

ОЦІНКА ПОХИБКИ ВИЗНАЧЕННЯ ГЛИБИНИ ТРІЩИНИ В ІНФОРМАЦІЙНІЙ ТЕХНОЛОГІЇ 3D РЕКОНСТРУКЦІЇ ЗА ЇЇ 2D ЗОБРАЖЕННЯМ.

Встановлено інформаційно-технологічні параметри від яких залежить точність тривимірної реконструкції внутрішньої поверхні тріщини за двомірним зображенням. Оцінено точність роботи запропонованої інформаційної технології реконструкції під впливом похибок відеозйомки зображення, індукційованих відхиленням напрямку освітлення від технологічно запланованого.

Постановка проблеми.

За останні роки область контролю стану тріщиностійкості елементів конструкцій значно збільшилась, бо цьому сприяло застосування нових методів і пристроїв що використовуються в комплексах неруйнівного контролю матеріалів. Одним з методів неруйнівного контролю стану тріщиностійкості елементів конструкцій є дослідження металографічних зображень, які фіксують стан поверхні елементів конструкцій на їх окремих ділянках [1].

При відновленні тривимірної структури поверхні металографічних об'єктів, на основі інформації двовимірних зображень застосовуються декілька методів "тривимірної реконструкції" які використовують моделі відбиття світла [1] - [3].

Один із типових представників такої реконструкції описано у праці [2]. Розроблений алгоритм програмно реалізований у вигляді віртуальної системи обробки інформації, яка забезпечена приймачем з джерелом світла, що має змінний кут освітлення. Запропонована система дозволяє по тріаді зображень отримувати тривимірну інформацію про матеріали, які досліджуються, в даному випадку, про тріщини у матеріалі. Встановлені в [2] похибки визначення глибини тріщини, що складають $4 \cdot 10^{-4}$, показують, що, при розповсюдженні дії наведеної системи обробки інформації на реконструкцію тріщин з реальних металографічних зображень, дозволить проводити прогноз тріщиностійкості [4] з відносною похибкою $2 \cdot 10^{-4}$ [2].

З розгляду умов реалізації алгоритму 3D реконструкції по тріаді зображень [2] видно, що створення макету системи обробки зображень (СОЗ) потребує вирішення таких двох завдань: розробки технологічних прецизійних вузлів фіксації положення джерела світла у приймачі зображення; прецизійне юстування системи.

Експлуатація і юстування СОЗ, а також створення програми 3D реконструкції по тріаді зображень є складними операціями, які вимагатимуть відповідних технологічних рішень. Тому доцільно спростити розробку трудоемних СОЗ, модифікувавши алгоритм реконструкції так, щоб зменшити вплив на визначення глибини тріщини неточності фіксації напрямку на джерело світла, який виникає при відеозйомці тріади 2D зображень. Таке інформаційно-технологічне удосконалення потребує вирішення наступних двох завдань: оцінки похибки обчислення глибини тріщини, яка виникає

при реконструкції по одному з тріади 2D зображень; оцінки похибки визначення глибини тріщини, яка виникає при реконструкції по тріаді 2D зображень.

Зауважимо, що при вирішенні першої задачі з розгляду умов реалізації алгоритму 3D реконструкції по тріаді зображень і розгляду умов реалізації алгоритму 3D реконструкції за 2D зображенням видно, що обидві методики використовують для проведення реконструкції ілюмінаційну модель відбиття і зокрема інформацію про зображення, отримане в напрямку освітлення, яке перпендикулярне до площини зразка з досліджуваним об'єктом.

Алгоритм 3D реконструкції за 2D зображенням [3] практично простіший для аналізу похибок ніж алгоритм 3D реконструкції по тріаді 2D зображень. Саме тому, на даному етапі досліджень, аналіз похибок проведено для описаного вище алгоритму.

Метою роботи є. Оцінка похибки визначення глибини тріщини при її реконструкції на основі 2D зображення в залежності від напрямку освітлення поверхні.

Розглянемо інформаційну технологію 3D реконструкції за 2D зображенням. Вона полягає в тому, що досліджуваний зразок матеріалу освітлюється джерелом некогерентного світла. Відбите від поверхні зразка світло сприймається відеокамерою і передається для аналізу у комп'ютер. Об'єкти з дифузним відбиттям, що відбивають світло у всіх напрямках спостереження, є простіші для аналізу та відновлення 3D інформації. Тому на даному етапі основний акцент досліджень скерований лише на них. При дослідженні металографічних зображень, на яких зафіксований стан поверхні елементів конструкцій на окремих ділянках, що являють собою ділянки площин вкритих тріщинами, такими об'єктами є вузькі тріщини. Для дифузної моделі відбиття (розглядається монохроматичне зображення) інтенсивність відбиття точки поверхні освітленої одним джерелом світла визначається рівнянням [5], [6]

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

де I_a - інтенсивність розсіяного світла; $I_{p\lambda}$ - інтенсивність джерела освітлення; k_d - коефіцієнт, який визначає рівень дифузного відбиття досліджуваної точки поверхні;

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

- одиничний вектор нормалі до поверхні в досліджуваній точці;

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

- нахил поверхні в околі точки; $L = (L_x, L_y, L_z)$ - одиничний нормалізований вектор, який вказує напрям на джерело світла. Така дифузна модель відбиття представляє собою функцію параметрів p , q , I_a і k_d , які необхідно визначити.

