ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК.383.8:621.396.96:621.396.6

ОЦІНКА ГЛИБИНИ ТРІЩИНИ ЗА ЇЇ СТЕРЕОЗОБРАЖЕННЯМ НА ОСНОВІ ЛАМБЕРТІВСЬКОЇ МОДЕЛІ ВІДБИТТЯ

ГРАБОВСЬКА Н.Р., РУСИН Б.П., ІВАНЮК В.Г.

Розглядається задача тривимірної реконструкції поверхні за двома двомірними зображеннями з метою застосування результатів її розв'язку при аналізі зображень матеріалів з тріщинами. Пропонується новий метод визначення глибини тріщини на основі аналізу двох двовимірних зображень на базі ламбертівської моделі відбиття світла. Результати роботи реалізованого алгоритму демонструються на прикладі тестового зображення.

1. Вступ

Один із методів неруйнівного контролю елементів газопроводів [1–4] пов'язаний з дослідженням металографічних зображень, на яких зафіксовано стан поверхні елементів окремих його ділянок [5–9]. Як правило, в результаті обстеження газопроводу одержуємо великі масиви зображень з тріщинами. В цьому випадку адаптація та застосування сучасних методів тривимірної реконструкції зображень до конкретних задач металографії дають можливість отримати більше інформації про об'єкти досліджуваної сцени, зокрема про тривимірну їх структуру, а також оцінити глибину тріщини за її двовимірними зображеннями. що дуже важливо для прогнозування тріщиностійкості елементів газопроводів [3]. В даній статті розглядається проблема оцінки довжини тріщини (максимальної глибини тріщини в тривимірному просторі) за її двовимірними зображеннями.

Одним з методів отримання тривимірної форми предмету на основі аналізу його зображень є класична стереореконструкція [10]. Ця 3D реконструкція реалізується відносно нескладною установкою, та має задовільну швидкість реконструкції, що дозволяє використовувати її для напівавтоматичного обстеження поверхні конструкцій, зокрема газопроводів. Проте така реконструкція в деяких випадках може виявитись ускладненою, оскільки при практичному використанні даний метод тривимірної реконструкції має ряд обмежень, які впливають на точність отримання кінцевого результату. В першу чергу обмеження методу викликане присутністю на поверхні дефекту компонентів, які мають дзеркальне відбиття. Присутність дзеркального відбиття на стереозображеннях порушує погодження зображень, а отже, блокує тривимірну реконструкцію. Для роботи в таких умовах запропоновано модернізацію класичної стереореконструкції [11].

Ще один очікуваний збій тривимірної реконструкції за стереозображенням пов'язаний з виникненням ситуації, коли на одному з зображень стереопари присутня значна зона загороджених пікселів. Для роботи в таких умовах доцільно використати комплексний метод 3D реконструкції поверхні. В цьому методі за межами зони загороджених пікселів тривимірна реконструкція виконується як класичне відновлення за стереозображенням, а в межах зони загороджених пікселів вона виконується альтернативним методом. Для спрощення технічної реалізації доцільно застосувати такий метод 3D реконструкції, який усуває дзеркальні компоненти [11]. Зокрема йдеться про використання стереоосвітлення при відеозйомці зображень.

Мета дослідження – розробити метод та алгоритм неруйнівного контролю стану поверхні, ураженої тріщинами, і зокрема тривимірно реконструювати тріщину та оцінити її глибину за результатами аналізу пари цифрових зображень її поверхні.

2. 3D реконструкція дифузного об'єкта за парою зображень

Розглянемо використання стереоосвітлення, яке запропоновано в роботі [11] у альтернативному методі тривимірній реконструкції. Нехай під час відеозйомки дислокація камери фіксована та спочатку застосовано джерело світла $L_0 = (L_{x0}, L_{y0}, L_{z0})$, а потім $L_1 = (L_{x1}, L_{y1}, L_{z1})$. З таким змінним освітленням дифузного об'єкта відеозйомкою отримується два зображення [12]:

$$I_{\lambda j} = I_a + I_{p\lambda} k_d (L_{xj} N_x + L_{yj} N_y + L_{zj} N_z), \qquad (1)$$

де $j = 0,1$, I_a – інтенсивність розсіяного світла; $I_{p\lambda}$ – інтенсивність джерела освітлення; k_d – дифузний коефіцієнт, який визначає рівень дифузного відбиття досліджуваної точки поверхні; $N = (N_x, N_y, N_z)$ – 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. Оскільки інтенсивність джерела освітлення $I_{p\lambda}$ є стала величина, то рівняння (1) є функціями чотирьох невідомих p, q, k_d та I_a.

Щоб усунути залежність від параметра I_a, визначимо його експериментально, затінюючи зразок з дефектом. Затінення формується за допомогою прямокутника, просторове положення якого над зразком, а отже, і положення тіні, визначає система обробки. Використовуючи базове зображення $I_{\lambda 0}$ зі штучним затіненням, можна визначити інтенсивність фону I_a і звести систему (1) до трьох невідомих.

Щоб спростити систему (1), застосуємо джерело світла з такими параметрами, що $L_0 = (0,0,1)$.

