

МЕТОД ТРИВИМІРНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ ПОВЕРХНІ ЗА ТРІАДОЮ ЗОБРАЖЕНЬ ТА ОЦІНКА ЙОГО ТОЧНОСТІ

© Грабовська Н. Р., Русин Б. П., Іванюк В. Г., 2017

Розглянуто проблему оцінки похибки тривимірної реконструкції поверхні за 2D-зображеннями. Для відеознімання зображень запропоновано використовувати три напрямки освітлення. Оцінено похибку реконструкції похідних поверхні залежно від двох бокових напрямків освітлення.

Ключові слова: 2D-зображення, тривимірна реконструкція, напрямки освітлення.

The article considers the problem of error estimation for three-dimensional surface reconstruction from 2D images. It is proposed to use three directions of illumination of recording images. The error estimation of the reconstruction for the derivatives of the surface depending on two lateral direction of illumination is made.

Key words: 2D image, 3D reconstructio, direction of illumination.

Вступ

Один із методів неруйнівного контролю тріщинотривності елементів конструкцій пов'язаний з дослідженням металографічних зображень, на яких зафіксовано стан поверхні елементів окремих ділянок конструкцій [1–10]. Як правило, в результаті обстеження конструкції одержуємо великі масиви зображень з дефектами. Візуальна їх неавтоматизована обробка достатньо трудомістка і здебільшого дає інформацію про характеристики тріщин лише у площині зображення. Адаптація та застосування сучасних методів тривимірної реконструкції зображень до конкретних завдань металографії дають можливість значно підвищити ефективність роботи операторів із зображеннями та отримати більше інформації про об'єкти досліджуваної сцени, зокрема, про їх тривимірну структуру, що дуже важливо для прогнозування надійності елементів конструкцій.

Одним з методів отримання тривимірної форми предмета на основі аналізу його зображень є запропонований в [11, 12] метод 3D реконструкції за тріадою зображень. Для відеознімання зображень дифузної поверхні використовують три напрямки освітлення – вертикальний та два бокові. Надалі 3D реконструкція відбувається двома етапами. На основному етапі 3D реконструкція використовує апарат ламбертівської моделі відбиття світла від поверхні конструкції для перетворення інформації тріади зображень на масиви горизонтальної та вертикальної похідних вектора нормалі поверхні. На завершальному етапі 3D реконструкція відбувається з інтегральним накопиченням реконструйованих горизонтальної та вертикальної похідних вектора нормалі. Як правило, визначення глибини дефекту відбувається з певною похибкою. Похибка складається з двох складових: перша, яка виникає лише в розрахунковій частині алгоритму реконструкції, і друга, спричинена неточністю відеознімання зображень. Спотворення зображень спричинене неточністю встановлення напрямків освітлення поверхні дефекту. За результатами роботи [14] похибка розрахунку поверхні дефекту, яка зосереджена лише в розрахунковій частині алгоритму реконструкції за тріадою зображень, для випадку оцінки глибини тріщини становить $\pm 0,04$ %. Але під час практичної реалізації цієї реконструкції необхідно врахувати похибки, індуковані відхиленням кожного з трьох напрямків освітлення від технологічно запланованого значення. Це складне завдання. Тому, щоб успішно його виконати, необхідно розділити вирішення цієї проблеми на простіші етапи й аналізувати зазначені похибки за частинами. На першому етапі такого аналізу точності доцільно розглянути похибку, індуковану відхиленням кожного з двох бокових напрямків освітлення від технологічно запланованого значення.

Тому **метою** роботи є оцінка похибки визначення похідних поверхні під час її реконструкції за тріадою зображень залежно від бокових напрямків освітлення.

Для досягнення поставленої мети будуть розв'язані три задачі оцінки похибок 3D реконструкції похідних поверхні залежно від бокових напрямків освітлення, а також буде з'ясовано, якою мірою цей тип похибок можна контролювати кутомірними засобами, що дасть змогу конструктивно зменшити їх до необхідного рівня і підвищити точність 3D реконструкції. На завершення з'ясуємо, як цей тип похибок впливає на точність прогнозу тріщиностійкості у разі застосування тривимірної реконструкції в задачах неруйнівного контролю, що дозволить визначити їх необхідний експлуатаційний рівень та зону, де вони не впливають на параметри тріщиностійкості і тим самим надійніше гарантувати точність прогнозу тріщиностійкості.

2. Ілюмінаційна модель зображення

Для дифузної моделі відбиття (розглядають монохроматичне зображення) інтенсивність відбиття точки поверхні, освітленої одним джерелом світла, визначає рівняння [15,16]

$$I_1 = I_a + I_{p1}k_d(N \cdot L), \quad (1)$$

де I_a – інтенсивність розсіяного світла; I_{p1} – інтенсивність джерела освітлення; k_d – дифузний коефіцієнт, який визначає рівень дифузного відбиття досліджуваної точки поверхні; $L = (L_x, L_y, L_z)$ – напрям на джерело світла; $N = (N_x, N_y, N_z)$ – одиничний вектор нормалі до поверхні $F(x, y, z) = 0$ у досліджуваній точці $M = (x, y, z)$.

Вважаємо, що наступну реконструкцію виконують, коли поверхня задана в явній формі $z = f(x, y)$, тому $F(x, y, z) = f(x, y) - z = 0$. Косинуси нормалі (N), скеровані до такої поверхні в точці $M = (x, y, z)$, описуються формулами [17]

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

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

Оскільки інтенсивність джерела освітлення I_{p1} – стала величина, то рівняння (1) є функцією чотирьох невідомих p , q , k_d та I_a .

