

Русин Б.П., Ануфриева Н.П., Иванюк В.Г., Лысак Ю.В., Кобасяр М.И.

ДВУХШАГОВЫЙ АЛГОРИТМ 3D-РЕКОНСТРУКЦИИ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕЩИНЫ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

Введение. За последние годы область контроля состояния трещиностойкости элементов конструкций значительно увеличилась. Этому способствовало применение новых методов и устройств, которые используются в современных комплексах неразрушающего контроля материалов. Один из методов неразрушающего контроля состояния трещиностойкости элементов конструкций состоит в исследовании металлографических изображений, которые фиксируют состояние поверхности элементов конструкций на их отдельных участках [1]. При восстановлении трехмерной структуры поверхности металлографических объектов на основании информации о двухмерных изображениях применяются несколько методов трехмерной реконструкции, которые используют модели отражения света [1–3].

Один из типичных представителей такой реконструкции описан в [2]. Разработанный алгоритм программно реализован в виде виртуальной системы обработки информации. Данная система обеспечена приемником с источником света, который имеет переменный угол освещения. Предложенная система позволяет по триаде изображений получать трехмерную информацию о материалах, которые исследуются, в данном случае, о трещинах в материале.

В работе [2] показано, что погрешность определения глубины трещины после проведения коррекции выбора опорной точки в интеграционной операции реконструкции составляет $4 \cdot 10^{-4}$ (до коррекции $3,8 \cdot 10^{-2}$). Это позволяет говорить о том, что при распространении действия приведенной системы обработки информации на реконструкцию трещин из реальных металлографических изображений [4] прогноз трещиностойкости осуществляется с относительной погрешностью $2 \cdot 10^{-4}$. В перспективе такие показатели точности можно попытаться реализовать на практике, если обеспечить видеосъемку каждого из триады изображений "точным" индивидуальным угловым направлением освещения источником света, а также при проведении 3D-реконструкции произвести "точное" определение такого параметра Ламбертовской модели отражения как фон.

Из рассмотрения условий реализации алгоритма 3D-реконструкции по триаде изображений [2] видно, что создание макета системы обработки изображений (СОЗ) нуждается в решении следующих трех сложных заданий: разработка технологических прецизионных узлов фиксации положения источника света в приемнике изображения; "точное" определение фона, а также прецизионное юстирование системы. Такое информационно-технологическое усовершенствование нуждается в решении следующих двух заданий: оценки погрешности определения глубины трещины, которая возникает при реконструкции по триаде 2D-изображений; оценки погрешности определения глубины трещины, обусловленная отклонением оценки интенсивности фона от действительного значения.

Алгоритм 3D-реконструкции за 2D-изображением [3] имеет практическую реализацию [1] и проще для анализа погрешностей чем алгоритм 3D-реконструкции по триаде 2D-изображений. Именно поэтому на данном этапе исследований анализ погрешностей частично проведен для описанного выше алгоритма. Этот анализ начат в работе [5], где очерчена главная идея анализа, и детально

развит в работе [6]. В работе [6] проведен анализ погрешности определения глубины трещины, вызванной отклонением направления освещения от технологически запланированного. Из рассмотрения условий реализации алгоритма 3D-реконструкции по 2D-изображению видно, что оценка глубины трещины, кроме направления освещения, нуждается в определении таких параметров Ламбертовской модели отражения, как интенсивность фона и диффузный коэффициент.

Поэтому целью работы является оценка погрешности определения глубины трещины при ее реконструкции по 2D-изображениям в зависимости от фона и диффузного коэффициента отражения. В рамках поставленной цели рассматривается двухшаговый алгоритм 3D-реконструкции трещины.

