



ОЦІНКА ГЛИБИНИ ТРІЩИНИ ЗА ТРИАДОЮ ЗОБРАЖЕНЬ

РУСИН Б.П., ІВАНЮК В.Г., КАПШІЙ О.В.,
АНУФРІЄВА Н.П.

Розглядається задача тривимірної реконструкції поверхні за двовірними зображеннями, результати розв'язку якої будуть використані при аналізі зображень матеріалів з тріщинами. Виділяються параметри тріщиностійкості, на які орієнтований метод. Пропонується алгоритм реконструкції внутрішньої поверхні тріщини. Будується модель тріщини, розраховано точність роботи представленого методу. Результати роботи реалізованого алгоритму демонструються на прикладі тестового зображення.

1. Вступ

Одним з методів контролю стану тріщиностійкості елементів конструкцій [1-3], а також інших видів пошкоджень поверхні конструкційних матеріалів, які виникають внаслідок тертя у вузлах елементів конструкцій, циклічних навантажень [4], є дослідження металографічних зображень, на яких зафіксований стан поверхні елементів конструкцій на їхніх окремих ділянках [5-7]. Ручна обробка великої кількості зображень є достатньо трудомісткою і дає можливість, в більшості випадків, отримати інформацію про характеристики тріщин лише у площині зображення. Адаптація та застосування сучасних методів автоматизованої обробки зображень до конкретних задач в області металографії дозволяє значно підвищити ефективність роботи операторів із зображеннями та отримати з них більше інформації про об'єкти досліджуваної сцени. Зокрема, існує можливість отримання інформації про тривимірну структуру об'єктів на зображеннях, базуючись на інформації двовірних зображень чи їх серій, що дуже важко і навіть практично неможливо зробити вручну.

Прогнозування тріщиностійкості елементів конструкцій пов'язане з визначенням параметрів тріщин у різні моменти часу. Одним з параметрів тріщини, який використовується для прогнозу надійності елементів конструкцій, є довжина тріщини [3]. В даній статті розглядається проблема оцінки довжини тріщини (глибини тріщини в тривимірному просторі) за її двовірними зображеннями.

Система отримання і обробки інформації зображень матеріалів для аналізу тривимірної структури поверхні повинна містити джерело світла, при потребі додаткову оптичну систему (наприклад мікроскоп) і відеокамеру. Досліджуваний зразок матеріалу освітлюється

джерелом некогерентного світла. Відбите від поверхні зразка світло сприймається відеокамерою і передається для аналізу у комп'ютер. При відновленні тривимірної структури поверхні об'єктів, відбите від яких світло потрапило у відеокамеру, розглядають два типи відбиття: дифузне і дзеркальне [8-10]. Об'єкти з дифузним відбиттям, що відкидають рівну світлову інтенсивність у всіх напрямках спостереження, є простіші для аналізу та відновлення 3D інформації зображень, тому на даному етапі досліджень ми зупинилися лише на них [11]. 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. З розгляду умов реалізації алгоритму 3D реконструкції по тріаді зображень за диференціальним методом [11] у вигляді програми видно, що створення макета системи обробки з програмою 3D реконструкції по тріаді зображень за диференціальним методом потребує вирішення таких завдань: 1) Розробка технологічних прецизійних диференціальних вузлів фіксації положення джерела світла у приймачі зображення. 2) Прецизійне юстування макета системи під час експлуатаційних досліджень.

Таким чином, на етапі створення макета системи, експлуатація і юстування комплексу обробки, а також створення програми 3D реконструкції по тріаді зображень з використанням диференціального методу є потенційно складними і вимагають складних технологічних рішень. Тому доцільно спростити розробку макета системи, модифікувавши алгоритм реконструкції і відповідну йому програму.

Мета дослідження: Створення комп'ютерного макета системи обробки з програмою 3D реконструкції інформації досліджуваного об'єкта за тріадою зображень, отриманих при різних положеннях джерела світла, та формування рекомендацій по покращенню точності 3D реконструкції.

