

Наталія ГРАБОВСЬКА, Богдан РУСИН, Віталій ІВАНЮК, Валентина КОРНІЙ

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ТРИВИМІРНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ КОРОЗІЙНОГО ТРІЩИНОПОДІБНОГО ДЕФЕКТУ

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
вул. Наукова, 5, м. Львів, 79060. E-mail: vivan@ipm.lviv.ua*

Natalia HRABOVSKA, Bohdan RUSYN, Vitalij IVANYUK, Valentyna KORNIY

ACCURACY ESTIMATION OF THE CORROSION-CRACK DEFECTS 3D IMAGE RECONSTRUCTION

*Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine
5, Naukova Str., Lviv; 79060, Ukraine. E-mail: vivan@ipm.lviv.ua*

ABSTRACT

The article considers the problem of error estimation for three-dimensional surface reconstruction with two-dimensional images. For recording images it offers to use three directions of illumination. The accuracy of the determination of directions of illumination initially depends on the accuracy of the reconstruction. The estimation error of the reconstruction of the derivatives of the surface depending on two directions of illumination. In particular, based on the test image of the corrosion-crack was calculated estimate of the error of reconstruction of the derivatives of the surface corrosion-cracks. The analysis of this dependences presented recommendations for establishing operating limits of the angular deviations of the directions of illumination and formation ranges of the reconstruction of derivatives .

KEY WORDS: 2D image, 3D image reconstruction, corrosion-crack.

ВСТУП

У неруйнівному контролі конструкцій, уражених корозією, для прогнозування ресурсу їх безаварійної роботи важливе значення має виявлення поверхневих дефектів, які мають вигляд корозійно-механічних тріщин і встановлення їх форми та глибини [1, 2]. Останнім часом для опису та відновлення форми дефекта використовують методи тривимірної реконструкції [3, 4]. Одним з методів отримання тривимірної форми предмету на основі аналізу його зображень є запропонований у [5, 6] метод 3D реконструкції за тріадою зображень, отриманих зі змінним положенням джерела світла. Для відеозйомки зображень використовуються три напрямки освітлення – вертикальний та два бокові. Реконструкція відбувається шляхом інтегрального накопичення реконструйованих горизонтальної та вертикальної похідної вектора нормалі, похибка якої складається з двох складових. Перша виникає в розрахунковій частині алгоритму реконструкції, а друга викликана відхиленням кожного з 3-х напрямків освітлення від технологічно запланованого значення. У першій частині аналізу точності доцільно розглянути похибку, індуковану відхиленням кожного з двох бокових напрямків освітлення від технологічно запланованого значення. Використаємо в якості об'єкта реконструкції корозійний тріщиноподібний дефект.

Таким чином, метою даної роботи є оцінка похибки визначення похідних поверхні корозійних тріщиноподібних дефектів за їх реконструкції за тріадою зображень залежно від бокових напрямків освітлення.

3D РЕКОНСТРУКЦІЯ ЗА ТРІАДОЮ ЗОБРАЖЕНЬ

Нехай послідовною змінною освітлення дифузного об'єкта джерелом світла $L_m = (L_{x_m}, L_{y_m}, L_{z_m})$, $m=1,2,3$ відеозйомкою отримується серія зображень

$$I_{\lambda m} = I_a + I_{p\lambda} k_d (N \cdot L_m),$$

де I_a – інтенсивність розсіяного світла; $I_{p\lambda}$ – інтенсивність джерела освітлення; k_d – дифузний

коефіцієнт; N – одиничний вектор нормалі до поверхні $F(x, y, z) = 0$ у досліджуваній точці $M = (x, y, z)$

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

тут $p = \frac{\partial z}{\partial x}$, $q = \frac{\partial z}{\partial y}$ – нахил поверхні в околі точки.

Застосуємо у системі однакові джерела світла з такими параметрами, що

$$L_0 = (0, 0, 1), L_1 = (L_{x1e}, 0, L_{z1e}), L_2 = (0, L_{y2e}, L_{z2e}). \quad (1)$$

З цього випливає реконструкція оцінок похідних

$$p = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} - \frac{\eta_1}{L_{x1e}}, \quad (2) \quad q = \frac{L_{z2e}}{L_{y2e}} - \frac{\eta_2}{L_{y2e}}, \quad (3)$$

де
$$\eta_i = \frac{I_{\lambda i} - I_a}{I_{\lambda 0} - I_a}, \quad i=1,2.$$

Використовуючи базове зображення $I_{\lambda 0}$ зі штучним затіненням, можна визначити інтенсивність фону I_a і завершити реконструкцію похідних.