Для вектора L_1 скористаємось описом [13]

$$L_1 = (\frac{-P}{\sqrt{P^2+Q^2+1}}, \frac{-Q}{\sqrt{P^2+Q^2+1}}, \frac{1}{\sqrt{P^2+Q^2+1}}),$$

де $P = -\mathrm{ctg}\theta$, тут θ – кут напрямку світла в площині XOZ, $Q = -\mathrm{ctg}\varphi$; φ – кут напрямку світла в площині YOZ. Нехай $\theta = \frac{\pi}{3}, \varphi = \frac{\pi}{3}$. В цьому випадку

$$L_1 = (L_{x1}, L_{y1}, L_{z1}) = (0,45, 0,45, 0,77).$$

Врахувавши одержані вектори L_0, L_1 в системі рівнянь (1), алгебраїчними перетвореннями трансформуємо цю систему у таку форму:

$$p = -q - b, \tag{2}$$

$$q^2 + bq + c = 0, \tag{3}$$

де $b = \frac{1}{L_{x1}}[\frac{I_{\lambda 1} - I_a}{I_{\lambda 0} - I_a} - L_{z1}]$, $c = \frac{b^2+1}{2} - \frac{\iota^2}{2(I_{\lambda 0} - I_a)^2}$,

тут $\iota = I_{p\lambda} k_d$ – зважений дифузний коефіцієнт. Для його визначення використаємо точку поверхні, в якій має місце $q(x_O, y_O) = p(x_O, y_O) = 0$. До таких точок належать точки екстремумів і площини. Використовуючи таку точку та її властивість у виразі (1), отримуємо $\iota = I_{\lambda 0}(x_O, y_O) - I_a$.

За одержаними виразами (2), (3) можна реконструювати похідні p, q, що програмно реалізуються засобами МАТЛАБ. Як досліджуваний об'єкт реконструкції по зображеннях поверхневу тріщину. В процесі реконструкції доцільно сфокусувати увагу на параметрах, які є важливі для прогнозу тріщиностійкості.

3. Аналітична модель тріщини

Розв'язок поставленої задачі пропонуємо почати з запровадженням такої аналітичної моделі тріщини

$$z(x,y) = \begin{cases} -z_{max} + \begin{cases} -P, & (-x_s + a) \le x \le a; \\ P, & (x_s + a) \ge x > a; \end{cases} \\ 0, \qquad (x_s + a) < x,\ (-x_s + a) > x, \end{cases} \tag{4}$$

де z_{max} – довжина тріщини, яка представляє собою максимальну відстань від краю до дна тріщини; $(-x_s + a)$, $(x_s + a)$ – крайні точки тріщини, $a = \eta y + b$ – зміщення тріщини; $P = kx + k\eta y + kb$ – площина, яка визначається похідними $p = k$, $q = k\eta$. Видно, що у розкритті це тріщина з V-подібним профілем . Зауважимо, що в точках, де аналітична модель (4) є непридатною до визначення похідної p або q, невизначеність буде знята при накладенні умов дискретизації по координатах x та y.

Щоб з'ясувати параметричну залежність параметрів тріщин при прогнозуванні тріщиностійкості, розглянемо один із варіантів моделі (4), коли a=0. Це вертикальна тріщина, яка є незмінною на деякому відрізку. $y \in [y_s, y_e]$, Нехай вертикальна тріщина розміщена на поверхні досліджуваної пластини, яку разтягнено у випробувальній машині горизонтальним навантаженням σ. В цьому випадку поле напружень визначається коефіцієнтом інтенсивності напружень [3]

$$K_\sigma = 1,12\sigma\sqrt{\pi z_{max}}.$$

При досягненні K_σ критичного значення (константа матеріалу) здійсниться руйнування. За рахунок неточності 3D реконструкції виникає відносна похибка визначення коефіцієнта інтенсивності напружень

$$\delta K_\sigma = \frac{\delta z_V}{2}. \tag{5}$$

З виразу (5) видно, що точність прогнозу тріщиностійкості визначається відносною похибкою розрахунку довжини тріщини

$$\delta z_V = \frac{\Delta z_{max}}{z_{max}}, \tag{6}$$

де Δz_{max} – абсолютна похибка реконструкції довжини z_{max}.

4. Комп'ютерне моделювання зображення тріщини

Перехід до дискретизаційних координат $\{i,k\}$ і обмежений діапазон значень поверхні z_{ik} дозволяють:

– штучно створити модель тріщини z_{ik};

– на основі масиву z_{ik} визначити масиви похідних p_{ik}, q_{ik}.

Виконання попередніх умов є підгрунтям до дискретного запису зображень $I_{\lambda 0} = I_{\lambda 0}(p_{ik}, q_{ik})$, $I_{\lambda 1} = I_{\lambda 1}(p_{ik}, q_{ik})$. Зауважимо, що на стадії комп'ютерного моделювання нехтуємо значенням інтенсивності фону I_a, а також додатково приймаємо, що дифузний коефіцієнт k_d є незмінним для змодельованого зразка з тріщиною z_{ik}. Крім того, не враховуватимемо вплив операціїй квантування. На додаток зауважимо, що вплив точності встановлення напрямків світла L_0, L_1 в зображеннях (1) на реконструкцію на даному етапі не враховано.