Для обчислення дифузного коефіцієнта, формують додаткове зображення досліджуваної металографічної поверхні з тріщинами під іншим кутом зору, що надає потрібну інформацію для k_d визначення. Залишаємо положення осі OY незмінним і

нахиляємо площину зразка XOY по відношенню до площини XOY зйомки камери під відомим кутом θ . В результаті отримаємо зображення з інтенсивністю $I_{\lambda kd}$. За допомогою кольорової селекції знаходимо сегменти отриманих зображень, на яких відсутні зміни дифузійного коефіцієнта k_d . В результаті чого отримуємо просторовий сегмент зображення нахиленої площини. В цьому сегменті для точки, яка лежить на площині зображення, визначаємо: параметр $\iota = I_{p\lambda} k_d$

$$\iota = (I_{\lambda kd0} - I_a) \sqrt{\text{tg}^2 \theta + 1},$$

де $I_{\lambda kd0}$ - інтенсивність точки площини.

Для визначення інтенсивності фону I_a використовується інформація з додаткового зображення, яке отримується в результаті тимчасового штучного затінення зразка з тріщиною за допомогою прямокутника, просторове положення якого є над зразком.

Для класу вертикально розташованих тріщин, зважаючи на повільнозмінність параметрів тріщини, виконується умова

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

Враховуючи умову (2), а також параметри фону I_a і $\iota = I_{p\lambda} k_d$, та що у CO3 напрям джерела світла $L_E = (0, 0, 1)$, з рівняння (1) отримуємо

$$|p| = \sqrt{\frac{\iota^2}{(I_\lambda - I_a)^2} - 1}, \quad (3)$$

де $I_\lambda = I_\lambda(x, y)$. Оцінка глибини тріщини знаходиться шляхом інтегрального накопичення значень модуля горизонтальної похідної $|p|$ починаючи від одного з країв тріщини. Оцінимо вплив на модуль горизонтальної похідної $|p|$ неточності фіксації напрямку на джерело світла L_E . Щоб уточнити опис напрямку на джерело світла L будемо вважати, що точкове джерело є центром сфери

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2$$

на поверхні якої розташовано опромінювану точку M . Тоді можна записати

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

де

$$P = \frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{x}{z},$$

$$Q = \frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{y}{z}$$

- параметри, які визначають нахил поверхні сфери в точці M .

З виразу (4) випливає, що в загальному випадку маємо функцію двозмінних $L = L(P, Q)$. В ідеальному випадку $L_E = L(0, 0)$. Використовуючи параметри P та Q оцінимо вплив на модуль горизонтальної похідної $|p|$ неточності фіксації напрямку на джерело світла, коли замість L_E використовується напрям на джерело світла $L = (P, Q)$.

Для випадку, коли $Q = 0$, вектор напрямку на джерело світла набуває форми

$$L = \left(\frac{-P}{\sqrt{P^2 + 1}}, 0, \frac{1}{\sqrt{P^2 + 1}} \right). \quad (5)$$

При таких умовах освітлення, якщо параметри ι , I_a фіксовані, розглянемо клас вертикально розташованих тріщин. Шляхом алгебраїчних перетворень з виразу (1) отримуємо наступне квадратичне рівняння

$$ap^2 + bp + c = 0, \quad (6)$$

де

$$a = \xi^{-2} - \frac{P^2}{P^2 + 1};$$

$$b = -\frac{2P}{P^2 + 1};$$

$$c = \xi^{-2} - \frac{1}{P^2 + 1}.$$

Коефіцієнт ξ визначається таким чином

$$\xi = \frac{I_{\lambda 0} - I_a}{I_{\lambda}(x, y) - I_a} = \frac{\iota}{I_{\lambda} - I_a}. \quad (7)$$

Корні квадратичного рівняння (6) обчислюються стандартно

$$p_{1,2} = -\frac{b}{2a} \pm \frac{1}{2a} \sqrt{b^2 - 4ac}. \quad (8)$$

Із виразу (8) та (9)-(11) випливає, що в загальному випадку маємо функцію

$$p = p_{1,2}(a(P^2), b(P, P^2), c(P^2)),$$

яка залежить від P . Зауважимо, що оскільки $Q = 0$, то маємо функцію $p_{1,2} = f(P, 0)$. Спочатку аналіз буде зосереджено лише на розгляді $p = p_{1,2}(P)$, як функції одної незалежної змінної P . Розкладемо функцію $p = p_{1,2}(P)$ у ряд Маклорена [7]

$$p_{1,2}(P) = p_{1,2}(0) + P p'_{1,2}(0) + P^2 \frac{1}{2!} p''_{1,2}(0) + \dots \quad (9)$$

де $p_{1,2}(0)$ визначено (3). У виразі (9) і в подальшому аналізі приймаємо, що застосовується таке позначення двох операцій [7]: для функції $f(x)$ від одної незалежної змінної x спочатку виконується умова

$$f^{(k)}(x) = \frac{\partial^k f}{\partial x^k},$$

а потім приймамо $x = x_0$, що у підсумку, дасть $f^{(k)}(x_0)$.