ПОХИБКА ВИЗНАЧЕННЯ ПОХІДНИХ ПОВЕРХНІ

На практиці під час зйомки виникають відхилення від напрямків освітлення (1). За рахунок змін напрямку освітлення $\tilde{L}_i = (\tilde{L}_{xi}, \tilde{L}_{yi}, \tilde{L}_{zi})$, $i=1,2$ зображення $I_{\lambda i}(L_i)$ спотворюється і стає $I_{\lambda i}(\tilde{L}_i)$. Для представлення вектора \tilde{L}_1 скористаємось описом, в якому використовуються похідні $P = \frac{\partial z}{\partial x} = -\text{ctg}\theta$, де θ – кут напрямку світла в площині XOZ , $Q = \frac{\partial z}{\partial y} = -\text{ctg}\varphi$, а φ – кут напрямку світла в площині YOZ , визначені на поверхні одиничної сфери. В такому описі

$$\tilde{L}_1 = \left(\frac{-P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + 1}}, \frac{-Q}{\sqrt{P^2 + Q^2 + 1}}, \frac{1}{\sqrt{P^2 + Q^2 + 1}} \right). \quad (4)$$

З використанням (4) для технологічно запланованого L_1 , який визначено в точці з $P = P_e$, $Q = Q_e = 0$ маємо наступний вираз

$$L_1 = \left(\frac{-P_e}{\sqrt{P_e^2 + 1}}, 0, \frac{1}{\sqrt{P_e^2 + 1}} \right).$$

У цьому випадку реконструйована похідна p є функцією

$$p(P_e, 0) = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} - \frac{\eta_1(I_{\lambda 1}(L_1(P_e, 0)))}{L_{x1e}}.$$

Розглянемо похибку реконструкції похідної p , яка індукована відхиленням першого бокового напрямку освітлення \tilde{L}_1 . За рахунок використання напрямку освітлення $\tilde{L}_1 = \tilde{L}_1(P, Q)$ реконструкція похідної стає рівною

$$p(P, Q) = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} - \frac{\eta_1(I_{\lambda 1}(P, Q))}{L_{x1e}}. \quad (5)$$

Застосуємо для оцінки точності реконструкції p розклад функції (5) у ряд Тейлора. Нехтуючи в ряді Тейлора малими членами, визначимо загальну оцінку точності реконструкції горизонтальної похідної

$$\Delta p_{PQ} = p(P_e, 0) - p(P, Q) = \Delta p_P + \Delta p_Q, \quad (6)$$

де похибки $\Delta p_P = (P_e - P) \left[\frac{\partial p(P, 0)}{\partial P} \right]_{P=P_e}$; $\Delta p_Q = -Q \left[\frac{\partial p(P_e, Q)}{\partial Q} \right]_{Q=0}$.

Наступний аналіз точності виконується з параметром $P_e = -1$. У цьому випадку на основі (6) визначимо відносну похибку обрахунку горизонтальної похідної

$$\delta p = \delta p_P + \delta p_Q, \quad (7)$$

де
$$\delta r_P = \frac{(1+P)(1+p)}{2p}, \delta r_Q = Q \frac{q}{p}.$$

Використовуючи (7), доцільно проаналізувати похибку, викликану змінами напрямку L_2 . Використаємо для цього подібність співвідношень (2) та (3). На основі наведеної подібності, скориставшись у (7) підставленнями $p=q$, $q=p$, $P=Q$, $Q=P$, визначено відносну похибку обрахунку вертикальної похідної