5. Реконструкція висоти поверхні

Визначимо оцінки похідних p і q на основі інформації про зображення $I_{\lambda 0}, I_{\lambda 1}$ та користуючись (2), (3). Шляхом інтегрування виконаємо остаточну 3D реконструкцію глибини тріщини.

Перед початком комп'ютерної реконструкції висоти поверхні в системі обробки отримано оцінку похідних вектора нормалі поверхні у вигляді масивів $\underline{p}_{ik}$, $\underline{q}_{ik}$, $\forall i = \overline{1, I}$; $\forall k = \overline{1, K}$. Зауважимо, що реконструкція похідних отримана з абсолютними похибками

$$\Delta p_{ik} = \underline{p}_{ik} - p_{ik}, \quad \Delta q_{ik} = \underline{q}_{ik} - q_{ik}. \qquad (7)$$

Якщо прийняти за опорну точку початок координат, реконструйована глибина тріщини набуде значення

$$\underline{z}_{ik} = \underline{z}_{1k} + \Delta x \sum_{j=2}^{i} \underline{p}_{jk}, \qquad (8)$$

де $\underline{z}_{1k} = \Delta y \sum_{m=2}^{k} \underline{q}_{1m}$.

Таким чином, запропоновано метод реконструкції глибин зразка з тріщиною шляхом накопичення (8), який можна реалізувати програмно. Розглянемо оптимізаційні заходи покращення такої реконструкції.

6. Оцінка якості тривимірної реконструкції тріщини

Однією з очікуваних причин неякісної реконстркції металографічного зображення тріщини, яку потрібно враховувати, є завади, що вносить приймач зображення. Вони виникають через вплив неточності встановлення просторових параметрів положення джерела світла. Але на данному етапі досліджень приймемо, що процедура формування інтенсивності зображення тріщини (1) є ідеальна і не вносить спотворення. Оцінка глибини в значній мірі залежить від інтенсивністі фону та дифузного коефіцієнта відбиття поверхні. Але на данному етапі досліджень приймемо, що процедура визначення фону та дифузного коефіцієнта відбиття поверхні є ідеальна і також не вносить спотворення.

Ще однією очікуваною причиною неякісної реконстркції металографічного зображення тріщини є завади методу реконструкції.

Визначимо аналітично вплив завад методу на якість реконструкції глибини тріщини за парою зображень. Для цього необхідно акцентувати увагу на якість реконструкції довжини тріщини z_{max} (4).

6.1. Оцінка точності реконструкції глибини тріщини. Уточнення моделі тріщини

Користуючись виразом (8), оцінку глибини тріщини $\underline{z}_{ik}$ представимо у такій формі:

$$\underline{z}_{ik} = z_{ik} + \Delta z_{ik}, \qquad (9)$$

де

$$\Delta z_{ik} = \Delta z_{1k} + \Delta x \sum_{n=2}^{i} \Delta p_{nk} \qquad (10)$$

– абсолютна похибка реконструкції глибини. Перший доданок у виразі (10) приймає значення

$$\Delta z_{1k} = \Delta y \sum_{m=2}^{k} \Delta q_{1m}. \qquad (11)$$

Нехай у поверхні з тріщиною в точках $(1, m)$, $\forall m = \overline{2, K}$ є площина.

Для мінімізації похибок першого доданку (11) необхідно скоректувати реконструйовану вертикальну похідну $\underline{q}_{1k}$ систематичною похибкою Δq_{sis}:

$$\underline{q}_{1k,s} = \underline{q}_{1k} - \Delta q_{sis}, \qquad (12)$$

що змінить перший доданок так:

$$\Delta z_{1k,s} = \Delta y \sum_{m=2}^{k} (\Delta q_{1m} - \Delta q_{sis}).$$

Щоб розрахувати систематичну похибку Δq_{sis}, покладемо $\Delta z_{1k,s} = 0$, з чого одержуємо

$$\Delta q_{sis} = \frac{1}{k-1} \sum_{m=2}^{k} \Delta q_{1m}. \qquad (13)$$

Такий вигляд має оцінка систематичної похибки, розрахована по точках площини реального металографічного зображення, де присутні флуктуації поверхні. У ідеалізованому випадку площина не має флуктуацій поверхні., тому $\Delta q_{1m} = \Delta q_p$. З цього випливає, що $\Delta q_{sis} = \Delta q_p$.

Продовжимо розгляд похибки (10), припустивши, що корекцію проведено і перший доданок у (10) дорівнює нулю.

Розглянемо другий доданок у накопиченні (10), зробивши такі припущення:

– вертикальна координата k фіксована;

– в точках (i, k), $\forall i = \overline{2, i_l}$ маємо площину поверхні з тріщиною;

– в точках (i, k), $\forall i = \overline{i_{l+1}, i_r}$ існує поверхня тріщини.

