятельности охватывает полный «жизненный цикл» средства

неразрушающего контроля – стадию разработки, производства, размещения на рынке, обслуживания в процессе эксплуатации изделия – и гарантирует соблюдение всех требуемых характеристик, обуславливающих функциональное назначение изделия [4].

К сожалению, на сегодняшний день нормативно-техническая база метрологического обеспечения в России в области неразрушающего контроля и рентгеновской томографии недостаточно полна и рассредоточена по отдельным областям промышленности в виде инструкций, предписаний и других регламентирующих документов.

Так, методики поверки средств неразрушающего контроля на уровне ГОСТов имеются только на ультразвуковые дефектоскопы (ГОСТ 23667-85), ультразвуковые толщиномеры (ГОСТ 8.495-83), электромагнитные дефектоскопы (ГОСТ 8.273-78), радиационные толщиномеры (ГОСТ 8.112-74), структуроскопы (ГОСТ 8.518-84), рентгенорадиометрические дефектоскопы (ГОСТ 8.452-82).

В последнее время в неразрушающем контроле все больше находят применение такие приборы, как феррозондовые, акусто-эмиссионные, приборы для оптических методов контроля и т.д., на которые не существовало и не существует ГОСТ-ированных методик проверки ни в СССР, ни в Российской Федерации [3].

Существуют ГОСТы и на рентгеновские томографические методы и средства неразрушающего контроля (ГОСТ 29025-91, ГОСТ 25113-86 и др.), однако они не распространяются на дефектоскопы с устройствами цифровой обработки изображения.

Из сказанного можно сделать вывод о необходимости разработки и представления в Госстандарт проекта нормативно-технического документа для рентгеновской микротомографии.

**Методики контроля ПО для цифровой обработки изображений рентгеновской микротомографии.** В настоящее время для использования в рентгеновской микротомографии можно рекомендовать следующие методики контроля программного обеспечения, используемого для визуализации и обработки результатов измерений – метрики Холстеда и Тейнера [5].

*Метрика Холстеда* характеризуется следующими параметрами:  $\eta_1$  – число уникальных, различных операторов программы, включая символы-разделители, знаки операций, имена процедур и функций (словарь операций);  $\eta_2$  – число уникальных, различных операндов программы (словарь операндов);  $\eta = \eta_1 + \eta_2$  – словарь модуля;  $N_1$  – общее количество операторов в программе;  $N_2$  – общее количество операторов в программе.

Метрика использует следующие параметры: информационная длина программ модуля:  $N = \eta_1 \log_2 \eta_1 + \eta_2 \log_2 \eta_2$ , информационный объем модуля:  $V = N \log_2 \eta$ , уровень записи модуля:  $L = \frac{2\eta_2}{\eta_1 \cdot N_2}$ ,

где  $L$  – уровень концентрированности вычислений; сложность модуля по Холстеду:

$$E = V/L; E = \frac{N \log_2 \eta \cdot \eta_1 \cdot N_2}{2\eta_2}.$$

*Метрика Тейнера* включает в себя показатель логической сложности, состоящий из  $N$  – общего количества операторов;  $L_{bool}$  – общего количества логических операторов;  $L_{loop}$  – показателя сложности циклов, рассчитываемого по уравнению

$$L_{loop} = \sum_{i=1}^Q m_i \omega_i, \text{ где } Q \text{ – наивысший уровень вложенности цикла в модуле; } m_i \text{ – количество циклов в модуле, имеющих } i\text{-й уровень вложенности; } \omega_i \text{ –}$$

$$\text{весовой множитель } \omega_i = 4^{i-1} \left( \frac{3}{4^Q - 1} \right); \sum_{i=1}^Q \omega_i = 1,$$

$L_{if}$  – показатель сложности условных операторов

$$L_{if} = \sum_{i=1}^Q n_i \omega_i; n_i \text{ – количество условных операторов}$$

$i$ -го уровня вложенности;  $L_{BR}$  – количество ветвлений в условных операторах (обычно это 0,001).

Общий показатель логической сложности в метрике Тейнера  $L_{mom} = L_{bool} / N + L_{loop} + L_{if} + L_{BR}$ .

Показатель сложности взаимосвязи:  $C_{INF} = AP + 0,5 * SYS$ , где  $AP$  – количество связей с прикладными программами;  $SYS$  – количество связей с системными программами или утилитами.

$A$  – показатель сложности вычисления:

$$CC = \frac{L_{RECH}}{N} \cdot \frac{L_{SYS}}{\sum_{\text{по модулям}} L_{RECH}}, \text{ где } L_{RECH} \text{ – количество}$$

операторов вычислительного характера в конкретном модуле;  $N$  – общее количество операторов этого модуля;  $L_{SYS}$  – суммарная логическая сложность всех модулей;  $\sum_{\text{по модулям}} L_{RECH}$  – сумма вычислительных операторов по всем модулям.

Метрика также характеризуется показателями:

$$\text{– сложности ввода-вывода: } C_{IO} = \frac{S_{IO}}{N} \cdot \frac{L_{SYS}}{\sum S_{IO}},$$

где  $S_{IO}$  – количество операторов ввода-вывода в конкретном модуле;

$$\text{– удобочитаемости: } U_{READ} = \frac{COM}{N}, \text{ где } COM \text{ –}$$

количество строк комментариев;  $N$  – общее количество строк;

– и, наконец, общим показателем метрики  $C_{GLOB} = L_{mom} + 0,1C_{INF} + 0,2CC + 0,4C_{IO} - 0,1U_{READ}$ .

Приведенная метрика имеет коэффициент корреляции с метрикой Холстеда в интервале от 0,6 до 0,9.

**Заключение.** В работе были описаны принцип получения изображения, источники возникновения ошибок метода, рассмотрены методики контроля, рентгеновской микротомографии, а также проведен анализ современного состояния нормативной и за-

конодательной базы метрологического обеспечения рентгеновского микротомографа.

Установлено, что методики поверки в виде нормативных документов существуют только для некоторых видов неразрушающего контроля, за исключением рентгеновской микротомографии, в которых используются устройства цифровой обработки изображения.

Многие из имеющихся метрологических ГОСТов не соответствуют уровню используемого

оборудования в рентгеновской микротомографии, так как в настоящее время рынок насыщен импортными автоматизированными приборами ведущих фирм, а имеющиеся методики поверки не способны в полной мере осуществить контроль всех характеристик приборов неразрушающего контроля.

Полностью отсутствуют и требуют разработки нормативно-технические документы на методики поверки рентгеновской микротомографии.

### Библиографический список

1. Промышленная радиационная интроскопия / В.В. Клюев, Б.И. Леонов, Е.А. Гусев и др. – М., 1985.
2. Поверка и калибровка средств измерений ионизирующего излучения: учеб. пособие / В.К. Кулешов, Ю.И. Сертаков. – Томск, 2009.
3. Клюев С.В., Коновалов Н.Н., Копытов С.Г., Соловьева М.О. Аттестация персонала в области неразрушающего контроля. – М., 2011.
4. ГОСТ Р 1.2-92. Порядок разработки государственных стандартов.
5. Томография плазмы. Т. 13: Низкотемпературная плазма / В.В. Пикалов, Т.С. Мельникова. – Новосибирск, 1995.