Щоб визначити $p'_{1,2}(0)$ у розкладі Маклорена (9) будемо розглядати $p = p_{1,2}(P)$ (8), як складну функцію (14), для якої при диференціюванні при $k=1$, виникають похідні $a'(P)$, $c'(P)$, $[b^2]'(P)$, $b'(P)$.

При визначенні цих похідних слід звернути увагу, що вони теж є складними функціями, оскільки параметри $a(P^2)$, $b^2(P^2)$, $c(P^2)$ залежать від P^2 , і тому при диференціюванні в кожній похідній з'являється коефіцієнт $2P$. Внаслідок чого

$$a'(0) = c'(0) = [b^2]'(0) = 0. \quad (10)$$

Підставляючи обчислені результати (10) в $p'_{1,2}(0)$ отримаємо

$$p'_{1,2}(0) = -\frac{b'(0)}{2a(0)}. \quad (11)$$

Для обчислення (11), проводячи диференціювання параметра b , знаходимо, що

$$b'(P) = -\frac{2}{P^2 + 1} + \frac{4P^2}{(P^2 + 1)^2},$$

звідки

$$b'(0) = -2.$$

У результаті чого остаточно отримуємо $p'_{1,2}(0) = \xi^2$. Підставимо $p'_{1,2}(0)$ у вираз (9) і користуючись наближенням розкладу в ряд Маклорена у вигляді перших двох членів, отримаємо величину абсолютної похибки реконструкції модуля горизонтальної похідної тріщини

$$\Delta P = p_{1,2}(P) - p_{1,2}(0) \approx P\xi^2. \quad (12)$$

Щоб провести аналіз впливу умов освітлення на якість реконструкції модуля горизонтальної похідної тріщини прийемо що $P = 0$. Тоді вектор напряму на джерело світла (4) набуває форми

$$L = \left(0, \frac{-Q}{\sqrt{Q^2 + 1}}, \frac{1}{\sqrt{Q^2 + 1}}\right). \quad (13)$$

За таких умов освітлення (13), якщо параметри ι , I_a фіксовані, розглянемо клас вертикально розташованих тріщин. Шляхом алгебраїчних перетворень з виразу (1) отримуємо таку оцінку

$$|p| = \sqrt{\frac{\xi^2}{Q^2 + 1} - 1}. \quad (14)$$

З виразу (14) слідує, що маємо функцію $|p| = |p|(Q)$, яка залежить від Q . Зауважимо, що оскільки $P = 0$, то маємо функцію $|p|(0, Q)$ двох змінних, але спочатку аналіз буде зосередено лише на розгляді $|p| = |p|(Q)$, як одної незалежної змінної Q . Розклад функції $|p|(Q)$ (14) у ряд Маклорена [7] є таким

$$|p|(Q) = |p|(0) + Q|p}'(0) + Q^2 \frac{1}{2!}|p}''(0) + \dots \quad (15)$$

де $|p|(0)$ визначено (3). Звідки видно, що для визначення розвинення в ряд Маклорена в першу чергу знадобляться $|p}'(0)$ і $|p}''(0)$. Для отримання цієї інформації шляхом диференціювання $|p|$ по Q отримуємо

$$|p}'(Q) = Qf_1(Q^2), \quad (16)$$

де

$$f_1(Q^2) = -\frac{\xi^2}{(Q^2 + 1)^2 |p|},$$

$|p|$ визначаємо з (14). Окрім того з виразу (16) слідує

$$|p}''(Q) = f_1(Q^2) + Q \frac{\partial}{\partial Q} f_1(Q^2). \quad (17)$$

З виразів (16) і (17) отримуємо

$$\begin{aligned} |p}'(0) &= 0, \\ |p}''(0) &= f_1(0) = -\frac{\xi^2}{\sqrt{\xi^2 - 1}}. \end{aligned} \quad (18)$$

Підставляючи значення похідних у вираз (15) отримуємо ряд Маклорена у такому вигляді

$$|p|(Q) = |p|(0) - \frac{Q^2 \xi^2}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} + \dots \quad (19)$$

Обмежуючись першими двома членами розвинення Маклорена (19), визначимо таку оцінку абсолютної похибки реконструкції модуля горизонтальної похідної тріщини

$$\Delta Q = |p|(Q) - |p|(0) = -\frac{Q^2 \xi^2}{2\sqrt{\xi^2 - 1}}. \quad (20)$$

Ця похибка квадратично зростає при збільшенні параметра Q .

Щоб провести аналіз впливу умов освітлення на якість реконструкції модуля горизонтальної похідної тріщини, який формується спільно параметрами P і Q , використаємо визначені похибки ΔP , ΔQ .

Розглянемо правомірність використання цієї інформації.