Розглянуті задачі: 1) Побудова комп'ютерних моделей тріщини, що дозволяють визначати параметри тріщиностійкості. 2) Комп'ютерне моделювання тріади зображень тріщини. 3) Розробка алгоритму 3D реконструкції тріщини за тріадою зображень. 4) Побудова програми реконструкції профілю тріщини за тріадою зображень. 5) Оцінка похибок 3D реконструкції та визначення параметрів тріщини.

2.1. Формування ілюмінаційної моделі зображення

Для дифузної моделі відбиття (розглядається монохроматичне зображення) інтенсивність відбиття точки поверхні, освітленої одним джерелом світла, визначається рівнянням [7, 8, 9, 10]

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

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

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

– визначає одиничний вектор нормалі до поверхні в досліджуваній точці;

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad q = \frac{\partial z}{\partial y} \quad (3)$$

– визначають нахил поверхні в околі точки [12];
 $L = (L_x, L_y, L_z)$ – одиничний нормалізований вектор, який визначає напрям на джерело світла.

Стандартно отримати інформацію зображення I_λ (1) можна використовуючи систему обробки інформації зображень матеріалів, в якій досліджуваний зразок матеріалу освітлюється джерелом некогерентного світла. Відбите від поверхні зразка світло сприймається відеокамерою і передається для аналізу у комп'ютер.

Зображення I_λ також можна отримати штучно, змодельовавши процес відбиття від поверхні як функцію $I_\lambda = I_\lambda(L, p, q, I_a, I_{p\lambda} k_d)$, де параметри напряму на джерело світла L , похідні $p = p(x, y)$, $q = q(x, y)$ відомі, а також задані фонова засвітка I_a та зважена дифузним коефіцієнтом інтенсивність джерела освітлення $I_{p\lambda} k_d$.

Обидва підходи з точки зору отримання зображення I_λ – еквівалентні. В даній роботі зупинимось на штучному підході формування I_λ , оскільки це дозволяє контролювати точність роботи розроблених методів 3D реконструкції дослідного зразка.

2.2. Реконструкція похідних дослідного зразка на основі серії штучно створених зображень

Нехай дослідний зразок є фіксований, тобто можна вважати $p = p(x, y)$, $q = q(x, y)$ незмінними і визначеними. Нехай також зафіксовані фонова засвітка I_a та зважена дифузним коефіцієнтом інтенсивність джерела освітлення $I_{p\lambda} k_d$. Нехай з джерелом світла

$$L_m = (L_{xm}, L_{ym}, L_{zm}), \quad m=0,1,2, \quad (4)$$

де $L_0 = (0,0,1)$, $L_1 = (\frac{1}{\sqrt{2}}, 0, \frac{1}{\sqrt{2}})$, $L_2 = (0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}})$,

за виразами (1)-(3) штучно сформована серія зображень $I_{\lambda m} = I_\lambda(L_m)$, таких, що

$$I_{\lambda 0} = I_a + I_{p\lambda} k_d \frac{1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}, \quad (5)$$

$$I_{\lambda 1} = I_a + \frac{1}{\sqrt{2}} I_{p\lambda} k_d \frac{1-p}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}, \quad (6)$$

$$I_{\lambda 2} = I_a + \frac{1}{\sqrt{2}} I_{p\lambda} k_d \frac{1-q}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}. \quad (7)$$

В результаті отримано систему трьох рівнянь з чотирма невідомими p , q , $k_d I_{p\lambda}$, інтенсивністю фону I_a і трьома оцінками $I_{\lambda 0}$, $I_{\lambda 1}$, $I_{\lambda 2}$, які, за умовами реконструкції, теж відомі. Для того щоб знайти похідні вектора нормалі p , q з системи рівнянь (5)-(7), необхідно визначити інтенсивність фону I_a .

Для експериментального визначення інтенсивності фону використовується інформація з двох зображень, одне з яких отримується в результаті тимчасового штучного затінення зразка. Затінення формується за допомогою прямокутника, просторове положення якого над зразком, а, відповідно, і положення тіні визначається системою. Порівняння базового зображення без тіні та зображення із штучним затіненням дозволяє експериментально визначити інтенсивність фону I_a .