Отметим основные элементы информационной технологии 3D реконструкции за 2D-изображением. Она заключается в том, что для реконструкции используются 2D-изображения исследуемых объектов с диффузным отражением. Такими объектами являются узкие трещины. Для диффузной модели отражения (рассматривается монохроматическое изображение) интенсивность отражения точки поверхности освещенной одним источником света, определяется уравнениями [7], [8]:

$$I_{\lambda} = I_a + I_{\rho\lambda} k_d (N \cdot L), \quad (1)$$

где I_a – интенсивность рассеянного света; $I_{\rho\lambda}$ – интенсивность источника освещения; k_d – коэффициент, который определяет уровень диффузного отражения исследуемой точки поверхности;

$$N = \left\{ \frac{-p}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}, \frac{-q}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}, \frac{1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}} \right\};$$

- единичный вектор-нормы к поверхности в исследуемой точке

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad q = \frac{\partial z}{\partial y};$$

- наклон поверхности в окрестности точки; $L = (L_x, L_y, L_z)$ – единичный нормализованный вектор, который указывает направление на источник света. Такая диффузная модель отражения представляет собой функцию параметров p , q , I_a и k_d , которые необходимо определить. Для вычисления диффузного коэффициента формируют дополнительное изображение исследуемой металлографической поверхности с трещинами под другим углом зрения. Оставляем положение оси OY неизменным и наклоняем плоскость образа XOY по отношению к плоскости XOY съемки камеры под известным углом θ . В результате получим изображение с интенсивностью $I_{\lambda} k_d$. С помощью цветной селекции находим сегменты полученных изображений, на которых отсутствуют изменения диффузионного коэффициента. В результате получаем пространственный сегмент изображения наклоненной плоскости. В этом сегменте для точки, которая лежит на плоскости изображения, определяем параметр

Русин Богдан Павлович, д.т.н., профессор, зав. отделом "Методы и системы обработки, анализа и идентификации изображений" Физико-механического института им. Г.В. Карпенко НАН Украины.

Ануфриева Наталья Павловна, аспирантка Физико-механического института им. Г.В. Карпенко НАН Украины.

Иванюк Виталий Григорьевич, инженер отдела "Методов и систем обработки, анализа и идентификации изображений" Физико-механического института им. Г.В. Карпенко НАН Украины.

Лысак Юрий Васильевич, к.т.н., м.н.с. Физико-механического института им. Г.В. Карпенко НАН Украины.

Кобасяр Михаил Иванович, к.т.н., н.с. отдела "Методы и системы обработки, анализа и идентификации изображений" Физико-механического института им. Г.В. Карпенко НАН Украины.

Украина, ФМИ им. Г.В. Карпенко НАН Украины, 79601, г. Львов, ул. Научная, 5а.

$$t = l_p \lambda k_d = (l_{\lambda k d 0} - l_a) \sqrt{t g^2 \theta + 1},$$

где $l_{\lambda k d 0}$ – интенсивность точки плоскости. Для определения интенсивности фона используется информация из дополнительного изображения, которое получается в результате временного искусственного затенения образа с трещиной с помощью прямоугольника, пространственное положение которого есть над образом.

Для класса вертикально расположенных трещин, ввиду медленной изменчивости параметров трещины, выполняется условие

$$q = q(x, y) = 0. \quad (2)$$

Учитывая условие (2), параметры фона l_a и t , а также, то что в СОЗ направление источника света имеет координаты $L_E = (0, 0, 1)$, из уравнения (1) получаем

$$|p| = \sqrt{\frac{t^2}{(l_{\lambda} - l_a)^2} - 1}, \quad (3)$$

где $l_{\lambda} = l_{\lambda}(x, y)$.