Виберемо точку (i, k), в якій існує поверхня тріщини. В цьому випадку другий доданок (10) набуває форми

$$\Delta z_{ik} = \Delta z_{ik}' + \Delta z_{ik}'', \qquad (14)$$

де $\Delta z_{ik}' = \Delta x \sum_{j=2}^{i_l} \Delta p_{jk}$ – абсолютна похибка реконструкції глибини в точках площини;

$$\Delta z_{ik}'' = \Delta x \sum_{j=i_1+1}^{i} \Delta p_{jk}$$

– абсолютна похибка реконструкції глибини тріщини в точці (i,k).

Для мінімізації похибок першого доданку у виразі (14) необхідно скоректувати реконструйовану горизонтальну похідну $\underline{p}_{ik}$ систематичною похибкою Δp_{sis}:

$$\underline{p}_{ik,s} = \underline{p}_{ik} - \Delta p_{sis}, \qquad (15)$$

що змінить перший доданок так:

$$\Delta z_{ik,s}' = \Delta x \sum_{j=2}^{i_1} (\Delta p_{jk} - \Delta p_{sis}).$$

Щоб розрахувати систематичну похибку Δp_{sis}, покладемо аналогічно $\Delta z_{ik,s}' = 0$, з чого випливає

$$\Delta p_{sis} = \frac{1}{i_1 - 1} \sum_{j=2}^{i_1} \Delta p_{jk}.$$

Як було сказано раніше, такий вигляд має оцінка систематичної похибки, розрахована по точках площини реального металографічного зображення, де присутні флуктуації поверхні. У ідеалізованому випадку площина не має флуктуацій поверхні, тому $\Delta p_{jk} = \Delta p_p$, $\forall j = \overline{2, i_1}$ З цього випливає, що $\Delta p_{sis} = \Delta p_p$.

Продовжимо розгляд похибки (14), припустивши, що корекцію (15) проведено і перший доданок у (14) дорівнює нулю.

Нехай в точці (i_V, k) маємо вістря тріщини, в якому $z_{i_v k} = -z_{max}$. В цьому випадку (14) набуває форми

$$\Delta z_{max} = \Delta x \sum_{j=i_1+1}^{i_V} (\Delta p_{jk} - \Delta p_{sis}) \qquad (16)$$

– абсолютна похибка розрахунку довжини тріщини.

Нехай проведено реконструкцію поверхні тріщини (4). В цьому випадку

$$\underline{p}_{ik} = -p, \quad \Delta p_{ik} = \Delta p, \quad \forall i = \overline{i_{1+1}, i_r}.$$

З врахуванням сказаного вираз (16) спрощується:

$$\Delta z_{max} = \Delta x(\Delta p - \Delta p_p)(i_v - i_1 - 1), \qquad (17)$$

а також спрощується вираз (8):

$$z_{max} = -(p - \Delta p_p)\Delta x(i_v - i_1 - 1). \qquad (18)$$

Підставимо (17) та (18) у вираз (6), тоді відносна похибка розрахунку довжини тріщини (6) рівна

$$\delta z_V = -\frac{\Delta p - \Delta p_p}{p - \Delta p_p}. \qquad (19)$$

Оскільки похибка Δp_p визначається на площині, яка є незмінним елементом у будь-якої тріщини (4), то основну увагу в аналізі похибки δz_V слід зосередити на її залежності від параметрів $\Delta p, p$, які є специфічними для кожної тріщини (4). Використовуючи опис тріщини (4) та (19), можна ввести такий клас тріщин. У класі тріщин (4) кожна тріщина має похідну p, що належить діапазону $[0, p_s]$ з заданою точністю $\delta z_{V,MAX} \ge \delta z_V$. Якщо $p >> \Delta p_p$, то

$$\delta z_V \approx -\frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta p_p}{p}. \qquad (20)$$

Як бачимо, δz_V для кожної тріщини, яка належить класу тріщин (4), визначається відносною похибкою реконструкції горизонтальної похідної. Отриманий результат дозволяє здійснити наступне. Щоб визначити оцінку якості тривимірної реконструкції, замість класу тріщин (4) досліджувати одну модель тріщини, в якій забезпечили наявність горизонтальних похідних, що належать діапазону $[0, p_s]$ з заданою точністю $\delta z_{V,MAX} \ge \delta z_V$. Одним з можливих потенційних варіантів такої моделі тріщини є модель тріщини, яка у розкритті описується виразом

$$z = k(x+y)^2 - z_{max} \le 0,$$

де k =const. Видно, що у розкритті це тріщина з U-подібним профілем. Програмно реалізувати таку модель тріщини, розміщену у площині, можна згідно з виразом

$$Z = \frac{z - |z|}{2}. \qquad (21)$$

6.2. Оцінка якості тривимірної реконструкції тріщини

Роглянемо тривимірну реконструкцію тріщини та оцінку її якості.

Спочатку програмно за квадратним рівнянням (3) реконструюємо вертикальну похідну у вигляді двох масивів коренів $\underline{q}_{1,ik}$, $\underline{q}_{2,ik}$, а потім на основі цієї інформації за виразом (2) реконструюємо горизонтальну похідну у вигляді двох масивів $\underline{p}_{1,ik}$, $\underline{p}_{2,ik}$.