При штучному визначенні $I_\lambda(L_m)$, з джерелом світла L_m ($m=0,1,2$), слід звернути увагу на ту обставину, що фонова засвітка набагато менша за другу складову в $I_{\lambda 0}$, $I_{\lambda 1}$, $I_{\lambda 2}$. Для спрощення доцільно на стадії комп'ютерного моделювання вважати інтенсивність фону відомою і покласти

$$I_a = 0. \quad (8)$$

За виконання умови (8) із системи (5)-(7) проведемо визначення оцінок похідних

$$p = 1 - \sqrt{2} \frac{I_{\lambda 1}}{I_{\lambda 0}}, \quad (9)$$

$$q = 1 - \sqrt{2} \frac{I_{\lambda 2}}{I_{\lambda 0}}. \quad (10)$$

Отримані вирази відповідають проведенню першого етапу 3D реконструкції зразка. Для проведення остаточної 3D реконструкції на основі отриманих похідних дослідного зразка доцільно аналітично розглянути зразок детально і, зокрема, виокремити ті його металографічні 3D параметри, які представляють цінність при проведенні металографічного аналізу. Як дослідний зразок розглянемо тріщину.

3. Параметри тріщиностійкості пластини з тріщиною. Аналітична модель тріщини

Прогнозування тріщиностійкості елементів конструкцій пов'язане з визначенням параметрів тріщин у різні моменти часу. Нехай елемент конструкції представляє собою пластину (рис. 1). Дослідну пластину розтягнуто у випробувальній машині нормальними навантаженнями σ , що викликало виникнення тріщини типу «розрив»: переміщення берегів тріщини перпендикулярні до площини тріщини [3]. Для широкого кола елементів конструкцій параметром тріщиностійкості є довжина тріщини [3]. На рис. 1 довжина тріщини z_{max} представляє собою максимальну відстань від висоти z_β до дна тріщини.

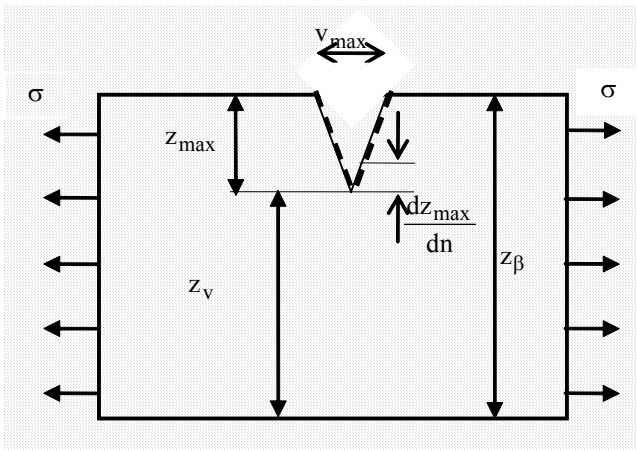


Рис. 1. Пластина з тріщиною

Поле напружень визначається коефіцієнтом інтенсивності напружень [3]

$$K = 1.12\sigma\sqrt{\pi z_{\max}}, \quad (11)$$

який, для малих $\frac{z_{\max}}{z_{\beta}}$, є мірою всіх напружень і деформацій. При досягненні K критичного значення K_c (константа матеріалу) здійсниться руйнування. Під час 3D реконструкції виникають похибки визначення розміру тріщини z_{\max} , що ланцюгово викликає похибку визначення коефіцієнта інтенсивності напружень:

$$\Delta K = 0.56\sigma\sqrt{\frac{\pi}{z_{\max}}}\Delta z_{\max}. \quad (12)$$

Якщо скористатись (11), то вираз (12) можна представити у вигляді відносної похибки коефіцієнта інтенсивності напружень

$$\delta K = \frac{\delta z_{Cr}}{2}, \quad (13)$$

звідки видно, що точність прогнозу тріщиностійкості визначається відносною похибкою розрахунку глибини тріщини

$$\delta z_{Cr} = \frac{\Delta z_{\max}}{z_{\max}}. \quad (14)$$

Під дією циклічних навантажень σ відбувається докритичне повільне зростання тріщини і у послідовних положеннях фронту тріщини утворюються втомні борозенки [1, 3]. На рис. 1 втомні борозенки схематично представлені пунктиром. Ступінь розповсюдження тріщини за цикл, під дією циклічних навантажень, характеризується швидкістю розповсюдження тріщини [3] $\frac{dz_{\max}}{dn}$, де $dn \approx n_2 - n_1$ – приріст кількості циклів навантажень. Нехай $n_2 - n_1 = n_{\max}/2$. Визначимо n_{\max} через зміщення берегів тріщини по осі x :