В последующем анализе точности определения глубины трещины принимаем, что оценка погрешности ее определения, обусловленная отклонением направления освещения от технологически запланированного, скорректирована конструктивно и значительно меньше, чем оценка погрешности определения глубины трещины, вызванная отклонением параметров фона и диффузного коэффициента от действительных значений. Ввиду наличия современных отечественных угломеров производства МИКРОТЕХ [9] технология создания источника света с таким отклонением направления освещения в рамках предложенной в работе информационной технологии технологически и экономически достижима. Кроме того, еще одной причиной некачественной реконструкции глубины трещины является нарушение медленной изменчивости $q \neq 0$. Это в свою очередь вызывает неточность определения модуля горизонтальной производной $|p|$ (погрешность $\Delta|p(q)|$). Пусть $\Delta|p(u)|$ погрешность определения модуля $|p(u)|$ вызвана отклонением параметра $u \in \{l_a, t\}$ от действительного значения. Допуская, что влияние погрешности $\Delta|p(q)|$, которая вызвана отклонением q от 0, корректирующими средствами (фильтрацией) уменьшено до уровня $|\Delta|p(u)| \gg |\Delta|p(q)|$, определим абсолютную погрешность реконструкции глубины трещины Δz_V , которая обусловлена влиянием параметров фона и диффузного коэффициента. Оценка глубины трещины z_{max} находится путем интегрального накопления значений модуля горизонтальной производной $|p|$ (3), начиная от одного из краев трещины $z_e(x_e, y_e)$ к точке максимальной глубины трещины $z(x_V, y_e)$. Поэтому оценка погрешности определения глубины трещины Δz_{max} также находится интегральным накоплением абсолютной погрешности модуля горизонтальной производной $\Delta|p|$, начиная от края трещины $z_e(x_e, y_e)$ к точке максимальной глубины трещины $z(x_V, y_e)$ [4]. Применим для оценки точности определения $|p|$ разложение функции $|p| = f(l_a, t)$ в ряд Тейлора. Пусть во время реконструкции получена оценка параметра $u_0 \in \{l_{a0}, t_0\}$ Запишем разложение $f(l_a, t)$ в ряд Тейлора [10]:

$$f(l_a, t) = f(l_{a0}, t_0) + \sum_{u \in \{l_a, t\}, k=1}^2 \frac{\Delta k_u}{k!} \left\{ \frac{\partial^k}{\partial u^k} f(l_a, t) \right\} \Big|_{l_a=l_{a0}, t=t_0} + \dots + \frac{\Delta l_a \Delta t}{2!} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial l_a \partial t} f(l_a, t) \right\} \Big|_{l_a=l_{a0}, t=t_0} + \dots \quad (4)$$

где $\Delta u \in \{\Delta l_a, \Delta t\}$. Для оценки членов ряда Тейлора путем дифференцирования находим:

$$\Delta|p(l_a)| = \Delta l_a \left\{ \frac{\partial}{\partial l_a} f(l_a, t) \right\} \Big|_{l_a=l_{a0}, t=t_0} \approx \dots \quad (5)$$

$$\approx \frac{\Delta l_a t_0^2}{(l_{\lambda 0} - l_{a0})^3} \left(\frac{t_0^2}{(l_{\lambda 0} - l_{a0})^2} - 1 \right)^{-1/2},$$

$$\Delta|p(t)| = \Delta t \left\{ \frac{\partial}{\partial t} f(l_a, t) \right\} \Big|_{l_a=l_{a0}, t=t_0} = \dots \quad (6)$$

$$= \frac{t_0 \Delta t}{(l_{\lambda 0} - l_{a0})^2} \left(\frac{t_0^2}{(l_{\lambda 0} - l_{a0})^2} - 1 \right)^{-1/2}.$$

Пренебрегая в выражении (4) малозначимыми членами, получаем приближение разложения в ряд Тейлора, из которого с применением обозначения $|p(l_a, t)| = f(l_a, t)$ и с использованием подстановки (5), (6) определим общую оценку качества реконструкции модуля горизонтальной производной трещины

$$\Delta|p(l_a, t)| = |p(l_a, t)| - |p(l_{a0}, t_0)| = \Delta|p(l_a)| + \Delta|p(t)|. \quad (7)$$

На основании выражения (7) определим абсолютную погрешность реконструкции глубины трещины, которая обусловлена влиянием параметров фона и диффузного коэффициента

$$\Delta z(l_a, t) = - \int_{x_e}^{x_V} \Delta|p(l_a)| dx - \int_{x_e}^{x_V} \Delta|p(t)| dx. \quad (8)$$

