

УДК 620.179.15

Ю. В. Обидин, А. К. Поташников, И. В. Тяжев

(Новосибирск)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ СВАРНОГО ШВА ПО ТОМОГРАММАМ

Излагаются результаты исследований, выполненных на высокопроизводительной рентгеновской томографической станции автоматического контроля сварных соединений. Предложен и программно реализован алгоритм автоматического измерения дефектов типа пор. Рассмотрена линейная модель процесса регистрации проекционных данных, теоретически обоснована и экспериментально подтверждена точность реализованного алгоритма в задачах измерения размеров пор при контроле тепловыделяющих элементов. Погрешность определения размеров составила менее 15 % при производительности контроля 1 изд./мин.

Рентгеновская томография, которая широко используется в медицинской диагностике, в настоящее время находит все большее применение при дефектоскопии промышленных изделий [1–3]. Предоставляемая томографией возможность исследования тонкой внутренней структуры изделий повышает достоверность контроля, что особенно важно для ядерных энергетических установок. В литературе [4–8] уделяется значительное внимание вопросам исследования точности и чувствительности томографического метода применительно к контролю тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), аттестации и поверке томографов, а также вопросам увеличения производительности оборудования и степени его автоматизации.

Одна из актуальных задач томографии – обнаружение и измерение мелких дефектов в сварных швах. Эта задача исследовалась авторами на высокопроизводительной рентгеновской станции томографического контроля ТВЭЛов [9, 10] применительно к обнаружению и измерению пор размером до 300 мкм. Полный цикл обработки одного изделия (ТВЭЛа с циркониевой оболочкой), включая время загрузки, регистрации проекционных данных, обнаружения дефектов и разбраковки, составлял 1 мин. Напряжение на трубке рентгеновского аппарата в режиме съемки равнялось 160 кВ, ток составлял 3 мА. Расстояние от фокуса трубки (размер фокуса 0,3 мм) до детектора в станции 0,3 м. Выявление дефектов и определение их размеров производилось по панорамным изображениям сварного шва. Для реконструкции панорамных изображений использовались алгоритмы, описанные в [11].

Рассмотрим процесс обнаружения и измерения дефектов по томограммам. Известно [12], что реконструируемое томографом распределение линейного коэффициента ослабления (ЛКО) дефекта $\mu_d(x, y, z)$ является

сверткой исходного распределения $\mu_d(x, y, z)$ с функцией рассеяния точки (ФРТ) $h(x, y, z)$:

$$\hat{\mu}_d(x, y, z) = \iiint \mu_d(\xi, \eta, \gamma) h(x - \xi, y - \eta, z - \gamma) d\xi d\eta d\gamma. \quad (1)$$

Форма и размеры геометрических структур малого объема (при размерах, сопоставимых с размерами ФРТ) на реконструированном изображении существенно искажены и определяются формой и размерами функции рассеяния. Полезным следствием модели (1) является взаимосвязь геометрических размеров дефекта и амплитудных параметров томограммы в окрестности с размерами порядка ФРТ, что позволяет определить объем дефектов по яркости их изображений. Например, для дефектов типа воздушных пор можно считать, что $\mu_d(x, y, z) = \text{const}$. В этом случае, интегрируя (1), легко показать, что интеграл от реконструированного распределения ЛКО $\hat{\mu}_d(x, y, z)$ пропорционален произведению объема дефекта V_d на объем ФРТ $V_{\text{ФРТ}}$:

$$\iiint \hat{\mu}_d(x, y, z) dx dy dz = \alpha V_d V_{\text{ФРТ}}. \quad (2)$$

Переходя к дискретным представлениям, интеграл заменим суммой всех элементов реконструированного трехмерного дефекта. Тогда, измерив на томограммах яркости B_i всех точек, принадлежащих дефекту, определим его объем:

$$V_d = \frac{1}{\alpha V_{\text{ФРТ}}} \sum_i (B_i - \bar{B}_\phi) = k B_\Sigma, \quad (3)$$

где $k = \alpha^{-1} V_{\text{ФРТ}}^{-1}$ – коэффициент пропорциональности; \bar{B}_ϕ – среднее значение яркости фона.

Вычисление суммарной яркости удобно производить в два этапа: сначала складываются томограммы разных сечений, содержащих дефект, а затем на полученном изображении находятся и суммируются все точки дефекта. При панорамной реконструкции толщиной восстанавливаемого слоя можно управлять, например, путем использования ограниченных проекций. В том случае, когда толщина реконструируемого слоя превышает линейные размеры дефекта, яркость дефекта на томограмме оказывается проинтегрированной по координате, перпендикулярной к слою, поэтому достаточно просуммировать яркости на изображении единственного слоя, проходящего через дефект.