Для позначення параметрів: вертикальної похідної q_1, q_2, горизонтальної похідної p_1, p_2 та глибини z моделі тріщини (21) застосуємо $u \in \{p_n, q_n, z\}$, n=1,2. Для оцінки якості тривимірної реконструкції для параметра u знайдемо абсолютну похибку

$$\Delta u_{ik} = \underline{u}_{ik} - u_{ik} \qquad (22)$$

та відносну похибку

$$\delta u_{ik} = \frac{\Delta u_{ik}}{u_{ik}}. \tag{23}$$

Зауважимо, що при програмній реалізації, щоб уникнути виникнення полюсів, коли $u_{ik} = 0$, знаменник в (23) представлено $u_{ik} + 0,00001$. Зауважимо, що в точках, в яких похибка $|(\delta u_{ik})| > 0,25$, отримання достовірних результатів реконструкції не розглядається. Тому площина $\delta u_{ik} = \pm 0,25$ викидається з розгляду.

Для визначення оптимального масиву вертикальної та горизонтальної похідної оберемо точки (i,k), в яких має місце розкриття тріщини.

На підставі порівняння відносних похибок $\underline{q}_{1,ik}, \underline{p}_{1,ik}, \underline{q}_{2,ik}, \underline{p}_{2,ik}$ за статистичними критеріями або за абсолютною величиною вибирається пара похідних $\underline{q}_{1,ik}, \underline{p}_{1,ik}$ або $\underline{q}_{2,ik}, \underline{p}_{2,ik}$, яка використовується для наступного проведення реконструкції.

На початку тривимірної реконструкції глибини тріщини проведемо мінімізацію абсолютної похибки реконструкції глибини Δz_{ik} (10). Для цього застосуємо дві корекції.

Корекція (12) здійснює мінімізацію першого доданку в виразі (10).

Корекція (15) здійснює мінімізацію другого доданку в (10).

Після застосування цих корекцій отримуємо скоректовані похідні $\underline{q}_{ik,s}$, $\underline{p}_{ik,s}$. На їх основі алгоритмом тривимірної реконструкції глибини тріщини (8) виконуємо відновлення $\underline{z}_{ik}$.

Завершує оцінку якості тривимірної реконструкції реалізація визначення абсолютної та відносної похибки реконструкції глибини тріщини (22), (23) та визначення відносної похибки реконструкції довжини тріщини (6), (23).

7. Приклад програмного застосування

Комп'ютерна модель тріщини Z (рис. 1) використовувалась для визначення похідних p_{ik}, q_{ik} та комп'ютерного генерування штучних зображень $I_\lambda(L_m) = I_\lambda(L_m, p, q)$, де m=0,1. Для розрахунку відеосигналів $I_\lambda(L_m)$ додатково прийнято умови

$$I_a = 0, \; I_{p\lambda} k_d = 250. \tag{24}$$

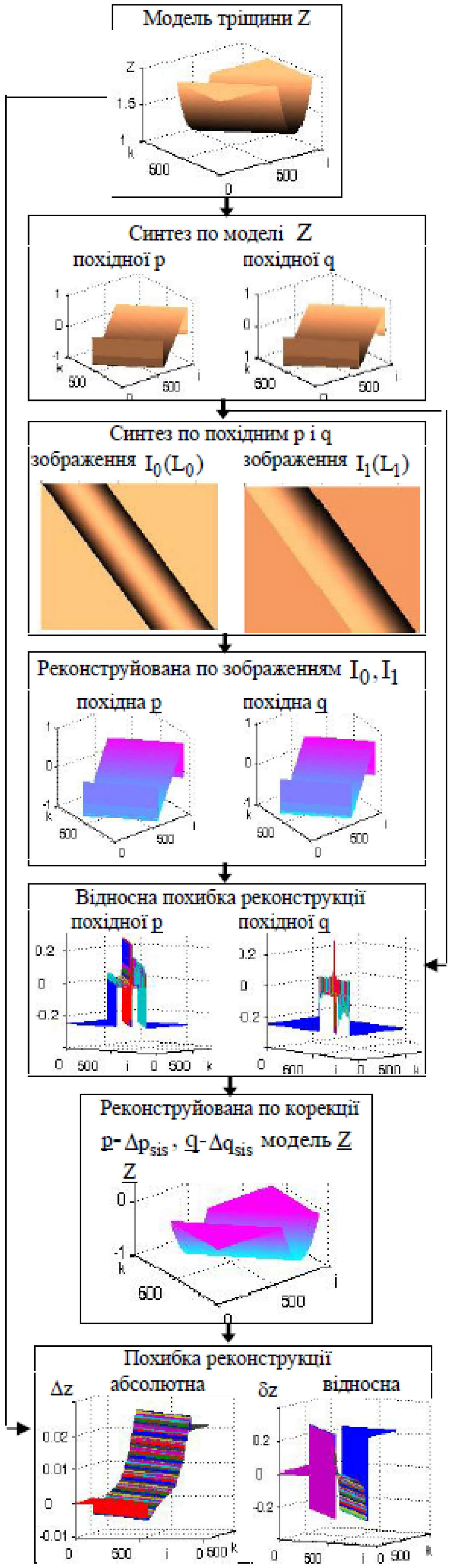

Рис. 1. Інформаційна технологія тривимірної реконструкції за стереозображенням

Ці синтезовані об'єкти та їх проміжні продукти представлені на рис. 1 у спектрі жовто-коричневих відтінків.