При рассмотрении погрешностей (5) и (6) и с учётом (8) видно, что $\Delta z(l_a, t)$ есть функция от $l_{\lambda 0}$. Изображение $l_{\lambda 0}$ можно получить искусственно, смоделировав процесс отражения света от поверхности трещины. Для этого воспользуемся аналитической моделью вертикальной трещины

$$z_{Cr}(x) = \begin{cases} -z_{max} + \begin{cases} -k(x - x_V), & x_e \leq x \leq x_V; \\ k(x - x_V), & x_r \geq x > x_V; \end{cases} \\ 0, & x_e > x \cup x > x_r. \end{cases} \rightarrow p = \begin{cases} -k \\ k \\ 0 \end{cases} \quad (9)$$

где $z_{Cr}(x) = z_{Cr}(x, y)$, $y \in [y_s, y_e]$, поэтому $q = 0$. Заметим, что в точках x_e, x_V, x_r аналитическая модель (9) является непригодной для определения горизонтальной производной. Эту неопределенность можно снять при наложении условий дискретизации по координате x . Тогда $z_{Cr}(x) \approx z_{Cr}(i \Delta x)$, где Δx – шаг дискретизации. Базируясь на выражении (1), определим аналитическую модель сегмента изображения вертикальной трещины

$$l_{\lambda 0}(x, y) = \begin{cases} l_a + \frac{t}{\sqrt{k^2 + 1}}, & x_e \leq x < x_V \cup x_r \geq x > x_V \\ l_a + t, & x_e > x \cup x > x_r \end{cases} \quad (10)$$

Для синтезированного изображения $l_{\lambda 0}(i \Delta x, j \Delta y)$ неопределенность в точках, в которых трещина является самой глубокой (x_V, y) может быть снята путём наложения условий дискретизации

по координатам x, y . В точках (x_V, y) для аналитической модели изображения $I_{\lambda 0}$ положим $I_{\lambda 0}(x_V, y) = I_a + \tau$. Будем считать, что в (10) параметры τ и I_a , представленные действительными значениями. Подставим выражение (10) в выражения (5) и (6). С учетом того, что параметр k не зависит от горизонтальной координаты $x \in [x_e, x_V]$, подинтегральные выражения в (8) также не зависят от x . Поэтому их можно вынести за пределы интегралов. Выполняя интегрирование (8) с учетом (5) и (6), получаем оценку абсолютной погрешности определения глубины трещины в таком виде

$$\Delta z(I_a, \tau) = -(x_V - x_e) \left[\Delta I_a \frac{(k^2 + 1)^{3/2}}{I_0 k} + \Delta \tau \frac{k^2 + 1}{I_0 k} \right].$$

На основании этого определим относительную погрешность оценки глубины трещины

$$\delta z_V = \frac{\Delta z(I_a, \tau)}{-z_{\max}} = \delta z_V / I_a + \delta z_V \tau, \quad (11)$$

где $\delta z_V / I_a = \delta I_a \eta k^{-2} (k^2 + 1)^{3/2}$;

$$\delta z_V \tau = \delta \tau k^{-2} (k^2 + 1),$$

первое (второе) слагаемое – это относительная погрешность определения глубины трещины под воздействием фона (взвешенного диффузного коэффициента); $\delta I_a = \frac{\Delta I_a}{I_a}$ – относительная погреш-

ность оценки фона; $\eta = \frac{I_a}{I_0}$ – параметр; $\delta \tau = \frac{\tau - I_0}{I_0} \approx \frac{\tau - I_0}{\tau}$ –

относительная погрешность оценки взвешенного диффузионного коэффициента. Из выражения (11) видно, что за счет k^{-2} ухудшается точность определения глубины трещины. Если $k \rightarrow 0$, то $\delta z_V \rightarrow \infty$. Также видно, что если $k \rightarrow \infty$, то в первом слагаемом $(k^2 + 1)^{3/2} / k^2 \rightarrow k$, поэтому $\delta z_V \rightarrow \infty$. Такие режимы реконструкции нуждаются в определении параметров фона и диффузного коэффициента отражения с повышенной точностью.