На рис. 1 показан фрагмент томограммы 18×18 элементов с изображением реального дефекта размером 250 мкм. Полупрозрачная плоскость соответствует порогу $P = \bar{B}_\phi + 3,5\sigma$, где σ – среднее квадратическое значение шума.

В представленном случае суммарная яркость пикселей, превышающих порог, оказывается ниже полной яркости, так как не учитываются точки дефекта, лежащие ниже порога, но выше уровня фона. Очевидно, что чем меньше дефект, тем больше возможная ошибка определения его яркости.

В процессе исследований разработана методика определения размеров дефектов, сопоставимых с размерами ФРТ, основанная на измерении суммарной яркости. Особенность реализованной методики измерения состоит в том, что в ней используется информация о форме изображения дефекта и его

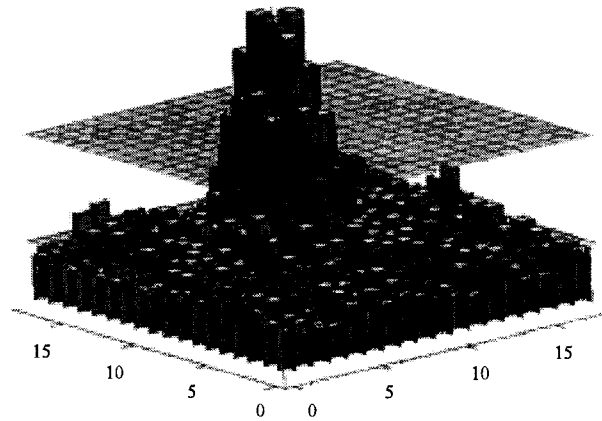


Рис. 1. Изображение дефекта

координатах, что позволяет повысить точность определения размеров. Координаты определяются на этапе обнаружения дефектов и известны до начала измерения. Форма изображений мелких дефектов на томограмме считается близкой к форме передаточной характеристики.

Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) томографической установки, на которой проводились исследования, известна [10]. Она построена по экспериментальным данным и представлена на рис. 2 тонкой линией. Эта характеристика с достаточной точностью аппроксимируется гауссойдой $K(f) = \exp\left(-\frac{f^2}{8}\right)$ (на рисунке жирная линия). Используя обратное преоб-

разование Фурье, получим передаточную характеристику (функцию рассеяния):

$$h(x, y, z) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{0,0128}\right). \quad (4)$$

Объем ФРТ томографа, вычисленный через интегральную нормированную функцию Гаусса, составляет $\approx 8 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$ (это соответствует объему куба с ребром 0,2 мм или шара диаметром 0,25 мм).



Рис. 2. Частотно-контрастная характеристика томографа

Т а б л и ц а 1

№ п/п	Номер изделия	Средняя яркость (\bar{B}_ϕ)	σ_1 шума	σ_2 шума
1	9845087	99	8,4	3,6
2	9956066	84	10,2	3,9
3	9770055	53	7,7	4,0
4	9161051	57	9,7	4,7
5	8106024	65	9,1	4,2

В предположении, что форма реконструированного дефекта неизменна, можно применить оптимальный обнаружитель. В случае шумов с нормальным распределением он состоит из фильтра, который согласован с формой сигнала, и порогового устройства [13]. Ядро согласованного фильтра рассчитывается в соответствии с выражением (4) функции рассеяния. В табл. 1 приведены измеренные значения среднеквадратических отклонений пространственного шума до выполнения согласованной фильтрации (σ_1) и после (σ_2). Из таблицы видно, что σ шума после фильтрации уменьшается примерно в 2 раза. На основании экспериментальных данных порог устанавливается на уровне $P = \bar{B}_\phi + 3,5\sigma_2$.

Все точки изображения, яркость которых превышает заданный порог P , рассматриваются как дефекты. Отдельные точки рассматриваются как один дефект, если они располагаются внутри окружности радиусом r . Центром дефекта считается его центр массы, вычисляемый на фильтрованном изображении в локальной окрестности каждой из точек, превышающих порог.