Процедура реконструкції глибини поверхні пластини з тріщиною на базі стереозображення містить такі основні операції:

1. На основі $I_\lambda(L_0)$, $I_\lambda(L_1)$ за виразом (3), де використано (24), визначимо два кореня вертикальної похідної $\underline{q}_{1,ik}$, $\underline{q}_{2,ik}$.

2. На основі $\underline{q}_{1,ik}$ ($\underline{q}_{2,ik}$), за виразом (2), визначимо горизонтальну похідну $\underline{p}_{1,ik}$ ($\underline{p}_{2,ik}$).

Реконструйовані похідні $\underline{q}_{2,ik}$ і $\underline{p}_{2,ik}$ представлені на рис. 1 у спектрі синіх та фіолетових відтінків.

3. За виразом (23) визначимо відносну похибку реконструкції вертикальної похідної $\delta q_{n,ik}$. Результати роботи програми по визначенню відносної похибки реконструкції вертикальної похідної $\delta q_{2,ik}$ для всіх точок апертури подані на рис. 1, а для кращої візуалізації точок, які належать самій тріщині – на рис. 2, де наведено розподіл похибки у перерізі розкриття тріщини. Як бачимо, у розподілі переважають від'ємні значення відносної похибки, які сконцентровані у правій частині тріщини. Ця особливість є аргументом на користь вибору реконструкції глибини за методом (8).

На основі спільного аналізу розподілів відносної похибки реконструкції вертикальної похідної $\delta q_{2,\ j}$ (j-вертикальна координата, а фіксована горизонтальна координата для спрощення індексації відсутня) та вертикальної похідної $q_{\ j}$ (див. рис. 2) встановлено, що у лівій частині тріщини q належить діапазону $[-0,83;-0,005]$ з заданою точністю 0,25, а у правій частині тріщини q належить діапазону $[0,09;0,83]$ з такою ж точністю.

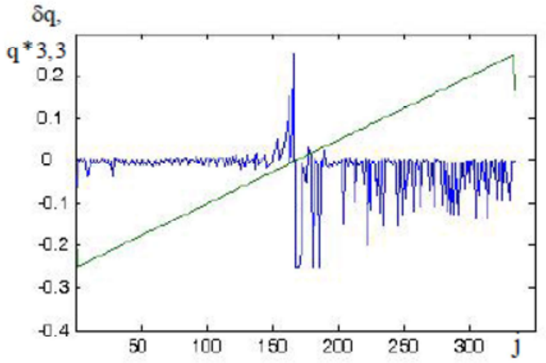

Рис. 2. Розподіл відносної похибки реконструкції вертикальної похідної $\delta q = \delta q_{2,\ j}$ (синій колір) та вертикальної похідної $q = q_{\ j}$ (зелений колір) в перерізі тріщини

4. За виразом (23) визначимо відносну похибку реконструкції горизонтальної похідної $\delta p_{n,ik}$, де n=1,2. Результати роботи програми по визначенню відносної похибки реконструкції горизонтальної похідної $\delta p_{2,ik}$ для всіх точок апертури подані на рис. 1. Аналогічно, як і у випадку, описаному вище, для кращої візуалізації точок, які належать самій тріщині, на рис. 3 наведений розподіл похибки горизонтальної похідної у перерізі розкриття тріщини.

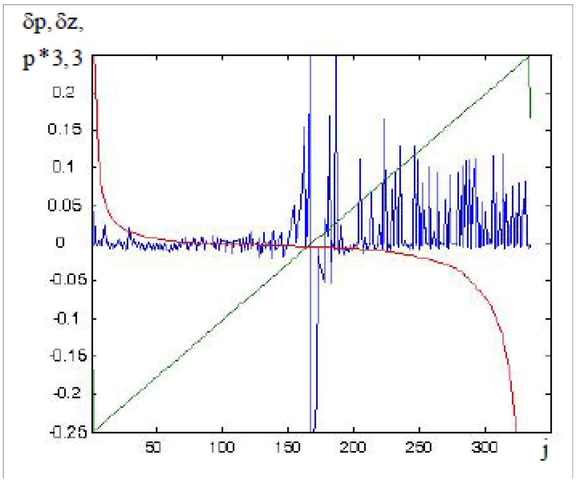

Рис. 3. Розподіл відносної похибки реконструкції горизонтальної похідної $\delta p = \delta p_{2,j}$ (синій колір), горизонтальної похідної $p = p_j$ (зелений колір), та відносної похибки реконструкції глибини $\delta z = \delta z_j$ (червоний колір) в перерізі тріщини

Видно, що переважають додатні значення відносної похибки, які сконцентровані у правій частині тріщини. Ця особливість є аргументом на користь вибору реконструкції глибини (8) і зокрема довжини тріщини.