$$\delta q = \delta q_Q + \delta q_P, \quad (8)$$

де
$$\delta q_Q = \frac{(1+Q)(1+q)}{2q}, \delta q_P = P \frac{P}{q}.$$

Повертаючись до відносної похибки δr , продовжимо її аналіз. Щоб з'ясувати технологічно досяжні відхилення напрямку освітлення від технологічно запланованого, розрахуємо кількісну оцінку відносної похибки δr . Нехай маємо вертикальний тріщиноподібний дефект. Для такого дефекту $q \approx 0$. Як видно з (7), $|\delta r_P| \gg |\delta r_Q|$ і тому $\delta r_{PQ} \approx \delta r_P$. Таким чином, необхідно оцінити похибку δr_P , яка є функцією параметра P та горизонтальної похідної p . Щоб дослідити величину похибки δr_P у діапазоні горизонтальних похідних $[-p_1, p_1]$, розглянемо переріз вертикального тріщиноподібного дефекту, який описується рівнянням $z = \eta(\Delta x - a)^2$, де Δx – крок дискретизації по горизонтальній координаті x .

ПРИКЛАД КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ ВІДНОСНОЇ ПОХИБКИ РЕКОНСТРУКЦІЇ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ ПОХІДНОЇ ТРІЩИНОПОДІБНОГО ДЕФЕКТУ

На рис. 1 подано комп'ютерно змодельований сегмент вертикального корозійного тріщиноподібного дефекту. Оскільки для проведення реконструкції глибини дефекту необхідно забезпечити значний діапазон реконструкції горизонтальної похідної $D = [-0,97; 0,97]$, необхідно дослідити умови реконструкції в діапазоні D та докладніше з'ясувати чи достатня точність у точках цього діапазону для проведення реконструкції глибини дефекту. Оцінку функції $\delta r = \delta r_P(\theta, p)$ отримано для випадку, коли $1+P = \text{ctg}45^\circ - \text{ctg}\theta$. У вигляді двовимірного масиву цей розподіл відносної похибки визначення горизонтальної похідної δr представлено на рис. 2, де точки в яких можна реконструювати похідну p представлено світлим фоном, а де не виконується умова $|\delta r_P(\theta, p)| \leq 0,1$ – чорним. Як бачимо, для розширення діапазонів реконструкції доцільно працювати з мінімальним відхиленням напрямку освітлення від технологічно запланованого.

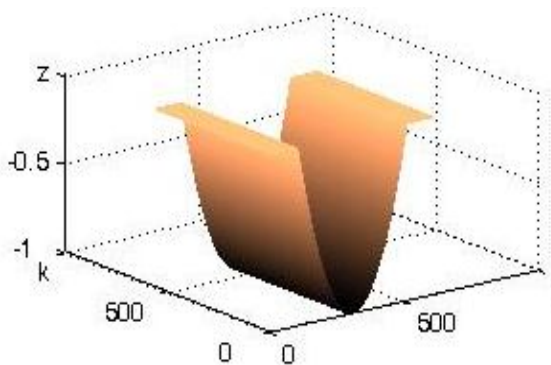


Рис. 1. Сегмент вертикального корозійного тріщиноподібного дефекту.

Fig. 1. Segment of the vertical corrosion-crack defect.

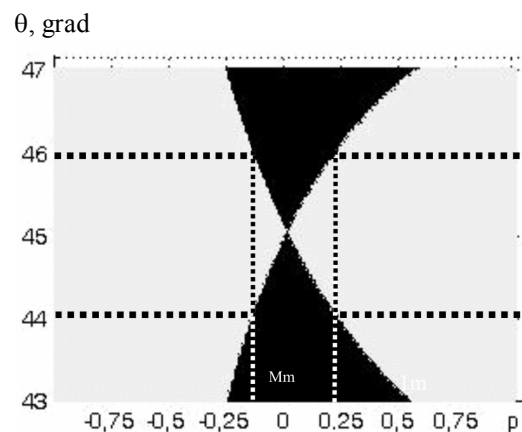


Рис. 2. Розподіл відносної похибки визначення горизонтальної похідної $\delta r(\theta, p)$ та діапазони реконструкції у випадку $\theta \in [44^\circ, 46^\circ]$.

Fig. 2. Distribution of relative error of horizontal derivative determination and ranges of reconstruction in case $\theta \in [44^\circ, 46^\circ]$.