Поскольку форма реконструированного дефекта описывается функцией Гаусса, то размер дефекта зависит от того, на каком уровне он измеряется. Задавая уровень L , выше которого заключено, например, 90 % всей яркостной энергии дефекта:

$$L = \int_{-r}^r \exp\left(-\frac{r^2}{0,0128}\right) dr = 0,9, \quad (5)$$

по таблицам Шеппарда найдем радиус r реконструированного дефекта. При суммировании яркостей вокруг центра дефекта в круге радиусом r можно утверждать, что полученное значение яркости составит 90 % от полной яркости.

Суммирование яркостей точек дефекта и определение уровня фона производятся за один проход в локальной окрестности (19×19) центра дефекта по исходному (нефильтрованному) изображению. При этом пиксели локальной области изображения, расположенные внутри круга радиуса r , считаются принадлежащими дефекту, а все остальные – фону. Из суммы яркостей элементов дефекта вычитается фоновая «подставка», равная произведению среднего значения фона на площадь дефекта. Полученная таким образом величина считается суммарной яркостью дефекта (B_Σ).

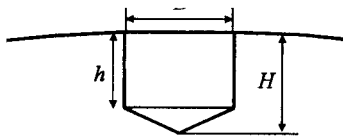


Рис. 3. Форма искусственного дефекта

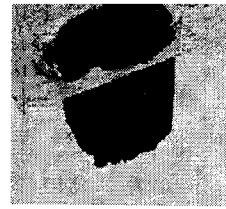


Рис. 4. Вид дефекта

Если принять, что дефект имеет форму шара (наиболее часто встречающаяся форма пор), то яркость дефекта (пропорциональная объему) и его диаметр D связаны степенной зависимостью:

$$D = \alpha B_{\Sigma}^{1/3}, \quad (6)$$

где $\alpha = \sqrt[3]{12/k\pi}$.

Таким образом, для определения линейных размеров дефектов по их томограммам достаточно знать суммарную яркость и коэффициент пропорциональности α .

С целью определения точности и границ применимости разработанной методики выполнена ее экспериментальная проверка на стандартных образцах. В качестве стандартных образцов использовались ТВЭЛы с искусственными дефектами, которые были получены путем сверления отверстий на отшлифованном участке сварного шва. У стандартных образцов аттестованными средствами были измерены диаметр и глубина отверстий. При вычислении объема считалось, что отверстие состоит из двух частей (рис. 3): прямого кругового цилиндра и конуса. Угол при вершине конуса равен углу заточки сверла (120°). Форма искусственных дефектов проверена методом низкокогерентной интерферометрии на установке, описанной в [14]. На рис. 4 приведено изображение искусственного дефекта, полученное с помощью интерферометрической установки. Видно хорошее соответствие формы дефекта и модели.

При калибровке и проверке точности измерений такой искусственный дефект рассматривался как пора равного объема, имеющая форму шара

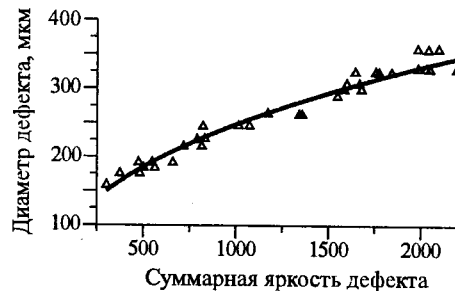


Рис. 5. Зависимость размера дефекта от яркости

Таблица 2

№ п/п	Номер изделия	Радиус панорамы							Яркость B_{Σ}	Размер дефекта
		74	76	78	80	82	84	86		
1	9161051	741	684	655	601	–	–	–	741	215
2	9956066	1097	1510	1702	1673	1463	1312	–	1702	320
3	8367016	–	–	–	537	990	1499	1578	1578	300
4	0001034	–	–	–	–	417	584	680	680	200

диаметром

$$D_{\text{экв}} = 3 \sqrt{\frac{3}{2} D^2 \left(H - \frac{D}{3\sqrt{3}} \right)}. \quad (7)$$

В процессе исследований использовались панорамные томограммы изготовленных стандартных образцов. Экспериментально полученная зависимость диаметра поры от яркости представлена на рис. 5.

Эта зависимость хорошо аппроксимируется функцией преобразования $D_d = 13,6B_{\Sigma}^{0,4}$. Среднеквадратическое отклонение измеренных диаметров от калибровочной функции составляет 12,1 мкм, максимальное – 29,5 мкм. Относительная ошибка определения диаметра искусственных дефектов по калибровочной функции не превышает $\pm 8\%$ (стандартное отклонение относительной ошибки по всем исследованным дефектам составляет 4,5%).