3. Тривимірна реконструкція за тріадою зображень у формі їх похибки

Розглянемо ілюмінаційну модель зображення з контрольованим кутом освітлення та визначимо її параметри p , q , k_d та I_a з тріади зображень. Щоб усунути залежність від параметра I_a , експериментально визначимо його, тимчасово штучно затінюючи зразок із дефектом. Затінення формується за допомогою прямокутника, просторове положення якого над зразком, а отже, і положення тіні, визначає система оброблення. Використовуючи базове зображення I_λ зі штучним затіненням, можна визначити інтенсивність фону I_a і звести модель (1) до трьох невідомих.

Забезпечивши у системі джерело світла з такими параметрами, що $L_0 = (L_{x0}, L_{y0}, L_{z0})$, $L_1 = (L_{x1}, L_{y1}, L_{z1})$, $L_2 = (L_{x2}, L_{y2}, L_{z2})$, отримаємо інтенсивність відбиття поверхні у вигляді системи трьох рівнянь

$$\begin{aligned} I_{10} &= I_a + I_{p10}k_d(L_{x0}N_x + L_{y0}N_y + L_{z0}N_z), \\ I_{11} &= I_a + I_{p11}k_d(L_{x1}N_x + L_{y1}N_y + L_{z1}N_z), \\ I_{12} &= I_a + I_{p12}k_d(L_{x2}N_x + L_{y2}N_y + L_{z2}N_z), \end{aligned} \quad (3)$$

в якій невідомі компоненти вектора нормалі N . Кожна компонента вектора нормалі N залежить від похідних p , q а отже, система (3) залежить від них. Щоб спростити вираз (3), застосуємо у системі джерела світла з такими параметрами, що

$$L_0 = (0, 0, 1), L_1 = (L_{x1e}, 0, L_{z1e}), L_2 = (0, L_{y2e}, L_{z2e}). \quad (4)$$

Подамо джерела світла (4) із застосуванням кутів (рис. 1)

$$L_0 = (0, 0, 1), L_1 = (\cos q, 0, \sin q), L_2 = (0, \cos f, \sin f). \quad (5)$$

Крім того, приймаємо, що джерело світла L_{S0} має інтенсивність відбиття $I_{p\lambda 0}$, джерело світла L_{S1} – інтенсивність відбиття $I_{p\lambda 1}$, а джерело світла L_{S2} – $I_{p\lambda 2}$. Нехай $I_{p\lambda 1} = I_{p\lambda 2}$.

Крім того, нехай джерело світла L_{S0} конструктивно реалізовано як пристрій вертикального променя, а джерело світла L_{S1} , L_{S2} – у вигляді двох пристроїв бокового променя (ПБП), кожен ПБП містить вузол освітлення L_{S12} , від якого пучок паралельних променів потрапляє на плоске дзеркало M_1 , (M_2) і відбивається з напрямком L_1 (L_2) на поверхню дослідного зразка. Зауважимо, що вузол освітлення L_{S12} спільний, крім того на рис. 1 вузол освітлення L_{S12} подано спрощено. Детальніший опис елементів ПБП наведено далі.

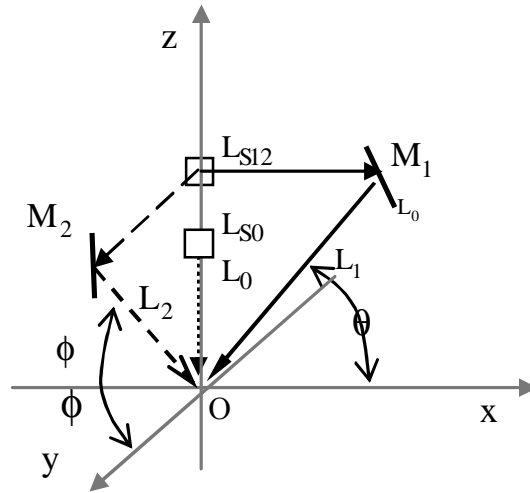


Рис. 1. Геометрична інтерпретація схеми освітлення джерелами світла (L_{S0}, L_{S12}) у тривимірному просторі відносно точки O поверхні

Отриману систему трьох рівнянь з невідомими параметрами k_d та p , q , виконавши алгебраїчні перетворення, трансформуємо у таку форму:

$$p = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} - \frac{h_1}{L_{x1e}}, \quad (6)$$

де $\eta_1 = k \frac{I_{\lambda 1} - I_a}{I_{\lambda 0} - I_a}$, тут $k = \frac{I_{p\lambda 1}}{I_{p\lambda 0}} = \frac{I_{p\lambda 2}}{I_{p\lambda 0}}$.

$$q = \frac{L_{z2e}}{L_{y2e}} - \frac{h_2}{L_{y2e}}, \quad (7)$$

де $\eta_2 = k \frac{I_{\lambda 2} - I_a}{I_{\lambda 0} - I_a}$.

Щоб спростити реконструкцію та, як показано далі, підвищити точність реконструкції, приймаємо, що

$$k = L_{z1e} = L_{z2e}. \quad (8)$$

Внаслідок цього реконструкція (6) набуде такого вигляду

$$p = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} dI_{101}, \quad (9)$$

де

$$dI_{101} = \frac{I_{10} - I_{11}}{I_{10} - I_a}. \quad (10)$$

Крім того, з виразів (8) з (4) отримуємо

$$L_{x1e} = L_{y2e} . \quad (11)$$

З використанням (8) і (11) реконструкція (7) матиме вигляд

$$q = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} dI_{102} , \quad (12)$$

де

$$dI_{102} = \frac{I_{10} - I_{12}}{I_{10} - I_a} . \quad (13)$$

Отже, у випадку $I_{\lambda 0} \gg I_a$ реконструкція (9) і (12) виконується на основі зважених відносних похибок зображень. За рахунок використання диференціального каскаду вплив фону в (10), (13) зменшено.