Количественная оценка δz_V получена для случая, когда $\eta = 0,1$, а также предполагая, что $\delta I_a = \delta \tau$. На рис. 1 представлены результаты вычисления относительной погрешности определения глубины трещины δz_V .

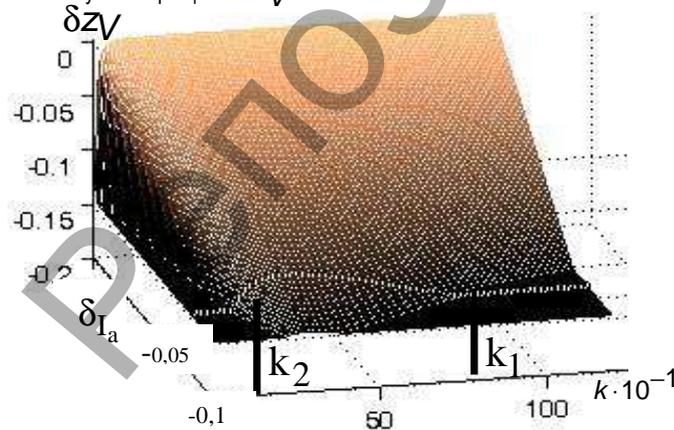


Рис. 1. Зависимость относительной погрешности определения глубины трещины δz_V

Проведем анализ δz_V в одном из сегментов, в котором произведено сечение. Результаты анализа представлены на рис. 2, где $D = k_1 / k_2$.

Как видно из рис. 2, для выбора наиболее приемлемых параметров реконструкции необходимо работать с погрешностью $\delta I_a = -0,1$. В диапазоне D реконструкция наклона трещины k выполняется с заданной погрешностью $|\delta z_V| \leq 0,15$. Для расширения пределов диапазона реконструкции D предлагается следующее. Пусть 3D-реконструкцией реконструирован параметр $\tilde{k} \notin D$, который можно определить через угол раскрытия трещины ϕ , как $\tilde{k} = tg \tilde{\phi}$, где $\tilde{\phi} = \pi/2 - \phi/2$. Оставляем положение оси OY неизменным и наклоняем плоскость образа X_1OY по отношению к плоскости XOY съемки камеры под известным углом θ , таким, что $\tilde{k}_1 = tg(\tilde{\phi} - \theta)$, где $\tilde{k}_1 \in D$. В этом случае видеосъемкой получим изображение с наклоненной трещиной. В таком изображении $I_{\lambda 1}(x_1)$ для точки трещины $x_1 \in [x_{1e}, x_{1V}]$ (x_{1e} – левый край трещины, x_{1V} – точка максимальной глубины трещины), реконструкцией получаем: $k_1 = tg(\phi - \theta)$. Данное выражение позволяет вычислить скорректированное значения угла $\phi = \theta + arctg k_1$ и найти уточненный параметр $k = tg \phi$.

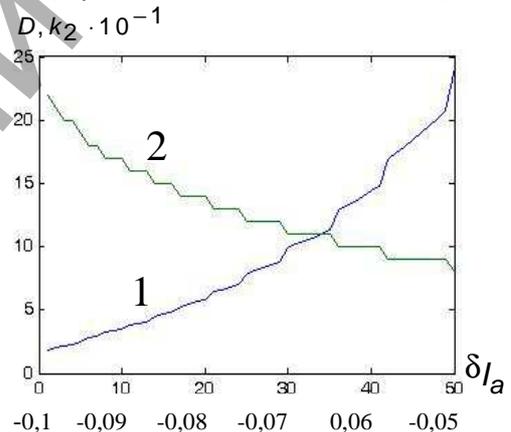


Рис. 2. Зависимость диапазона реконструкции D (кривая 1) и минимального значения k_2 (кривая 2) от относительной погрешности фона

Таким образом, предложена двухшаговая процедура выбора наиболее приемлемых параметров 3D-реконструкции трещины.