В табл. 2 приведены измеренные на панорамах значения яркости для внутренних и искусственных дефектов. Измерения яркости выполнены в соответствии с разработанной методикой. Размер дефекта определялся по калибровочной функции, изображенной на рис. 5.

Радиус панорамы дан в пикселях (пиксел равен 50 мкм). Жирным шрифтом выделена максимальная яркость, которая соответствует прохождению реконструируемого слоя через дефект. Зависимость яркости дефекта от радиуса реконструируемого слоя позволяет определить глубину залегания дефекта.

Проведено сравнение полученных нами результатов с результатами измерения дефектов другими средствами. Так, при рентгенографическом контроле изделий 9161051 и 9956066 (см. табл. 2) размеры пор оценены в 200 и 300 мкм соответственно. Объем искусственных дефектов имитаторов 8367016 и 0001034 определялся с помощью низкокогерентной интерферометрии. Размеры искусственных дефектов составляют 290 и 190 мкм.

ВЫВОДЫ

Учет формы передаточной характеристики томографа при согласованной фильтрации более чем в 2 раза уменьшает объем надежно обнаруживаемых мелких дефектов (диаметр до 130 мкм) и повышает точность определения их координат.

Разработанная методика позволяет в автоматическом режиме определять размеры пор в диапазоне от 130 до 300 мкм с погрешностью не более 15 % от линейного размера.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что многослойная панорама томография может эффективно использоваться в задачах обнаружения и измерения дефектов типа пор в сварных соединениях трубчатых и осесимметричных промышленных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Реконструктивная вычислительная томография // ТИИЭР. 1983. 71, № 3.
2. Schad K. C., Smoldt D. L., Ross R. J. Nondestructive Methods for Detecting Defects in Softwood Logs. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1996. P. 13.
3. Филинов В. Н., Маклашевский В. Я., Шейкин Ю. В. и др. Рентгеновский микротомограф для контроля узлов авиатехники // 14-я Росс. науч.-техн. конф. «Неразрушающий контроль и диагностика»: Тез. докл. (Москва, 23–26 июня 1996 г.). М.: РОНКТД, 1996.
4. Вайнберг Э. И., Казак И. А., Курозаев В. П. Точность воспроизведения пространственной структуры контролируемого объекта в рентгеновской промышленной томографии // Дефектоскопия. 1980. № 10. С. 5.
5. Вайнберг Э. И., Гончаров В. И., Казак И. А., Курозаев В. П. Чувствительность рентгеновской вычислительной томографии при контроле промышленных изделий с локальными дефектами // Там же. С. 14.
6. Вайнберг Э. И., Казак И. А., Курозаев В. П., Плоткина Г. З. Материалы и метод аттестации стандартных образцов для поверки рентгеновских вычислительных томографов // Дефектоскопия. 1982. № 9. С. 7.
7. Кузелев Н. Р., Тутубалин В. Н., Салакатова Л. С. Точностные характеристики радиационной компьютерной томографии при контроле стержневых твэлов // Дефектоскопия. 1986. № 7. С. 50.
8. Штань А. С. Автоматизированный контроль качества твэлов для АЭС // Приборы и системы управления. 1995. № 11. С. 12.
9. Жуков Ю. А., Карлов Ю. К., Косых В. П. и др. Компьютерная томография в задачах контроля сварных соединений ТВЭЛ // Автометрия. 1997. № 4. С. 43.
10. Воробьев В. В., Карлов Ю. К., Обидин Ю. В. и др. Рентгеновская томографическая станция контроля сварных соединений ТВЭЛов // Датчики и системы. 1999. № 2. С. 6.
11. Косых В. П., Обидин Ю. В., Поташников А. К. Сравнительный анализ алгоритмов реконструкции для станции томографического контроля ТВЭЛов // 4-я Всерос. с междунар. участием конф. «Распознавание образов и анализ изображений: Новые информационные технологии»: Тр. конф. (Новосибирск, 11–18 октября 1998 г.). Новосибирск: ИАиЭ СО РАН, 1998. Ч. II. С. 37.
12. Рентгенотехника: Справочник /Под общ. ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1992. Ч. 2.
13. Шестов Н. С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. М.: Сов. радио, 1967.
14. Голубев И. В., Сысоев Е. В., Чугуй Ю. В. Измерение поверхностных дефектов на основе низкокогерентной интерферометрии // Датчики и системы. 1999. № 6. С. 25.

*Конструкторско-технологический институт
научного приборостроения СО РАН,
E-mail: obidin@tdisie.nsc.ru*

*Поступила в редакцию
18 октября 2000 г.*