$$n_{\max} = \frac{v_{\max}}{v_b}, \quad (15)$$

де $v_b = \frac{2\pi}{\omega}$ – період втомної борозенки, а ω є кутовою частотою. Тоді оцінка швидкості розповсюдження тріщини має вигляд

$$\frac{dz_{\max}}{dn} = 2 \frac{z_{\max}}{n_{\max}}. \quad (16)$$

У даній роботі проведемо моделювання втомної тріщини з акцентом на зручне визначення параметрів, необхідних для оперативного прогнозу тріщиноутворення: довжини тріщини z_{\max} і швидкості розповсюдження

її $\frac{dz_{\max}}{dn}$. Розв'язок поставленої задачі пропонується почати із запровадження такої аналітичної моделі тріщини:

$$z_{\beta Cr} = z_{\beta} + z_{CrB}(x, y), \quad (17)$$

де

$$z_{CrB}(x, y) = \begin{cases} B \cos \omega x - z_{\max} + \begin{cases} -kx, & -x_s \leq x \leq 0, \\ kx, & x_s \leq x < 0 \end{cases} \\ 0, & -x_s > x > x_s, \end{cases} \quad (18)$$

тут параметр ω є кутовою частотою, параметр B є амплітудою, $y \in [y_s, y_e]$, $\pm x_s$ – крайні точки тріщини, причому максимальний розкрив тріщини $v_{\max} = 2x_s$. Аналітична модель (17) є незмінною на деякому відрізку $y \in [y_s, y_e]$, тобто похідна $q = 0$ (3). Зауважимо, що в точці $(0, y)$ аналітична модель (18) є непридатною для визначення похідної $p(0, y)$. Ця невизначеність буде знята при накладенні умов дискретизації по координаті x .

У виразі (18) гармоніка описує втомні борозенки. Додатково зробимо зауваження відносно індексів (18). Якщо амплітуда $B = 0$, то аналітична модель (18) описує тріщину і позначається z_{Cr} . Аналогічне зауваження відносно індексації діє і для параметрів тріщини z_{Cr} .

Як видно зі спільного розгляду (18) і рис. 1, коефіцієнт

$$k = \frac{2z_{\max}}{v_{\max}}. \quad (19)$$

Врахувавши (15), визначимо швидкість розповсюдження тріщини $\frac{dz_{\max}}{dn}$ (16) через параметр k моделі (17) таким виразом:

$$\frac{dz_{\max}}{dn} = kv_b. \quad (20)$$

На наступному етапі моделювання, щоб уникнути ситуації, коли похідна $q = 0$ для вертикальної тріщини (17), доцільно вертикальну тріщину замінити тріщиною, нахиленою під кутом $0 < \varphi < \pi/2$ до горизонтальної осі x .

4. Комп'ютерне моделювання зображення тріщини

Зробимо ряд зауважень, які є важливими для використання побудованих методик.

В системі обробки для операцій з функціями

$$u(x, y) \in \{z_\gamma(x, y), p_\gamma(x, y), q_\gamma(x, y)\}, \quad (21)$$

де $\gamma \in \{Cr, CrB\}$ (17), (18), (3) замість неперервних координат $h \in \{x, y\}$ використовується дискретизована сітка координат $l \in \{i, k\}$, де $i = 1, \dots, I$ (I – максимальна дискретна горизонтальна координата апертури), $k = 1, \dots, K$ (K – максимальна дискретна вертикальна координата апертури). Із залученням дискретизації комп'ютерний опис функції (21) набуває вигляду

$$u_{ik} = u(x_i, y_k) = u(i\Delta x, k\Delta y), \quad (22)$$

де

$$h_l = l\Delta h, \quad (23)$$

тут Δh – крок дискретизації по відповідній координаті.