На основі спільного аналізу розподілів відносної похибки реконструкції горизонтальної похідної $\delta p_{2,j}$ (j – горизонтальна координата, а фіксована вертикальна координата для спрощення індексації відсутня) та горизонтальної похідної p_j (див. рис. 3) встановлено, що у лівій частині тріщини p належить діапазону $[-0,83;-0,005]$ з заданою точністю 0,25, а у правій частині тріщини p належить діапазону $[0,09;0,83]$ з такою ж точністю.

5. З огляду розподілів відносної похибки, наведених на рис. 2 та 3, видно, що вони мають однаковий діапазон координат. Ця властивість дозволила провести кількісне порівняння

$$a_j = \left|\delta q_{2,\ j} - \delta p_{1,j}\ \right|,\ b_j = \left|\delta q_{1,\ j} - \delta p_{2,j}\ \right|.$$

За результатами роботи програми було встановлено, що різниці $a_j \le 10^{-12}$, $b_j \le 10^{-12}$. Таким чином, на підставі встановленого збігання масивів відносних похибок у наступному етапі реконструкції можна використовувати будь-яку пару похідних: $\underline{q}_{1,ik}, \underline{p}_{1,ik}$ або $\underline{q}_{2,ik}, \underline{p}_{2,ik}$.

Продовжимо реконструкцію з похідними $\underline{q}_{2,ik}, \underline{p}_{2,ik}$.

6. Інтерактивно на площині вибиремо систематичну похибку $\Delta q_{sis} = \underline{q}_{10,10}$ і за виразом (12) розрахуємо корекцію вертикальної похідної $\underline{q}_{lm,s}$.

7. Інтерактивно на площині вибиремо систематичну похибку $\Delta p_{sis} = \underline{p}_{10,10}$ і за виразом (15) розрахуємо корекцію горизонтальної похідної $\underline{p}_{ik,s}$.

8. Зважаючи на кращий діапазон реконструкції похідних та менші флуктуації відносних похибок у лівій частині тріщини (див. рис. 2 і 3) доцільно наступну реконструкцію глибини тріщини провести, використовуючи опорну точку – початок координат.

На основі одномірного масиву похідних $\underline{q}_{lm,s}, \forall m = \overline{2,K}$ (п. 6) та двомірного масиву похідних $\underline{p}_{ik,s}$ (п. 7), за накопиченнями (8), визначимо двомірний масив глибин $\underline{z}_{ik}$ (див. рис. 1).

9. Для кількісної оцінки якості реконструкції 3D характеристик тріщини застосуємо такі параметри: абсолютну і відносну похибку розрахунку глибини тріщини одержуємо відповідно за виразами (22) і (23).

Як видно з рис. 1, похибки визначення різних точок площини, розташовані зліва від тріщини, не відрізняються, і що важливо, мають внаслідок проведення корекції (п. 6, п. 7) нульове значення.

Абсолютна похибка зростає починаючи від від'ємних значень на лівому краї тріщини до додатніх значень на правому краї, де спостерігається найбільше по абсолютній величині значення похибки. Найінтенсивніші зміни похибки спостерігаються біля країв тріщини. Вздовж тріщини розподіл абсолютної та відносної похибок практично незмінний. Така специфіка розподілу відносної похибки дозволяє продовжити його аналіз у перетині (див. рис. 3). На основі спільного аналізу розподілів відносної похибки реконструкції глибини тріщини δz_j та глибини z_j встановлено, що у лівій частині тріщини z належить діапазону реконструкції [-0,011, -0,7] , а у правій частині тріщини z належить вужчому діапазону [-0,092, -0,7]. В обох випадках за рахунок обмеження по точності $\delta z_T = 0{,}25$ формується верхня межа діапазону реконструкції.

Зауважимо, що для прогнозу тріщиностійкості з усього масиву відносних похибок найбільший інтерес представляють похибки визначення довжини тріщини, які відповідають нижній межі діапазону реконструкції $z_U = -z_{max} = -0{,}7$. Програмно отримане таке значення відносної похибки реконструкції довжини тріщини: $\delta z_U = -4{,}8 * 10^{-3}$. Це дозволяє проводити прогноз тріщиностійкості з відносною похибкою $\delta K = 9{,}6 * 10^{-3}$.

8. Висновки

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше запропоновано новий метод та алгоритм тривимірної реконструкції за парою зображень, що базується на ламбертівській моделі відбиття світла Цей алгоритм реалізований у вигляді віртуальної системи обробки інформації, придатної для штучного генерування зображень стереопари. Кожне зображення синтезовано з індивідуальним кутом освітлення. Перше зображення отримується з вертикальним розташуванням джерела світла, а друге – з кутом, який не локалізований в жодній з двох вертикальних ортогональних площин тривимірного простору. Ця інформація дозволяє описати тривимірну поверхню матеріалу у вигляді системи двох рівнянь, що дає можливість реконструйовувати похідні векторів нормалі.

Вперше для підвищення точності реконструкції похідні векторів нормалі коректуються систематичними похибками, які визначаються на площині тріщини.