Можна показати, що шляхом алгебраїчних перетворень з виразу (1) отримується квадратичне рівняння, корні якого є функцією $r_{1,2} = f(P, Q)$ від двох незалежних змінних. Розклад функції $f(P, Q)$ у ряд Маклорена [7] є таким

$$\begin{aligned} f(P, Q) = & f(0, 0) + P \left\{ \frac{\partial}{\partial P} f(P, Q) \right\}_{P=0} \Big|_{Q=0} + Q \left\{ \frac{\partial}{\partial Q} f(P, Q) \right\}_{P=0} \Big|_{Q=0} + \\ & \frac{P^2}{2!} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial P^2} f(P, Q) \right\}_{P=0} \Big|_{Q=0} + \frac{PQ}{2!} \left\{ \frac{\partial}{\partial P} \frac{\partial}{\partial Q} f(P, Q) \right\}_{P=0} \Big|_{Q=0} + \frac{Q^2}{2!} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial Q^2} f(P, Q) \right\}_{P=0} \Big|_{Q=0} + \dots \end{aligned} \quad (21)$$

Підставляючи значення модуля горизонтальної похідної $|p| = |p|(0, 0)$ (3), похідної $r'_{1,2}(0) = \xi^2$, похідних (18) у вираз (21), отримуємо ряд Маклорена у такому вигляді

$$f(P, Q) = |p| + P\xi^2 + \frac{P^2}{2!} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial P^2} f(P, Q) \right\}_{P=0} \Big|_{Q=0} - \frac{1}{2!} \frac{Q^2 \xi^2}{\sqrt{\xi^2 - 1}} + \dots \quad (22)$$

Нехтуючи в виразі (22) третім членом порівняно з другим, а також членами, починаючи з п'ятого, отримуємо таке наближення розвинення в ряд Маклорена (22), з застосуванням позначення $r(P, Q) = f(P, Q)$

$$r(P, Q) = |p| + P\xi^2 - \frac{Q^2 \xi^2}{2\sqrt{\xi^2 - 1}}.$$

Виходячи з отриманого виразу, визначимо загальну оцінку якості реконструкції модуля горизонтальної похідної тріщини

$$\Delta |p| = r(P, Q) - |p| = P\xi^2 - \frac{Q^2 \xi^2}{2\sqrt{\xi^2 - 1}}. \quad (23)$$

Ураховуючи, що перший член (23) це абсолютна похибка ΔP (12), а другий - член абсолютна похибка ΔQ (20), задамо абсолютну похибку реконструкції модуля горизонтальної похідної тріщини як суму двох незалежних по параметрам P і Q похибок.

$$\Delta |p| = \Delta P + \Delta Q.$$

Використовуючи абсолютну похибку реконструкції модуля горизонтальної похідної тріщини у формі (23), визначимо оцінку якості реконструкції глибини тріщини Δz_V . Ця оцінка знаходиться інтегральним накопиченням абсолютної похибки $\Delta|p|$ при $\xi = \xi(x, y_e)$, починаючи від одного з країв тріщини $z_e(x_e, y_e)$ до точки максимальної глибини тріщини $z(x_V, y_e)$

$$\Delta z_V = P \int_{x_e}^{x_V} \xi^2(x, y_e) dx - \frac{Q^2}{2} \int_{x_e}^{x_V} \frac{\xi^2(x, y_e)}{\sqrt{\xi^2(x, y_e) - 1}} dx. \quad (24)$$

де $\xi = \xi(I_\lambda(x, y))$ обчислюється з виразу (7). Зображення I_λ можна отримати штучно, змодельовавши процес відбиття від поверхні. Для цього скористаємось аналітичною моделлю сегмента вертикальної тріщини

$$p = p(x, y) = -k,$$

де $x \in [x_e, x_V]$, $y \in [y_s, y_A]$. У цьому випадку відповідна аналітична модель сегмента зображення вертикальної тріщини, визначена виразом (1), має вигляд

$$I_\lambda(x, y) = I_a + \frac{l}{\sqrt{k^2 + 1}}. \quad (25)$$

де $x \in [x_e, x_V]$, $y \in [y_s, y_A]$ Будемо вважати, що в (25) параметри $l = I_{p\lambda} k_d$, інтенсивність фону I_a задано дійсними значеннями.

Із виразу (25) випливає, що параметр ξ має такий вигляд

$$\xi = \sqrt{k^2 + 1}. \quad (26)$$

Оскільки параметр ξ не залежить від горизонтальної координати $x \in [x_e, x_V]$, тому підінтегральні вирази, які є функціями параметру ξ від параметру інтегрування x , теж не залежать і їх можна винести за межі інтегралів. Підставивши вираз (26) у формулу (24) та виконуючи операцію інтегрування, остаточно отримуємо оцінку абсолютної похибки визначення глибини тріщини

$$\Delta z_V = (x_V - x_e)(k + k^{-1}) \left[Pk - \frac{Q^2}{2} \right]. \quad (27)$$

Відносна похибка δz_V визначення глибини тріщини складає

$$\delta z_V = \frac{\Delta z_V}{z_{\max}} = \frac{\Delta z_V}{k(x_V - x_e)} = (1 + k^{-2}) \left[Pk - \frac{Q^2}{2} \right], \quad (28)$$

Із виразу (28) видно, що за рахунок k^{-2} погіршується точність визначення глибини тріщини. Такий режим реконструкції потребує застосування в СОЗ фіксації напрямку освітлення з підвищеною точністю.

Щоб точніше з'ясувати вплив параметрів k, P, Q для $k \leq 1$ запишемо відносну похибку визначення глибини тріщини як суму двох похибок

$$\delta z_V = \delta z_{VP} + \delta z_{VQ}, \quad (29)$$

де

$$\delta z_{VP} = (1 + k^{-2})Pk;$$

$$\delta z_{VQ} = -(1 + k^{-2})\frac{Q^2}{2}.$$

Щоб запропонувати рекомендації по оцінці відносної похибки визначення глибини тріщини з заданою точністю розглянемо її складові окремо та зробимо їх кількісну оцінку. Але спочатку зробимо зауваження стосовно використання майбутніх результатів аналізу точності визначення глибини тріщини.