Перехід до дискретних координат $\{i, k\}$ і обмежений діапазон значень поверхонь $z_{ik, \gamma}$ дозволяють здійснити таке:

- 1) Штучно створити модель тріщини $z_{ik, \gamma}$ на базі (17).
- 2) На основі масивів $z_{ik, \gamma}$ повністю, у всіх точках $\{i, k\}$ апертури, визначити в системі обробки масиви похідних $p_{ik, \gamma}$, $q_{ik, \gamma}$.
- 3) Використовуючи визначені $p_{ik, \gamma}$, $q_{ik, \gamma}$, можна обчислити (5)-(7):

$$I_{\lambda 0} = I_{\lambda 0}(p_{ik, \gamma}, q_{ik, \gamma}), \quad I_{\lambda 1} = I_{\lambda 1}(p_{ik, \gamma}, q_{ik, \gamma}), \\ I_{\lambda 2} = I_{\lambda 2}(p_{ik, \gamma}, q_{ik, \gamma}).$$

Зауважимо що на стадії комп'ютерного моделювання (5)-(7) нехтуємо значенням інтенсивності фону I_a (8) і додатково приймаємо, що дифузний коефіцієнт k_d є незмінним для змодельованого зразка з тріщиною $z_{ik, \gamma}$.

Невід'ємною складовою частиною сучасних систем обробки інформації зображень є операції квантування, які найчастіше виконуються відеокамерою. Похибка квантування визначає кількість інформації, що буде збережено у зображенні [13]. Тому, для ефективного проектування і використання запропонованої реконструкції, у зображеннях $I_{\lambda 0}$ (5), $I_{\lambda 1}$ (6), $I_{\lambda 2}$ (7) штучно промітуємо процедуру квантування, з можливістю оцінки похибки, яка вноситься. У результаті квантування отримуємо зображення $\hat{I}_{\lambda 0}$, $\hat{I}_{\lambda 1}$, $\hat{I}_{\lambda 2}$.

Також зауважимо, що вплив на реконструкцію параметрів інших конструктивних елементів відеокамери (давачів і т.ін.) на даному етапі не враховано.

5. Реконструкція глибини поверхні

На основі інформації проквантованих зображень $\hat{I}_{\lambda 0}$, $\hat{I}_{\lambda 1}$, $\hat{I}_{\lambda 2}$ проведемо визначення оцінок похідних p (9) і q (10). На їх основі, на другому етапі, інтегруванням потрібно виконати остаточно 3D реконструкцію глибини поверхні.

Перед початком розгляду другого етапу реконструкції введемо ряд припущень, на які спираються розроблені методики.

1. Оцінка глибини тріщини знаходиться інтегральним накопиченням похідних p , q векторів нормалі, починаючи від опорної точки, яка вибирається на площині. Глибина в опорній точці відома або задається довільно. Детальний опис такої операції в неперервних координатах x, y представлено в [11].

2. Для параметрів відреставрованого зображення тріщини введемо індексацію r .

3. Нехай, перед початком другого етапу комп'ютерної реконструкції глибини поверхні, в системі обробки отримано оцінку похідних вектора нормалі поверхні у вигляді масивів p_{ikr} (9), q_{ikr} (10), де $i = 1, \dots, I$, $k = 1, \dots, K$.

4. Нехай опорну точку вибрано таку, що

$$z_{ll, r} = 0. \quad (24)$$

З врахуванням (24) дискретна апроксимація інтегрального накопичення похідних p, q векторів нормалі приймає таку форму:

$$z_{ikr} \approx z_{lkr} + \Delta x \sum_{n=1}^{i-1} p_{nkr}, \quad (25)$$

де $i = 1, \dots, I$, $k = 1, \dots, K$;

$$z_{lkr} \approx \Delta y \sum_{m=1}^{k-1} p_{lmr}. \quad (26)$$

Як видно з (26), одномірний масив глибин z_{lkr} , $k = 1, \dots, K$ визначено на основі одномірного масиву похідних q_{lmr} . При такому підході лише ця інформація необхідна і достатня замість q_{ikr} , де $i = 1, \dots, I$, $k = 1, \dots, K$ для повної реконструкції глибин.

Таким чином, отримано алгоритм реконструкції масиву глибин зразка з тріщиною (25), який можна реалізувати програмно.