Оцінка глибини тріщини знаходиться інтегральним накопиченням скоректованих похідних векторів нормалі тріщини, починаючи від одної з точок поверхні, яку приймають за опорну. За таким підходом, використовуючи пластину з тріщиною, оцінено її похибки реконструкції. Відносна похибка розрахункової частини алгоритму реконструкції глибини тріщини становить $\pm 0{,}5\%$.

Практична цінність роботи полягає в тому, що запропонована система дозволить по парі зображень отримувати тривимірну інформацію про матеріали, які досліджуються, в даному випадку – про тріщини. Наведено програмно розраховані похибки реконструкції, а також діапазони реконструкції похідних векторів нормалі і глибини з заданою точністю для двох типів тріщин. Описано теоретичні прийоми корекції систематичних похибок, які дозволяють зменшити вплив похибок реконструкції на визначення глибини тріщини. В перспективі запропонований метод реконструкції тріщин дозволить проводити прогноз тріщиностійкості з кращою точністю.

Література: **1.** *Похмурський В.І., Хома М.С.* Корозійна втома металів та сплавів. Львів: СПОЛОМ, 2008. 304с. **2.** *Wood, W. A.* Recent observations on fatigue fracture in metals, ASTM STP 237, 1958. P. 110-121. **3.** *Броек Д.* Основы механики разрушения. М.: Высшая школа, 1980. 368с. **4.** *Гаркунов Д.Н.* Триботехника (износ и безызносность). М.: Из-во МСХА, 2001. 616с. **5.** *Myshkin N.K., Kong H., Gngoriev A.Ya., Yoon E.-S.* The use of color in wear debris analysis // Elsevior Wear. 2001. v.251. P.1218-1226. **6.** *Похмурський А.Ю., Русин Б.П., Іванюк В.Г., Капшій О.В.* Метод оцінки глибини корозійного пітинга // Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2010. Вип. №8. С. 617-623. **7.** *Русин Б.П., Іванюк В.Г., Капшій О.В., Ануфрієва Н.П., Похмурський А.Ю.* Оцінка глибини пітинга за зображеннями поверхні матеріалу // Радіоелектроніка і інформатика. 2010. № 1. С. 83-91. **8.** *Синявський А.Т., Русин Б.П.* Реалізація методу реконструкції мікроструктури поверхні за її стереозображенням з оптичних камер // Радіоелектроніка та інформатика.

2005. №2. С.112-118. **9.** *Русин Б.П., Лисак Ю.В., Похмурський А.Ю., Варецький Я.Ю.* Реконструкція та кількісний аналіз металевих поверхонь з пітингами на основі удосконаленого методу погодження стереозображень //Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2011. Том 47. №2. С.126-133. **10.** *Richard Szeliski.* Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer, New York, 2010. 655 p. **11.** *Русин Б.П., Іванюк В.Г., Лисак Ю.В., Ануфрієва Н.П.* Стереозйомка та погодження зображень, що базується на Phong моделі відбиття світла // Радіоелектроніка та інформатика. 2011.№2. С. 61–69. **12.** *Lambert J. H.* Photometria, sive de Mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae / sumptibus viduae E. Klett, 1760. **13.** *Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г., Капшій О.В.* Похибка тривимірної реконструкції поверхні тріщини за тріадою зображень // Радіоелектроніка та інформатика. 2015. №2. С. 58¬63.

Надійшла до редколегії 04.12.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Лукін В.В.

Грабовська Наталія Романівна, аспірантка Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАНУ. Наукові інтереси: обробка та розпізнавання зображень. Адреса: Україна, 79601, Львів, вул. Наукова, 5а. **dep32@ipm.lviv.ua**

Русин Богдан Павлович, д-р техн. наук, проф., зав. відділом "Методів і систем дистанційного зондування " Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАНУ. Наукові інтереси: обробка та розпізнавання зображень. Адреса: Україна, 79601, Львів, вул. Наукова, 5а, e-mail: dep32@ipm.lviv.ua

Іванюк Віталій Григорович, інженер відділу "Методів і систем дистанційного зондування " Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАНУ**.** Наукові інтереси: обробка та розпізнавання зображень. Адреса: Україна, 79601, Львів, вул. Наукова, 5а, тел:2296-530. e-mail: vivan@imp.lviv.ua

Rusyn B.P., doctor of engineering sciences, professor, manager of department of "Methods and systems of the remote sensing " of Karpenko Physico- Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Address: 79601, Ukraine, Lviv, street Scientific, 5a, telephone : 2296-530, e - mail: dep32@ipm.lviv.ua

Hrabovcska N.R., graduate student of Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Scientific interests: treatment and artificial perception. Address: 79601, Ukraine, Lviv, street Scientific, 5a, telephone: 2296-530, e - mail: dep32@ipm.lviv.ua

Ivanyuk V.H., engineer of department of "Methods and systems of the remote sensing " of Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, . Scientific interests: treatment and artificial perception. Address: 79601, Ukraine, Lviv, street Scientific, 5a, telephone: 2296-530, e - mail: vivan@imp.lviv.ua