Плануємо, при розповсюдженні дії наведеного аналізу на визначення глибини тріщин з реальних металографічних зображень, виникне необхідність проводити прогноз тріщиностійкості з використанням коефіцієнту інтенсивності напружень K [4], який є мірою всіх напружень і деформацій і який залежить від глибини тріщини z_{max} . Під час 3D реконструкції виникають похибки визначення глибини тріщини z_{max} , що ланцюгово викликає похибку визначення коефіцієнта інтенсивності напружень. У роботі [2] встановлено, що відносна похибка визначення коефіцієнту інтенсивності напружень

$$\delta K = \frac{\delta_0}{2},$$

де δ_0 відносна похибка визначення глибини тріщини. Звідки видно, що вплив похибки визначення глибини тріщини на відносну похибку визначення коефіцієнту інтенсивності напружень зменшено вдвічі. Тому, якщо при проведенні наступного аналізу точності прогнозу тріщиностійкості з використанням коефіцієнту інтенсивності напружень задатись кількісним експлуатаційно привабливим значенням відносної похибки коефіцієнту інтенсивності напружень $\delta K = \pm 0,05$ [4], то це викликає необхідність провести наступний аналіз точності визначення глибини тріщини з відносною похибкою визначення глибини тріщини $\delta_0 = \pm 0,1$.

Нехай відносну похибку δz_{VP} , яка формується параметрами P, k , обмежено $|\delta z_{VP}| \leq \delta_0$. На рис. 1 зображено результати розрахунку відносної похибки визначення глибини тріщини

$$\delta z_{VP} = \{\delta z_{VP}(P, k) \mid |\delta z_{VP}| \leq 0,1; (P, k) \in \Delta_s\},$$

що визначена в сегменті

$$\Delta_s = \{(P, k) \mid P \in [-0,1; 0,1], k \in [0,01; 1]\},$$

з використанням координати

$$P_1 = P * 10^3 + 101,$$

де $P_1 \in [1, 200]$. Зауважимо, що в точках (P_1, k) , в яких похибка $|\delta z_{VP}(P_1, k)| > 0,1$, отримання достовірних результатів визначення глибини тріщини неможливе. Тому площини $\delta z_{VP} = 0,1$, $\delta z_{VP} = -0,1$ не розглядаються.

Як видно з розгляду рис. 1 похибка параметра $|P|$, є не більшою 0,05. Припустимо, що створення такого напрямку освітлення $|P| \leq 0,05$, з використанням відчизняних кутомірів, технологічно досягне в умовах СОЗ.

Тоді при $|\delta z_{VP}| = 0,1$ складова δz_{VP} в загальному випадку приймає вигляд

$$b = (1 + k^{-2})k, \quad (30)$$

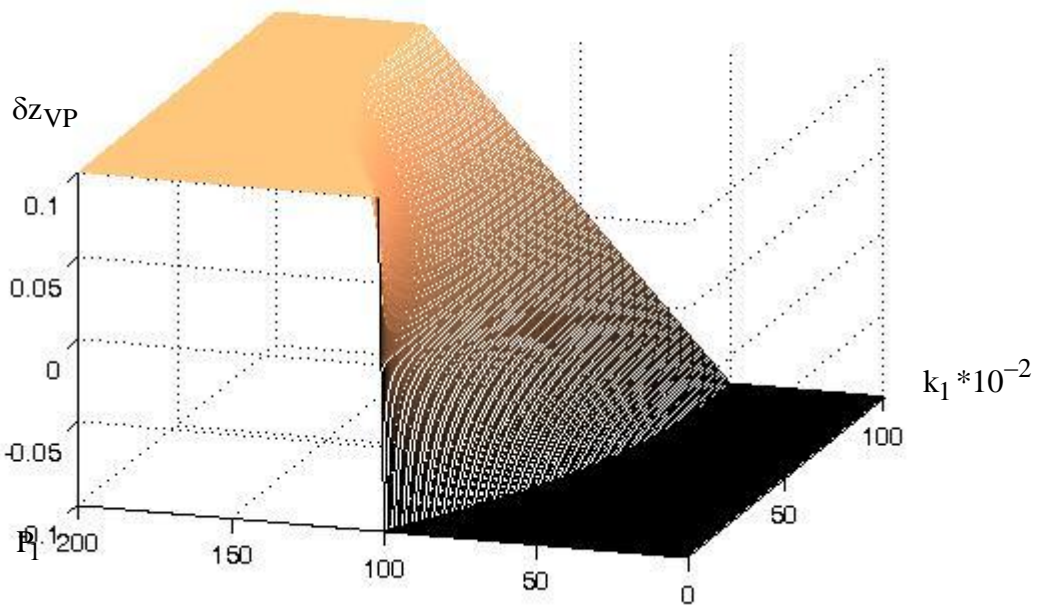


Рис. 1. Залежність відносної похибки визначення глибини тріщини δz_{VP} для випадку $|\delta z_{VP}| \leq 0,1$.