6. Оцінка якості реконструкції тріщини і визначення її параметрів під впливом завад квантування і реконструкції

Зауважимо, що реконструйоване зображення тріщини (25) міститиме похибки. Зокрема, однією з очікуваних причин неякісної реконструкції металографічного зображення тріщини, яку потрібно враховувати при використанні запропонованих алгоритмів до реальних металографічних зображень тріщини, є завади у приймачі зображення через вплив неточності встановлення просторових параметрів положення джере-

ла світла. Але на даному етапі досліджень прийmemo, що процедура формування інтенсивності зображення тріщини (5)-(7), по використанню джерела світла, є ідеальною і не вносить спотворення. Ще однією очікуваною причиною неякісної реконструкції металографічного зображення тріщини є завади у приймачі зображення через вплив квантувача. Ці завади відеокамери буде промодельовано. В результаті квантування $I_{\lambda 0}$ (5), $I_{\lambda 1}$ (6), $I_{\lambda 2}$ (7) отримаємо зображення $\hat{I}_{\lambda 0}$, $\hat{I}_{\lambda 1}$, $\hat{I}_{\lambda 2}$. І, нарешті, ще однією очікуваною причиною неякісної реконструкції є похибки самої процедури реконструкції (9), (10), (25) і (26).

Визначимо аналітично комплексний вплив похибок квантування і похибок процедури реконструкції (далі скорочено похибки квантування реконструкції) на якість реконструкції глибини тріщини по серії зображень. Така інформація потрібна для того, щоб, у перспективі, отримати зменшення таких похибок і скоригувати їх, а також сформувані такі операції обробки, які зменшують похибки цього типу у системі обробки інформації.

Перед початком розгляду впливу на зображення зазначених завод реконструкції зробимо додаткові припущення та зауваження.

1. Параметри реконструйованого зображення тріщини не пошкоджені впливом методичних похибок реконструкції внаслідок зміни просторових параметрів джерела світла.

2. Для параметрів штучно створеного зображення тріщини (17)-(18) введемо індексацію a .

3. Для параметрів реконструйованого зображення тріщини, пошкоджененого впливом похибок квантування реконструкції, продовжимо застосовувати індексацію r .

4. В тих випадка, коли немає необхідності визначати належність до елемента $o \in \{a, r\}$, індексація з o відсутня.

Визначимо оцінку якості реконструкції глибини тріщини.

Нехай штучно створена комп'ютерним модель поверхні пластини з тріщиною $z_{ikCr,a}$, $i=1, \dots, I$, $k=1, \dots, K$. Нехай комп'ютерна модель поверхні пластини з тріщиною створена на основі дискретного еквівалента аналітичної моделі (17), (18), де $B=0$, таким чином, що у точках $\{(i, c-i), i=1, \dots, K\}$, де c – постійна ціла, розташовані мінімуми (див. рис. 1)

$$z_{i,c-i,a} = z_{i,c-i,Cr,a} = z_{\beta} - z_{\max}, \quad (27)$$

які фігурують в (17), (18), і умова незмінності параметрів моделі по координаті у знята (дискретний еквівалент координата k):

$$k = c - i. \quad (28)$$

Таким чином, під час оцінки якості реконструкції глибини тріщини замість повного зображення $z_{ikCr,a}$,

$i=1, \dots, I$, $k=1, \dots, K$ доцільно зосередитись на розгляді сегмента (діагоналі) зображення $z_{ikCr,a}$, де $k=c-i$, $i=1, \dots, K$, точки якого, для прогнозування тріщиноздатності, є найінформативніші (14)-(15). Користуючись кожною з точок $(i, c-i)$, можна визначити якість реконструкції для зображення тріщини, як приріст:

$$\Delta z_{Cr} = \Delta z_{i,c-i,Cr} = z_{i,c-i,Cr,a} - z_{i,c-i,Cr,r}. \quad (29)$$