Оскільки напрямки освітлення L_0, L_1, L_2 (4) технологічно заплановані, то на основі їх компонент виконується реконструкція (9) і (12). Разом з напрямками освітлення у формуванні реконструкції (9) і (12) беруть участь технологічно заплановані інтенсивності джерела освітлення $I_{p\lambda 0}, I_{p\lambda 1}$.

4. Похибка визначення похідних поверхні

На практиці під час знімання виникають відхилення від напрямків освітлення (4). Тому на першому етапі аналізу точності реконструкції на основі тріади 2D зображень доцільно розглянути похибку, яка індукована відхиленням першого бокового напрямку освітлення

$$\mathbb{L}_1^0 = (\mathbb{L}_{x1}^0, \mathbb{L}_{y1}^0, \mathbb{L}_{z1}^0) \quad (14)$$

від технологічно запланованого L_1 для відеознімання зображення $I_{\lambda 1}$. На другому етапі аналізу точності доцільно розглянути похибку, яка індукована відхиленням другого бокового напрямку освітлення

$$\mathbb{L}_2^0 = (\mathbb{L}_{x2}^0, \mathbb{L}_{y2}^0, \mathbb{L}_{z2}^0) \quad (15)$$

від технологічно запланованого L_2 для відеознімання зображення $I_{\lambda 2}$.

Зауважимо, що за рахунок змін напрямку освітлення \mathbb{L}_1^0 зображення $I_{\lambda 1}(L_1)$ спотворюється і стає $I_{\lambda 1}(\mathbb{L}_1^0)$, а за рахунок змін напрямку освітлення \mathbb{L}_2^0 зображення $I_{\lambda 2}(L_2)$ спотворюється і стає $I_{\lambda 2}(\mathbb{L}_2^0)$. Тому реконструкція похідної p (9) змінюється лише за рахунок зміни параметра $\eta_1(I_{\lambda 1}(\mathbb{L}_1^0))$, а реконструкція похідної q (12) змінюється лише за рахунок зміни параметра $\eta_2(I_{\lambda 2}(\mathbb{L}_2^0))$.

Розглянемо похибку реконструкції похідної p , яка індукована відхиленням першого бокового напрямку освітлення \mathbb{L}_1^0 (14).

Для векторів L_1, \mathbb{L}_1^0 скористаємось описом, який відповідає використанню поверхні сфери $x^2 + y^2 + z^2 = 1$, з центром у досліджуваній точці O . Досліджувана точка розміщена у центрі координат. Для поверхні $z = \sqrt{1 - x^2 - y^2}$ можна визначити похідну $P = \frac{\partial z}{\partial x} = -\text{ctg}\theta$, де θ – кут напрямку світла в площині XOZ , а також можна визначити похідну $Q = \frac{\partial z}{\partial y} = -\text{ctg}\varphi$, де φ – кут напрямку світла в площині YOZ . На основі цього опис вектора \mathbb{L}_1^0 набирає форми

$$\mathbb{L}_1^0 = \left(\frac{-P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + 1}}, \frac{-Q}{\sqrt{P^2 + Q^2 + 1}}, \frac{1}{\sqrt{P^2 + Q^2 + 1}} \right) . \quad (16)$$

Використавши (16) для технологічно запланованого L_1 , який визначено в точці з $P=P_e$, $Q=Q_e=0$, одержимо такий вираз

$$L_1 = \left(\frac{-P_e}{\sqrt{P_e^2 + 1}}, 0, \frac{1}{\sqrt{P_e^2 + 1}} \right). \quad (17)$$

Тому зображення $I_{\lambda 1}$, а також величина $\delta I_{\lambda 01}$ є функцією параметрів P_e, Q_e . Внаслідок цього реконструкція похідної має вигляд

$$p = p(P_e, Q_e) = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} dI_{101}(P_e, Q_e).$$

За рахунок використання напрямку освітлення $\mathbb{P}_1 = \mathbb{P}_1(P, Q)$ (16) зображення $I_{\lambda 1}$ стає функцією параметрів P, Q , внаслідок чого реконструкцію похідної можна записати так

$$p(P, Q) = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} dI_{101}(P, Q). \quad (18)$$

Застосуємо для оцінки точності реконструкції p розклад функції (18) в ряд Тейлора

$$\begin{aligned} p(P, Q) &= p(P_e, Q_e) + (P - P_e) \frac{\partial p(P, Q_e)}{\partial P} \Big|_{P=P_e} + \\ &+ (Q - Q_e) \frac{\partial p(P_e, Q)}{\partial Q} \Big|_{Q=Q_e} + (P - P_e)^2 \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 p(P, Q_e)}{\partial P^2} \Big|_{P=P_e} = \\ &= (Q - Q_e)^2 \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 p(P_e, Q)}{\partial Q^2} \Big|_{Q=Q_e} + \frac{1}{2!} (P - P_e)(Q - Q_e) \frac{\partial^2 p(P, Q)}{\partial P \partial Q} + \dots \end{aligned} \quad (19)$$

Аналіз точності виконується з параметром $Q_e = 0$. Для оцінки $p = p(P, Q)$ (18) у результаті його диференціювання та підставлення компонент вектора N (2) отримуємо

$$\left[\frac{\partial p(P, 0)}{\partial P} \right]_{P=P_e} = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} \frac{P_e - p}{(P_e^2 + 1)^{3/2}}. \quad (20)$$

Для оцінки $p = p(P, Q)$ (19) диференціюванням (18) аналогічно знаходимо

$$\left[\frac{\partial p(P_e, Q)}{\partial Q} \right]_{Q=0} = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} \frac{-q}{\sqrt{1 + P_e^2}}. \quad (21)$$