де
$$b = \frac{|\delta z_{VP}|}{|P|}.$$

Знайшовши корні квадратичного рівняння k_1 і k_2 (30) проаналізуємо їх відношення

$$D = \frac{k_1}{k_2},$$

яке можна інтерпретувати як діапазон визначення параметру k . Зауважимо, що в аналітичній моделі сегмента вертикальної тріщини має місце $p = -k$, тому параметр D можна одночасно розглядати, як діапазон 3D реконструкції значень горизонтальної похідної p . У діапазоні $k \in [k_1, k_2]$ реконструкція k отримується з заданою похибкою $|\delta z_{VP}| \leq 0,1$. Зауважимо, що така форма інтерпретації відношення D є

подібною до робочого діапазону довільного вимірювального приладу [8]. Додатково зауважимо, що з використанням виразу (28) параметр D приймає вигляд

$$D = \frac{z_{\max 1} (x_V - x_e)_2}{(x_V - x_e)_1 z_{\max 2}}, \quad (31)$$

Якщо $(x_V - x_e)_1 = (x_V - x_e)_2$, то вираз (31) спрощується

$$D = \frac{z_{\max 1}}{z_{\max 2}},$$

і визначає діапазон визначення глибини тріщини.

З урахуванням коренів квадратичного рівняння (30), параметр D приймає форму

$$D = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4}}{b - \sqrt{b^2 - 4}}.$$

Звідки шляхом алгебраїчних перетворень отримуємо

$$b = \frac{2}{\sqrt{1-s}}, \quad (32)$$

де

$$s = \frac{(D-1)^2}{(D+1)^2}.$$

На рис. 2 зображено результати розрахунку параметра b за виразом (32) для максимального k_1 та мінімального k_2 , що визначені в діапазоні $D \in [1; 20]$.

Крім того, підставимо розраховані значення b в вираз (30) і отримаємо оцінку похибки відхилення параметра $|P|$ представлену на рис. 3.

З розгляду рис. 2 і рис.3 видно, що технологія створення джерела світла $L(P, Q)$ з поданим на рис. 3 відхиленням напрямку освітлення від запланованого $L(0,0)$ у рамках інформаційної технології 3D реконструкції за 2D зображенням має теоретичне та кількісне підґрунтя по основним технологічним параметрам k_1, k_2 і $|P|$. Зокрема маємо експлуатаційно привабливі параметричні показники: $k_1 \geq 4$, $k_2 \leq 0,25$ та $|P| \leq 0,024$, для $D \in [16; 20]$.

b, k_1, k_2

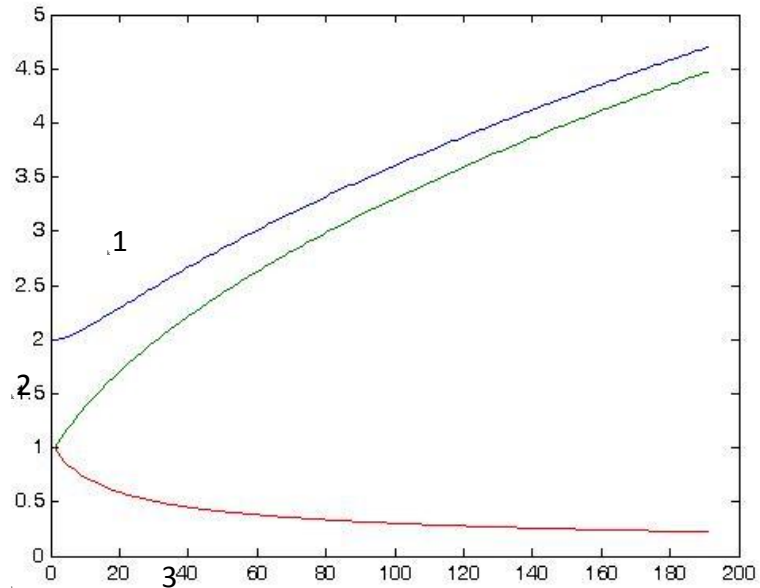


Рис. 2. Залежність параметрів b (крива 1), максимального значення k_1 (крива 2) і мінімального значення k_2 , (крива 3) від $D = 0,1 * D_1 + 0,9$.

Щоб уточнити рекомендації по оцінці похибки визначення глибини тріщини розглянемо її складову δz_{VQ} . Нехай відносну похибку δz_{VQ} , яка формується параметрами Q, k , обмежено $|\delta z_{VQ}| \leq \delta_0$, де $\delta_0 = 0,1$. На рис. 4 подано результати розрахунку відносної похибки визначення глибини тріщини

$$\delta z_{VQ} = \{ \delta z_{VQ}(Q, k) \mid |\delta z_{VQ}| \leq 0,1; (Q, k) \in \Delta S \},$$

визначеної в сегменті

$$\Delta S = \{ (Q, k) \mid Q \in [-0,4; 0,4], k \in [0,01; 1] \},$$

з використанням координати

$$Q_1 = Q * 2,5 * 10^2 + 101,$$

де $Q_1 \in [1, 201]$.

Зауважимо, що в точках (Q_1, k) , в яких похибка $\delta z_{VQ}(Q_1, k) < -0,1$, отримання достовірних результатів визначення глибини тріщини стає неможливим.