Зауважимо, що для наступного контролю якості прогнозу тріщиноздатності (13) необхідно визначити відносну похибку розрахунку глибини тріщини (14), яка, в уточнених позначеннях, набуває форми

$$\delta z_{Cr} = \frac{\Delta z_{Cr}}{z_{i,c-i,Cr,a}}. \quad (30)$$

Визначимо оцінку якості реконструкції швидкості розповсюдження тріщини. Нехай комп'ютерна модель поверхні пластини з тріщиною і втомними борозенками $z_{ik,CrB,a}$, $i=1, \dots, I$, $k=1, \dots, K$ створена на основі дискретного еквівалента аналітичної моделі (18), де $B > 0$, таким чином, що у точках $\{(i, c-i), i=1, \dots, K\}$ розташовані мінімуми (27), які фігурують у (18) і умова незмінності параметрів моделі (18) по координаті у знята. Для пропонованої моделі, під час визначення абсолютних похибок швидкості розповсюдження тріщини $\frac{dz_{\max}}{dn}$, будемо вважати параметр n_{\max}

(16) фіксованим, що дасть

$$\Delta \frac{dz_{\max}}{dn} = \frac{2}{n_{\max}} \Delta z_{\max}. \quad (31)$$

З виразів (16) і (31) видно, що відносна похибка визначення швидкості розповсюдження тріщини

$$\delta \frac{dz_{\max}}{dn} = \delta z_{Cr}. \quad (32)$$

7. Приклад програмного моделювання штучного зображення тріщини

Для апробації алгоритму 3D реконструкції інформації використовувались дві тестові моделі тріщини T_1 , T_2 . Для формування кожної з них використовується дискретизована сітка координат $i=1, \dots, 561$, $k=1, \dots, 761$. Результати роботи програми по формуванню тестових моделей тріщини у вигляді напівтонових 3D проєкцій представлені на рис. 2 і 3. Зауважимо, що на рис. 2 представлено повне зображення T_1 , а на рис. 3 – фрагмент зображення T_2 . Для фрагмента розміри апертури скорочено $i=1, \dots, 240$, $k_1=k-540$, де $k=540, \dots, 560$. Модель T_1 (див. рис. 2) містить тріщину $z_{ik,Cr}$. Модель T_2 (див. рис. 3) містить тріщину і борозенки $z_{ik,CrB}$.

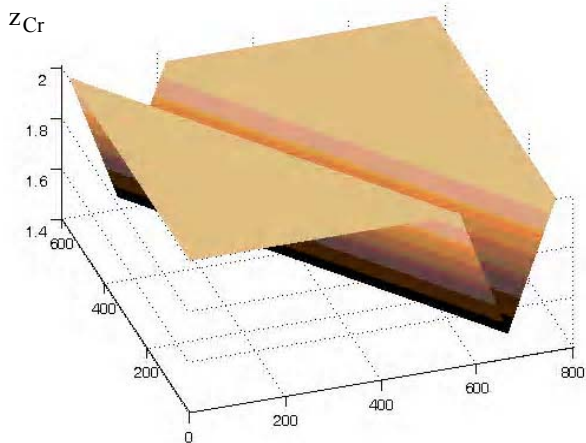


Рис. 2. Комп'ютерна модель T_1 поверхні пластини з тріщиною

Комп'ютерна модель T_1 поверхні пластини з тріщиною створена таким чином, що у точках $\{(i, c-i), i=1, \dots, I\}$, де

$$c = 662 \quad (33)$$

розташовані мінімуми z_{\max} (27).

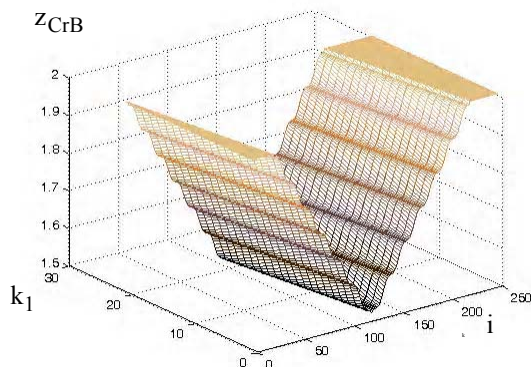


Рис. 3. Фрагмент зображення T_2 поверхні пластини з тріщиною і борозенками

Амплітуда втомних борозенок, яка використовується для програмного формування борозенок зображення T_2 , має значення

$$B = 0.011. \quad (34)$$

7.1. Приклад програмного застосування

Дві тестові моделі тріщини T_1 (див. рис. 2) і T_2 (див. рис. 3) використовувалися для комп'ютерного генерування штучних зображень $I_\lambda(L_m)$ (5)-(7).