Нехтуючи у виразі (19) малими членами, отримуємо наближення розвинення у ряд Тейлора, з якого, з використанням підставлення (20), (21), визначимо загальну оцінку точності реконструкції горизонтальної похідної

$$\Delta p_{PQ} = p(P_e, 0) - p(P, Q) = \Delta p_P + \Delta p_Q, \quad (22)$$

у якій похибки

$$\Delta p_P = (P_e - P) \left[\frac{\partial p(P, 0)}{\partial P} \right]_{P=P_e}, \quad (23)$$

$$\Delta p_Q = -Q \left[\frac{\partial p(P_e, Q)}{\partial Q} \right]_{Q=0}. \quad (24)$$

Продовжимо аналіз точності реконструкції похідної p з параметром $P_{e1} = -1$. Підставивши $P_e = -1$ в (17) і (9), (12), отримаємо

$$p = dI_{101}, \quad (25)$$

$$q = dI_{102}. \quad (26)$$

Отже, реконструкцію формально визначено як відносні похибки зображень.

Підставивши $P_e = -1$ в (17) в (20) і (21), отримаємо

$$\left[\frac{\partial p(P, 0)}{\partial P} \right]_{P=P_e} = -\frac{1+p}{2\sqrt{2}}, \quad (27)$$

$$\left[\frac{\partial p(-1, Q)}{\partial Q} \right]_{Q=0} = -\frac{q}{\sqrt{2}}. \quad (28)$$

На основі (22) з урахуванням (27) і (28) визначимо відносну похибку обчислення горизонтальної похідної

$$dp = dp_p + dp_Q, \quad (29)$$

де

$$dp_p = \frac{(1+P)(1+p)}{2\sqrt{2}p}, \quad (30)$$

$$dp_Q = Q \frac{q}{\sqrt{2}p}. \quad (31)$$

Якщо порівняти відносну похибку реконструкції δp за тріадою зображень [18] і відносну похибку реконструкції δp (29), то видно, що значення відносної похибки реконструкції δp (29) в $\frac{1}{\sqrt{2}}$ менше.

Розглянемо точність реконструкції, проаналізувавши похибку, викликану змінами напрямку L_2 . Використаємо для цього подібність співвідношень (9) та (12). На основі наведеної подібності, скориставшись підставленнями в (29) $p=q$, $q=p$, $P=Q$, $Q=P$, визначено відносну похибку розрахунку вертикальної похідної

$$dq = dq_Q + dq_p, \quad (32)$$

де

$$dq_Q = \frac{(1+Q)(1+q)}{2\sqrt{2}q}, \quad (33)$$

$$dq_p = P \frac{p}{\sqrt{2}q}. \quad (34)$$

Повернемося до розгляду похибки δp .

Для подальшого аналізу подамо похибки (30), (31) у такому вигляді

$$dp_p = \frac{P_0}{g_p}, \quad (35)$$

де $P_0 = 1+P$,

$$g_p = \frac{2\sqrt{2}p}{1+p}, \quad (36)$$

$$dp_Q = \frac{Q_0}{g_Q}, \quad (37)$$

де

$$g_Q = \frac{p}{\sqrt{2}q}. \quad (38)$$

У такій формі похибки формально подібні. Тому необхідно та достатньо виконати аналіз точності для однієї з них. Здійснимо цей аналіз для похибки δp_Q . За умовами тривимірної реконструкції маємо заплановане номінальне значення параметра Q_0 $Q_{0e} = 0$. Нехай задано абсолютну похибку визначення параметра Q_0 як відхилення від запланованого номінального значення $\pm \Delta Q$, тобто

$$-\Delta Q \leq Q_0 \leq \Delta Q. \quad (39)$$

Отже, знак похибки δp_Q (37) формується спільно параметрами Q_0, g_Q .

Нехай задано кількісну оцінку точності реконструкції горизонтальної похідної як умову реконструкції

$$-dp_{Q_0} \leq dp_Q \leq dp_{Q_0}.$$

Розглянемо таку умову реконструкції з підставленням δp_Q (37)

$$-dp_{Q_0} \leq \frac{Q_0}{g_Q} \leq dp_{Q_0}. \quad (40)$$

Залежно від знака похибки δp_Q розглянемо чотири випадки виконання умови (40).

У першому випадку нехай $Q_0 = \Delta Q$ і $g_Q > 0$. Внаслідок цього права частина умови (40) трансформується у таку умову

$$\Delta Q \leq g_Q dp_{Q_0}. \quad (41)$$

У другому випадку нехай $Q_0 = -\Delta Q$ і $g_Q < 0$. Внаслідок цього права частина умови (40) трансформується у таку умову

$$-\Delta Q \geq dp_{Q_0} g_Q. \quad (42)$$

У третьому випадку нехай $Q_0 = \Delta Q$ і $g_Q < 0$, тоді ліва частина умови (40) трансформується в умову (42).

У четвертому випадку нехай $Q_0 = -\Delta Q$ і $g_Q > 0$, тоді ліва частина умови (40) трансформується в умову (41).

Отже, коли задані відносна похибка δp_{Q_0} та абсолютна похибка $\pm \Delta Q$ для встановлення належності точки (p, q) до робочих діапазонів реконструкції, необхідно і достатньо визначити параметр $g(p, q)$ і проаналізувати, чи виконується одна з умов (41) або (42).

Зауважимо, що коли задано абсолютну похибку визначення параметра $P \pm \Delta P$ як відхилення від запланованого значення $P_e = -1$, то

$$-1 - \Delta P \leq P \leq -1 + \Delta P. \quad (43)$$

Тоді фактично задана абсолютна похибка визначення параметра $P_0 = 1 + P$

$$-\Delta P \leq 1 + P \leq +\Delta P. \quad (44)$$

Враховуючи (44), використовуючи отримані результати (41), (42), (39) та застосовуючи підставлення $P=Q$, отримуємо аналіз точності реконструкції, яка формується похибкою δp_P .