Заключение. Рассмотрена задача трехмерной реконструкции поверхности за двумерными изображениями, результаты решения которой использованы при анализе изображений материалов с трещинами. Предложен алгоритм реконструкции внутренней поверхности трещины и рассчитана точность его работы.

Научная и практическая. Аналитически найденные погрешности определения глубины трещины индуцируются отклонением параметров Ламбертовской модели отражения света от действительных значений. Результаты анализа точности являются конструктивными и ориентированными на прогноз трещиностойкости. Получены аналитические выражения на основании которых рассчитаны погрешности определения глубины трещины, диапазон 3D-реконструкции значений модуля горизонтальной производной и его минимальное значение, а также соответствующие пределы отклонений параметров интенсивности фона и диффузного коэффициента. На основе полученных аналитических выражений предложен алгоритм двухшагового вычисления параметров модели отражения света, что позволяет уменьшить по-

грешность определения глубины трещины материала и тем самым улучшить точность прогноза его трещиностойкости.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Русин, Б.П. Оценка глубины питинга за изображениями поверхности материала / Б.П. Русин, В.Г. Иванюк, О.В. Капший, Н.П. Ануфриева, А.Ю. Похмурский. // Радиоэлектроника и информатика. – 2010. – № 1. – С. 83–91.
2. Русин, Б.П. Оценка глубины трещины за триадой изображений / Б.П. Русин, В.Г. Иванюк, О.В. Капший, Н.П. Ануфриева // Радиоэлектроника и информатика. – 2010. – № 2. – С. 68–76.
3. Русин, Б.П. Развитие алгоритма оценки характеристик трещин за изображениями поверхности материалов / Б.П. Русин, В.Г. Иванюк, О.В. Капший, Н.П. Ануфриева // Радиоэлектроника и информатика. – 2007. – № 4. – С. 123–130.
4. Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.
5. Русин, Б.П. Оценка глубины трещины за изображениями поверхности материал / Б.П. Русин, В.Г. Иванюк, О.В. Капший, Н.П. Ануфриева // 15 Международная научно-техническая конференция ЛЕОТЕСТ – 2010. Электромагнитные и акустические методы неразрушающего контроля материалов и изделий. – Славск, 15–20 февраля в 2010. – С. 89–90.
6. Ануфриева, Н.П. Оценка погрешности определения глубины трещины в информационной технологии 3D-реконструкции за её 2D изображением / Н.П. Ануфриева, Б.П. Русин, Д. Ковалик // Сборник научных трудов Международной науч.-техн. интернет-конференции. Компьютерная графика и распознавание изображений – Винница. – 2012. – С. 7–21.
7. Basso, A. Virtual Light: Digitally-generated Lighting For Video Conferencing Applications / A. Basso, H. P. Graf, D. Gibbon, E. Cosatto, S. Liu // IEEE – 2001. – P. 1085–1088.
8. Watanabe, S. Detecting Building Changes Using Epipolar Constraint From Aerial Images Taken At Different Positions / S. Watanabe, K. Miyajima // IEEE – 2001. – P. 201–204.
9. Режим доступа: tool@microtech-ua.com.
10. Смирнов, В.И. Курс высшей математики. – М.: Наука. – Т. 1. – 1967. – 480 с.

Материал поступил в редакцию 04.02.13

RUSIN B.P., ANUFRIEVA N.P., IVANIUK V.G., LYSAK Yu.V., KOBASIAR M.I. Two step algorithm of 3D-reconstruction of an internal surface of a crack in nondestructive control

In the paper the problem of tree dimensional surface reconstruction based on its two dimensional images is considered. Results of solving reconstruction problem are used for analyzing images of materials with cracks. Crack depth estimation method based on Lambertian reflection model is proposed.