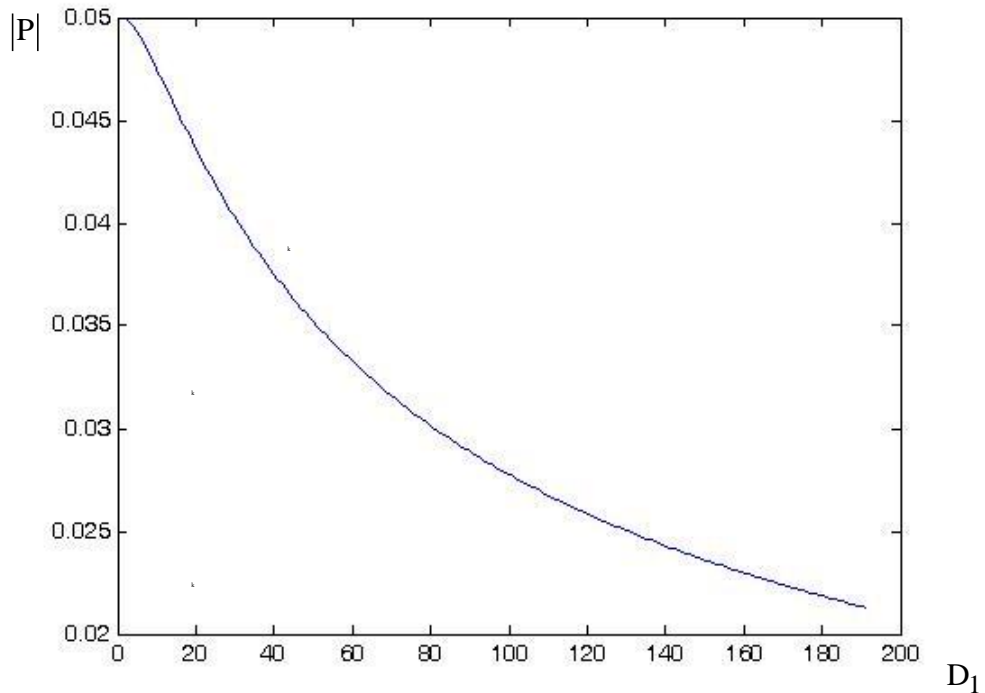


Рис. 3. Залежність параметру $|P|$ від $D = 0,1 \cdot D_1 + 0,9$.

Тому з кількісних розрахунків оцінки похибки визначення глибини тріщини ці точки вилучено, а на рис. 4 зображено площиною $\delta z_{VQ} = -0,1$. Як видно з рис. 4, при $|Q| \leq 0,32$ отримання достовірних результатів визначення глибини тріщини стає неможливим. Відштовхуючись від цього, як і при розгляді похибки δz_{VP} (29), припустимо, що створення напрямку освітлення в жорсткіших межах $|Q| \leq 0,024$ технологічно досягне в умовах модернізації СОЗ. Тоді при $|Q| \leq 0,024$ $k_2 \leq 0,25$ гранична оцінка похибки визначення глибини тріщини складає

$$\delta z_{VQ} = -4,9 \cdot 10^{-3}.$$

Видно, що отримана оцінка $|\delta z_{VQ}|$ значно менша ніж $|\delta z_{VP}| = 0,1$. Тому при обчисленні оцінки відносної похибки визначення глибини тріщини δz_V значенням оцінки δz_{VQ} можна знехтувати і покласти відносну похибку визначення глибини тріщини $\delta z_V = \delta z_{VP}$ для $D \in [16; 20]$. Наприклад для $D = 16$

$$\delta z_V = \{\delta z_{VP}(P, k) \mid |\delta z_{VP}| \leq 0,1; (P, Q, k) \in \Delta s_0\},$$

де

$$\Delta s_0 = \{(P, Q, k) \mid P \in [-0,024; 0,024], Q \in [-0,024; 0,024], k \in [0,25; 4]\}.$$