Зауважимо, що оскільки параметр g_P не залежить від похідної q , то на етапі кількісного аналізу виникає можливість простежити результати виконання умов (41), (42), використовуючи їх візуалізацію, не обмежуючись одним значенням абсолютної похибки $\pm \Delta P$ визначення параметра P_0 , а у діапазоні похибок $D_{\Delta P} = [\pm \Delta P_s, \pm \Delta P_s]$, до якого належить $\pm \Delta P$.

Виконаємо кількісну оцінку діапазонів реконструкції похідних p, q на основі умов (41) і (42) та абсолютної похибки параметра Q_0 (P_0) для конкретної системи реконструкції та конкретного макета бокового променя.

5. Система тривимірної реконструкції

Щоб з'ясувати практичні аспекти технологічної реалізації точності встановлення напрямку освітлення, розглянемо варіант системи тривимірної реконструкції за похибкою зображень (СТРПЗ) з такими технічними характеристиками:

1. Відносна похибка реконструкції горизонтальної похідної $\delta p_{P_0} = \pm 0,1$ під впливом параметра P_0 .
2. Відносна похибка реконструкції горизонтальної похідної $\delta p_{Q_0} = \pm 0,1$ під впливом параметра Q_0 .
3. Відносна похибка реконструкції вертикальної похідної $\delta q_{P_0} = \pm 0,1$ під впливом параметра P_0 .
4. Відносна похибка реконструкції вертикальної похідної $\delta q_{Q_0} = \pm 0,1$ під впливом параметра Q_0 .
5. Діапазон реконструкції горизонтальної похідної $D_p = [-0,97; 0,97]$.

б. Діапазон реконструкції вертикальної похідної $D_q = [-0,97; 0,97]$.

Зауважимо, що серед наведених технічних характеристик діапазони D_p , D_q є попередніми характеристиками і їх реальну конфігурацію необхідно кількісно визначити на основі виразів (41, 42)

Розглянемо варіант пристрою бокового променя в запропонованій СТРПЗ. Зауважимо, що ПБП, який формує напрямок освітлення L_1 (рис. 1), і ПБП, який формує напрямок освітлення L_2 , відрізняються лише початковим скеруванням променя джерела світла L_{S12} . Тому розглянемо лише один ПБП, який формує напрямок освітлення L_1 .

5.1. Пристрій бокового променя

ПБП, який формує напрямок освітлення L_1 (рис. 2), має такі конструктивні елементи: вузол освітлення, вузол формування напрямку освітлення, вузол екранування, дослідний зразок.

Вузол освітлення складається з джерела світла L_{S12} та плоского дзеркала M_0 . Важливим технічним завданням є наведення променя L_1 на дослідний зразок через отвори екранів. Адже внаслідок первинного неточного встановлення положення дзеркала M_0 і дзеркала M_1 виникають неточності відбиття, з'являється відхилення пучка променів від запланованого значення. Вузол формування напрямку освітлення складається з плоского дзеркала M_1 та регулятора орієнтації, монтування. Монтуванням змінюється напрям нормалі до поверхні дзеркала M_1 , що дає змогу змінювати напрям променя L_1 . Монтування дзеркала M_1 має дві взаємно перпендикулярні осі, поворот довкола яких дає можливість навести промінь L_1 практично на будь-яку ділянку екрана e_2 біля його отвору.

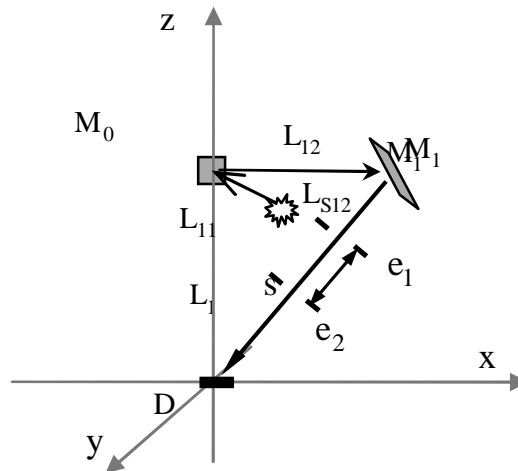


Рис. 2. Схематична дислокація елементів пристрою бокового променя

Вузол екранування містить два екрани; екран e_1 , екран e_2 . Відстань між екранами s , товщина екрана a .

ПБП має два режими: режим калібрування напрямку освітлення та режим освітлення.

У режимі калібрування встановлюється напрям освітлення із заданою точністю. У режимі освітлення проводиться освітлення дослідного зразка D і виконується відеознімання зображення $I_{\lambda 1}$. Вузол освітлення генерує пучок променів.

Джерело світла L_{S12} генерує пучок паралельних променів (схематично промінь L_{11}), який дзеркало M_0 відбиває (схематично промінь L_{12}) на плоске дзеркало M_1 . Зауважимо, що промені L_{11} та L_{12} належать площині, яка паралельна до площини XY .

Для встановлення режиму освітлення променів, відбитих від плоского дзеркала M_1 , використовують екрани e_1 та e_2 . Кожний екран має отвір розміром d . Ці отвори технологічно розташовані на прямій лінії, яка відповідає запланованому напрямку L_1 до площини дослідного зразка.