Зауважимо, що практична реалізація такої операції, як мінімізація відхилення напрямку освітлення, потребує додаткових технологічних зусиль, необхідних для корекції точності розташування напрямків освітлення. Надалі приймаємо, що оцінка похибки визначення вертикальної похідної дефекту, зумовлена відхиленням напрямку освітлення θ від технологічно запланованого 45° , скоректована конструктивно так, що $|\delta r_p(\theta, p)| \leq 0,1$, де $\theta \in [44^\circ, 46^\circ]$. Завдяки сучасним вітчизняним кутомірам виробництва МІКРОТЕХ [7] можна створити джерело світла з таким відхиленням напрямку освітлення для використання при 3D реконструкції. У цьому випадку для реконструкції з точністю $|\delta r_p| \leq 0,1$ маємо два діапазони відновлення горизонтальної похідної $D_- = [-0,97; -0,14]$, та $D_+ = [0,23; 0,97]$. Видно, що за абсолютною довжиною діапазон D_- більший, ніж діапазон D_+ . При 3D реконструкції оцінку глибини дефекту знаходимо інтегральним накопиченням похідної p , починаючи від одного з країв дефекту (див. рис. 1). Зважаючи на те, що діапазон D_- більший за D_+ (рис. 2, $|p_M| < p_m$) глибину симетричного об'єкта реконструкції, яким і є даний дефект, краще реконструювати у діапазоні D_- .

Розглянемо точність реконструкції, розрахувавши похибку викликану змінами напрямку L_2 . Використаємо для цього подібність співвідношень похибок реконструкції δr_p (9) та δq_Q (8). На основі наведеної подібності у прикладі кількісної оцінки відносної похибки доцільно застосувати горизонтальний дефект. Для горизонтального дефекту $p \approx 0$. Тому, як видно з виразу (8), для опису розподілу відносної похибки визначення вертикальної похідної $\delta q(\varphi, q)$ можна скористатись розподілом відносної похибки $\delta r(\theta, p)$, представленим на рис. 2 з використанням підставлень $q = p$, $\varphi = \theta$. Отже, отримуємо діапазони реконструкції горизонтальної похідної у випадку $\theta \in [44^\circ, 46^\circ]$.

ВИСНОВКИ

Запропоновано метод і алгоритм реконструкції внутрішньої поверхні корозійного тріщиноподібного дефекту за тріадою двомірних зображень та розраховано точність його роботи для випадку неконтрольованих змін двох бокових напрямків освітлення відеозйомки. Аналітично знайдені похибки визначення похідних досліджуваної поверхні зумовлені відхиленням бокового напрямку освітлення від технологічно запланованого значення в площині XOZ та YOZ . На їх основі розраховані похибки визначення горизонтальної та вертикальної похідних поверхні вертикального дефекту з квадратичним профілем, два діапазони 3D реконструкції значень горизонтальної та вертикальної похідних, а також запропоновані рекомендації щодо встановлення експлуатаційних меж кутових відхилень бокового напрямку освітлення від технологічно запланованого значення у перспективі майбутньої реалізації. Для симетричних поверхонь рекомендовано проводити реконструкцію з використанням діапазону з від'ємними значеннями горизонтальної похідної, оскільки він є довший за діапазон з додатними значеннями похідної.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sharland S. M. A review of the theoretical modeling of crevice and pitting corrosion // Corrosion Science. – 1987. – V. 27, N 3. – P. 289-323.
2. Marcus P. Corrosion mechanisms in theory and practice / 2nd Edition. – New York, Technology & Engineering, 2002. – 742 p.
3. Liu Y., Su X., and Zhang Q. A novel encoded-phase technique for phase measuring profilometry // Opt. Express. – 2011. – 19 (15). – P. 14137–14144.
4. Sudipta N., Sinha D., Scharstein R. Efficient high-resolution stereo matching using local plane sweeps // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2014). – 2014. – P. 1219-1222.
5. Неруйнівний контроль стану поверхонь, уражених корозійними пітингами / Б.П. Русин, Н.П. Ануфрієва, Н.Р. Грабовська, В.Г. Іванюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – № 4 – С. 90-96.
6. Оцінка глибини тріщини за тріадою зображень / Б.П. Русин, В.Г. Іванюк, О.В. Капшій, Н.П. Ануфрієва // Радіоелектроніка і інформатика. – 2010. – № 2. – С. 70-78.
7. tool@microtech-ua.com.