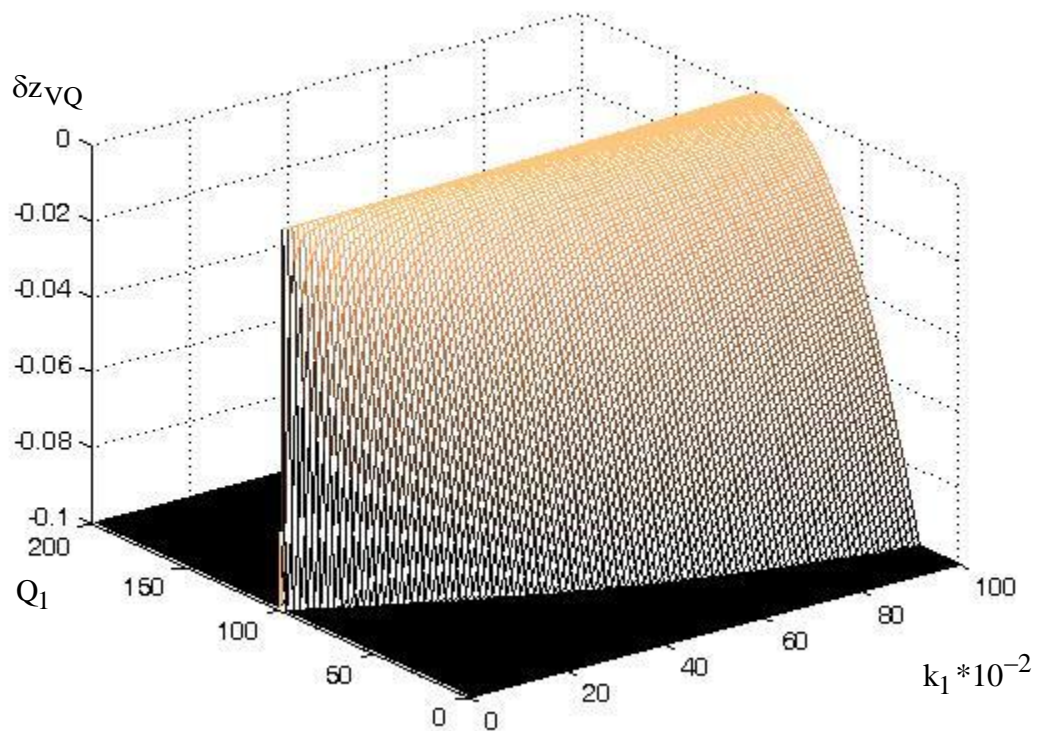


Рис. 4. Залежність відносної похибки визначення глибини тріщини δz_{VQ} для випадку $\delta z_{VQ} \leq -0,1$.

З розгляду рис. 1, 2 і 3 видно, що зважаючи на наявність сучасних економічно доступних вітчизняних кутомірів, наприклад такого, як кутомір виробництва МІКРОТЕХ (Тип 3-5: Похибка кут. ± 10 хв.) [9], технологія створення джерела світла $L(P, Q)$ з представленим на рис. 3 відхиленням напрямку освітлення від $L(0, 0)$ для $D \in [16; 20]$, в рамках запропонованої в роботі інформаційної технології 3D реконструкції за 2D зображенням технологічно та економічно досяжна.

Висновки

Розглянуто задачу тривимірної реконструкції поверхні за двомірними зображеннями, результати розв'язку якої використані при аналізі зображень матеріалів з тріщинами. Запропонований алгоритм реконструкції внутрішньої поверхні тріщини та розраховано точність його роботи.

Наукова та практична цінність роботи полягає в тому, що розроблений алгоритм програмно реалізований у вигляді системи обробки інформації, яка забезпечена приймачем з джерелом світла, що має сталий кут освітлення, перпендикулярний до площини зразка з тріщиною. Аналітично знайдені похибки визначення глибини тріщини індуковані відхиленням напрямку освітлення відеозйомки від технологічно запланованого. Результати аналізу точності є конструктивними та орієнтованими на прогноз тріщиностійкості. Наведено кількісно

розраховані похибки визначення глибини тріщини, максимальне та мінімальне значення діапазону 3D реконструкції значень модуля горизонтальної похідної, а також відповідні межі відхилень параметрів напрямку освітлення та технологічні рекомендації, що обґрунтовані використанням сучасних кутомірів для контролю напрямку освітлення, які стосуються вибору експлуатаційного діапазону 3D реконструкції значень модуля горизонтальної похідної [16;20] та відповідних меж експлуатаційних відхилень параметрів напрямку освітлення $[0,022;0,024]$, де результати визначення глибини тріщини мають контрольовану точність з дозволеною відносною похибкою $\pm 0,1$. Це дозволяє зменшити неконтрольований вплив похибок параметрів напрямку освітлення на визначення глибини тріщини, що, у перспективі, при розповсюдженні дії наведеного аналізу на визначення глибини тріщин з реальних металографічних зображень дозволить проводити прогноз тріщиностійкості з відносною похибкою $\pm 0,05$.

Література

1. Русин Б.П. Оцінка глибини пітінга за зображеннями поверхні матеріалу / Б.П. Русин, В.Г. Іванюк, О.В. Капшій, Н.П. Ануфрієва, А.Ю. Похмурський. // *Радіоелектроніка і інформатика*.--- 2010. --- № 1. ---С. 83---91.
2. Русин Б.П. Оцінка глибини тріщини за тріадою зображень. / Б.П. Русин, В.Г. Іванюк, О.В. Капшій, Н.П. Ануфрієва // *Радіоелектроніка і інформатика*. ---2010. ---№2. --- С. 68-76.
3. Русин Б.П. Розвиток алгоритму оцінки характеристик тріщин за зображеннями поверхні матеріалів / Б.П. Русин, В.Г. Іванюк, О.В. Капшій, Н.П. Ануфрієва. – *Радіоелектроніка і інформатика*. – 2007. – № 4. – С. 123–130.
4. Броек. Д. Основы механики разрушения. / Д. Броек. // М. Высшая школа. 1980. ---368с.
5. 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.
6. Watanabe S. Detecting Building Changes Using Epipolar Constraint From Aerial Images Taken At Different Positions / S. Watanabe, K. Miyajima // *IEEE* --- 2001.--- P 201 ---204.
7. Смирнов В.И. Курс высшей математики. т. 1. / В.И. Смирнов // – М., Наука. 1967. --- 480с.
8. Островский Л.А. Основы общей теории электроизмерительных устройств. / Л.А. Островский // - 2изд. пер.- Л: Энергия, 1971.- 543 с.