Монтуванням дзеркало M_1 спочатку обертом у площині XZ , а потім обертом у площині YZ встановлюють так, щоб промінь освітлення через отвір екрана e_2 падав на дослідний зразок D . Коли промінь через отвори екранів падає на дослідний зразок, то виконується умова перевірки напрямку освітлення. У площині XZ ця умова має вигляд

$$\Delta P \geq \frac{d}{s + 2a}. \quad (45)$$

У площині YZ умова перевірки набуває вигляду

$$\Delta Q \geq \frac{d}{s + 2a}. \quad (46)$$

ПБП має такі технічні характеристики:

1. Абсолютна похибка $\Delta P_0 = \pm 0,01$ визначення параметра P_0 .
2. Абсолютна похибка $\Delta Q_0 = \pm 0,01$ визначення параметра Q_0 .

Основні габаритні характеристики вузла екранування:

$s = 30$ см, $a = 0,5$ см.

Габаритну характеристику (розмір отвору d) визначимо з умов (45), (46), на основі наведених характеристик ПБП вона набуває такої форми

$$d \leq 3,1 \text{ mm}. \quad (47)$$

Приймаємо, що $d = 3$ mm.

Зауважимо, що практичну реалізацію вузла з екранами (рис. 2) можна точно проконтролювати з використанням сучасної виміральної техніки, зокрема кутомірів Мікротех.

Режим освітлення. Принцип роботи ПБП у режимі освітлення: після встановлення кута освітлення отвори екранів збільшуються, вузол освітлення генерує паралельний пучок променів, який падає на дослідний зразок D .

6. Кількісна оцінка робочих діапазонів реконструкції горизонтальної похідної

Знаючи першу та п'яту характеристики СТРПЗ, на основі (41), застосувавши підставлення $P=Q$, розрахуємо розподіл $\Delta P = P_0 \leq 0,1 \frac{2\sqrt{2}p}{1+p}$. Результати розрахунків показують, що в діапазоні значень горизонтальної похідної $[-0,0325, 0,0350]$ реконструкція відбувається з похибкою, яка перевищує задану відносну похибку $\delta_{r_{P_0}} = 0,1$.

На наступному етапі кількісного дослідження можливості обмежень діапазонів D_p і D_q , задаючи другу та п'яту характеристики СТРПЗ, діапазон D_q , розрахуємо розподіл

$$Q_0 = 0,1g_Q. \quad (48)$$

Спираючись на другу технічну характеристику ПБП, проаналізуємо виконання умови (41)

$$0,01 \leq Q_0, \quad (49)$$

та умови (42)

$$Q_0 \leq -0,01. \quad (50)$$

Результати розрахунків розподілу Q_0 з кількісним аналізом виконання умов (49) та (50) подано на рис. 3, де точки (p,q) , в яких можна реконструювати похідну p , коли виконується умова (49), представлено площиною $Q_0 = 0,01$, а точки (p,q) , в яких виконується умова (50), – площиною $Q_0 = -0,01$.

З рис. 3 видно, що між площинами, у яких реконструкція виконується із заданою точністю, є зони значень точок (p,q) , у яких точність реконструкції не відповідає заданій. Щоб краще

селектувати зони реконструкції з заданою точністю і заборонені зони реконструкції, розподіл відхилення Q_0 подано у бінарній формі на рис. 4.

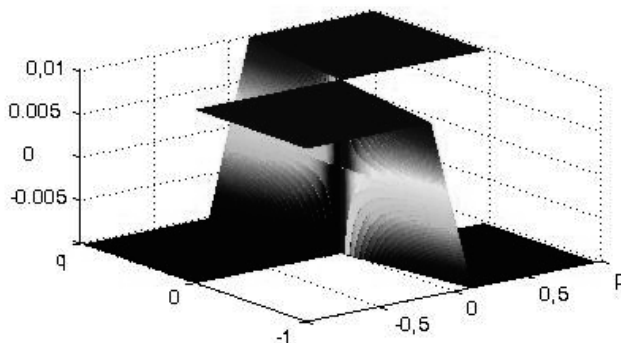


Рис. 3. Частково обмежений розподіл відхилення $Q_0(p, q)$

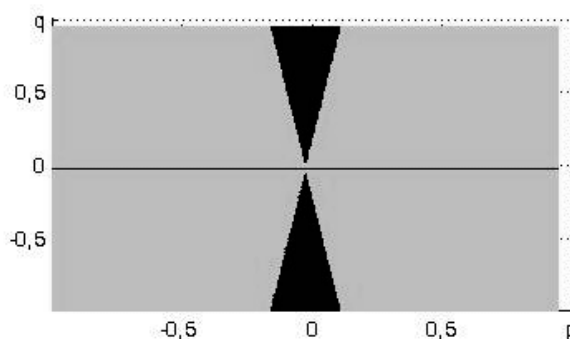


Рис. 4. Бінарний розподіл відхилення $Q_0(p, q)$

На рис. 4 точки, в яких можна реконструювати похідні p та q , зображено сірим кольором, а точки, в яких не можна реконструювати похідні p та q , чорним. З рис. 4, видно, що в околі $p=0$ діапазон реконструкції горизонтальної похідної D_p стає подвійним, а початковий діапазон реконструкції вертикальної похідної D_q звужується. Для кількісної оцінки пошкоджень діапазонів D_p , D_q розподіл похідних p та q у забороненій зоні подано на рис. 5.

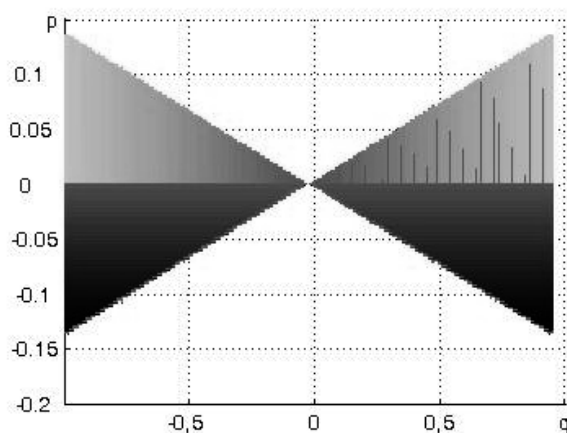


Рис. 5. Сегмент бінарного розподілу $Q_0(p, q)$, в якому є заборонена зона реконструкції

З рис. 5 видно, що діапазон реконструкції горизонтальної похідної D_p стає $D_{p-} = [-0,97; p_-]$, де $-0,13 \leq p_-(q) < 0$, $D_{p+} = [p_+; 0,97]$, де $0 \leq p_+(q) \leq 0,13$. Розширення діапазонів реконструкції відбувається за мінімального відхилення похідної q від 0, а екстремальне звуження діапазонів відбувається, коли $q = \pm 0,97$.

Також видно, що коли $-0,13 \leq p \leq 0,13$, початковий діапазон реконструкції вертикальної похідної D_q стає таким $D_{q-} = [-q_-; q_-]$, де $q_-(p) < 0,97$. Екстремальне звуження діапазону D_{q-} відбувається, коли $p \rightarrow 0$.

Отже, встановлено, що за запланованих першої та другої технічних характеристик завдяки появі забороненої зони реконструкції заплановані діапазони реконструкції D_p , D_q зменшуються.

З виразів (48). (49) та (50) видно, що за фіксованої другої технічної характеристики СТРПЗ для розширення діапазонів реконструкції доцільно додатково зменшити абсолютну похибку ΔQ_0 . Один з варіантів практичної реалізації такої операції полягає у збільшенні відстані s . У цьому випадку габарити приладу зростають, а також необхідні додаткові технологічні зусилля для корекції точності розташування напрямків освітлення.

Отже, розраховані похибки визначення горизонтальних похідних досліджуваної поверхні зумовлені відхиленням напрямку освітлення L_0 .

Зауважимо, що подібність співвідношень похибок реконструкції (30) та (33), а також співвідношень похибок (31) та (34) дає змогу використати подані результати з використанням підставлень $q = p$, $p = q$, $P_0 = Q_0$ для кількісної оцінки робочих діапазонів реконструкції вертикальної похідної.

7. Зв'язок між параметрами тріщиностійкості та оцінками якості реконструкції похідних

Застосуємо отримані оцінки якості реконструкції похідних для оцінювання точності прогнозу тріщиностійкості. Опис зародження і росту втомної тріщини та впливу її параметрів на тріщиностійкість наведено у працях [3, 19, 20]. Для встановлення зв'язку між параметрами тріщиностійкості та отриманими оцінками якості реконструкції похідних застосуємо поетапний підхід з розв'язанням цієї задачі за чотири етапи.

1. Нехай на поверхні досліджуваної пластини виникла тріщина типу "розрив" [3], внаслідок того, що пластину розтягнуто у випробувальній машині ортогональним до ходу тріщини навантаженням σ . У цьому випадку поле напружень визначається коефіцієнтом інтенсивності напружень [3]

$$K_s = 1,12s \sqrt{p z_{\max}}, \quad (51)$$

де z_{\max} – довжина тріщини, що являє собою максимальну відстань від краю до дна тріщини. Після досягнення K_{σ} критичного значення (константа матеріалу) відбувається руйнування. З виразу (51) випливає, що точність прогнозу тріщиностійкості визначається відносною похибкою обчислення коефіцієнта інтенсивності напружень

$$dK_s = \frac{dz_v}{2}, \quad (52)$$

де

$$dz_v = \frac{\Delta z_{\max}}{z_{\max}}$$

– відносна похибка розрахунку довжини тріщини, яка виникає унаслідок неточності 3D реконструкції довжини тріщини (де Δz_{\max} – абсолютна похибка реконструкції довжини z_{\max}).

2. Визначимо загальну оцінку відносної похибки розрахунку довжини тріщини на основі параметрів тривимірної реконструкції та аналізу точності тривимірної реконструкції.

2.1. Визначимо довжину тріщини. Нехай маємо тріщину типу “розрив” [3]. Хід цієї тріщини у площині XOY має напрям h , а α – кут напрямку h в площині XOY. Зауважимо, що для оцінки довжини тріщини z_{\max} її можна подати перерізом у площині XOZ або перерізом у площині YOZ. Коли $\alpha \rightarrow \frac{\pi}{2}$, то тріщина наближена до вертикальної тріщини, в якій $q \rightarrow 0$. В цьому випадку тріщину доцільно описувати перерізом у площині XOZ. Коли $\alpha \rightarrow 0$, то тріщина наближена до горизонтальної тріщини, в якій $p \rightarrow 0$. У такому разі тріщину доцільно описувати перерізом у площині YOZ. Якщо $\frac{3\pi}{4} > \alpha > \frac{\pi}{4}$, то тріщина має виразніші ознаки вертикальності. Для іншого кута α тріщина має виразніші ознаки горизонтальності. Для випадку, коли домінують ознаки вертикальної тріщини, подамо аналітичну модель перерізу тріщини $z_{Cr}(x, y)$, де $y=0$ у площині XOZ у такій формі

$$z_{CrP}(x, 0) = \begin{cases} -z_{\max} + \begin{cases} -k(x - x_v), & x_e \leq x \leq x_v \\ k(x - x_v), & x_r \geq x > x_v \\ 0, & x_e > x \cup x > x_r \end{cases} \rightarrow p = \begin{cases} -k \\ k \\ 0 \end{cases}, \end{cases} \quad (53)$$

де $x_e = -x_s + x_v$, $x_r = x_s + x_v$, тобто тріщина симетрична. На основі (53) визначимо довжину тріщини як

$$z_{\max} = \int_{x_v}^{x_r} p dx = p(x_r - x_v). \quad (54)$$

2.2. Визначимо оцінку точності реконструкції глибини тріщини на основі абсолютної похибки горизонтальної похідної Δp_{PQ} , одержаної з виразу (22)

$$\Delta z_{\max} = \int_{x_v}^{x_r} \Delta p_{PQ} dx = (\Delta p_P + \Delta p_Q)(x_r - x_v). \quad (55)$$

2.3. На основі (54) та (55) визначимо загальну оцінку точності реконструкції довжини тріщини (52)

$$dz_v = dp_P + dp_Q, \quad (56)$$

де dp_P описується виразом (30), а dp_Q – виразом (31).

3. Для прогнозу тріщиностійкості запропоновано використовувати СТРПЗ, яка на основі технічних характеристик $\delta p_{P0} = \pm 0,1$, $\delta p_{Q0} = \pm 0,1$, набуває такого значення

$$dz_v = \pm 0,2. \quad (57)$$

На основі цього точність прогнозу тріщиностійкості становить $\delta K_{\sigma} = \pm 0,1$.

4. На основі аналізу точності тривимірної реконструкції (див. рис. 4, рис. 5), та використання СТРПЗ з похибкою (57) дозволяється здійснювати реконструкцію з гарантованими похибками у діапазонах D_p , D_q , з яких вилучена заборонена зона їх реконструкції.

Висновки

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше розглянуто задачу тривимірної реконструкції поверхні за тріадою двовимірних зображень у формі обчислення відносних похибок зображень. Запропоновано алгоритм реконструкції поверхні та розраховано точність його роботи для випадку неконтрольованих змін двох бокових напрямків освітлення відеознімання. Аналітично знайдено похибки визначення похідних досліджуваної поверхні, зумовлені відхиленням бокового напрямку освітлення від технологічно запланованого значення у площині XZ та YZ. На їх основі розраховано похибки визначення горизонтальної та вертикальної похідних поверхні досліджуваного об'єкта, два діапазони 3D реконструкції значень горизонтальної та вертикальної похідних, а також запропоновано рекомендації щодо встановлення експлуатаційних меж кутових відхилень бокового напрямку освітлення від технологічно запланованого значення.

Практична цінність роботи полягає в тому, що запропонована система реконструкції дасть змогу на основі тріади зображень отримувати тривимірну інформацію про поверхню матеріалів, які досліджуються, у цьому випадку про тріщини типу «розрив». Для системи реконструкції встановлено рівень похибок похідних векторів нормалі та глибини і для заданої точності наведено відповідні програмно розраховані діапазони реконструкції похідних векторів нормалі. В перспективі отримані результати, якщо дію запропонованого методу поширити на реконструкцію тріщин з реальних металографічних зображень поверхонь, дадуть змогу здійснювати прогноз тріщиноздатності конструкції з гарантовано встановленою точністю, уникаючи заборонених зон реконструкції похідних векторів нормалі.

1. Sharland S. M. *A review of the theoretical modeling of crevice and pitting corrosion Corrosion Science* 1987. Vol. 27. N 3. – P. 289–323. 2. Marcus P. *Corrosion mechanisms in theory and practice 2nd Edition* – 2002 – New York, Technology & Engineering – 742 p. 3. Броек. Д. *Основы механики разрушения.* / Д. Броек. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с. 4. Liu Y., Su X. and Zhang Q. *A novel encoded-phase technique for phase measuring profilometry* // *Opt. Express* 19(15), 2011. – P. 14137–14144. 5. Zhang Q., Su X., Xiang L. and Sun X. *3-D shape measurement based on complementary gray-code light*, *Opt. Lasers Eng.*, vol. 50, 2012. – P. 574–579. 6. Zhang S., Van Der Weide D. and Oliver J. *Superfast phase-shifting method for 3-D shape measurement*, *Opt. Express* vol. 18, No. 9, 2010. P. 9684–9689. 7. Woodham R. J. *Photometric method for determining surface orientation from multiple images* *Optical Engineering*. 1980. – 19(1). – P. 139–144. 8. Maria E. Angelopoulou, Maria Petrou *Evaluating the effect of diffuse light on photometric stereo reconstruction* *Machine Vision and Applications*. 2014, Vol. 25, Issue 1. – P. 199–210. 9. Yoshizawa, T. *Handbook of Optical Metrology - principle and applications* – CRC Press, New York 2009.– 744 p. 10. Zhang S. *High-resolution 3-D profilometry with binary phase-shifting methods*, *Appl. Opt.*50(12), 2011 P.1753–1757. 11. Sudipta N. Sinha, D. Scharstein, R. Szeliski. *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. 12. Richard Szeliski. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer, New York, 2010. – 655 P. 13. *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. 14. *Оцінка глибини тріщини за тріадою зображень.* / Б. П. Русин, В. Г. Іванюк, О. В. Капуй, Н. П. Ануфрієва // *Радіоелектроніка і інформатика*. – 2010. – № 2. – С. 70–78. 15. J. H. Lambert. *Photometria, sive de Mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae* / *sumptibus viduae E. Klett*, 1760. 16. Shintaro Watanabe, Koji Miyajima *Detecting Building Changes Using Epipolar Constraint From Aerial Images Taken At Different Positions* // *ICIP 2001*. – 2001. – P. 201–204. 17. Смирнов В. И. *Курс высшей математики. Т. 1.* – М.: Наука, 1967. – 480 с. 18. tool@microtech-ua.com. 19. Wood W. A. *Recent observations on fatigue fracture in metals*, / W. A. Wood // *ASTM STP 237*, 1958. – P. 110–121. 20. Tetelman A. S. *Fracture of structural materials* / A. S. Tetelman, A. J. McEvily // *John Wiley*. – 1967. – 697 p.