Процедура формування штучних зображень на базі моделі тріщини $\gamma \in \{Cr, CrB\}$ (моделі T_1, T_2) містить такі операції:

1. На основі $z_{ik,\gamma}$, де $i=1, \dots, I$, $k=1, \dots, K$ в кожній точці ik , визначаються масиви похідних $P_{ik,\gamma}$ (3), $Q_{ik,\gamma}$ (3).

2. Результати розрахунків п. 1 використовуються для формування серії штучних зображень тестової моделі тріщини

$$I_\lambda(L_m) = I_{\lambda\gamma}(L_m) = I_\lambda(L_m, P_\gamma, Q_\gamma), \quad (35)$$

де $m=0,1,2$ за співвідношеннями (5)-(7). Для розрахунку відеосигналів $I_{\lambda\gamma}(L_m)$ додатково прийнято умову (8) і

$$I_{p\lambda k_d} = 250. \quad (36)$$

3. Результати розрахунків п. 2 зображення $I_{\lambda\gamma}(L_0)$ (5), $I_{\lambda\gamma}(L_1)$ (6), $I_{\lambda\gamma}(L_2)$ (7) квантуються у діапазоні значень $[0, 255]$. В результаті квантування отримаємо зображення $\hat{I}_{\lambda\gamma}(L_0)$, $\hat{I}_{\lambda\gamma}(L_1)$, $\hat{I}_{\lambda\gamma}(L_2)$.

Згідно з наведеною процедурою формування штучних зображень для тестової моделі тріщини T_1 було програмно отримано зображення $\hat{I}_{\lambda Cr}(L_0)$, $\hat{I}_{\lambda Cr}(L_1)$, $\hat{I}_{\lambda Cr}(L_2)$. Для тестової моделі тріщини T_2 було отримано $\hat{I}_{\lambda CrB}(L_0)$, $\hat{I}_{\lambda CrB}(L_1)$, $\hat{I}_{\lambda CrB}(L_2)$. З цих серій зображень найбільш представницька і характерна серія зображень для тестової моделі тріщини T_2 . Ця серія зображень, у вигляді напівтонових 3D проєкцій, представлена на рис.4 і 5.

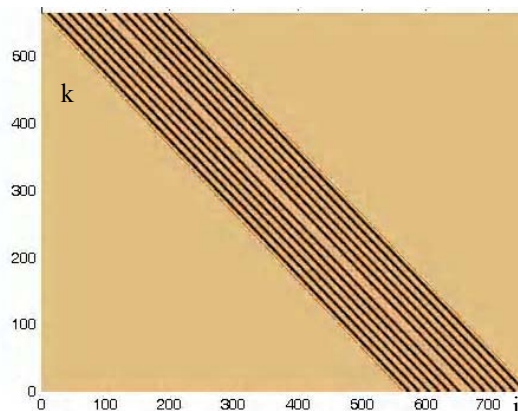


Рис. 4. Комп'ютерна модель зображення пластини з тріщиною і втомними борозенками $I_{\lambda, CrB}(L_0)$. Робочий діапазон значень інтенсивності, в якому виконується візуалізація $[150, 250]$

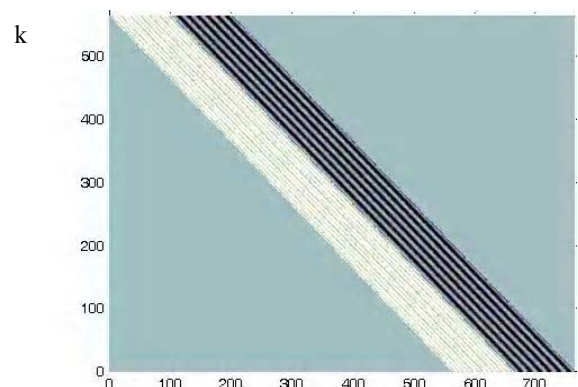


Рис. 5. Комп'ютерна модель зображення пластини з тріщиною і втомними борозенками $I_{\lambda, CrB}(L_1)$ ($I_{\lambda, CrB}(L_2)$)

7.2. Реконструкція глибини поверхні пластини з тріщиною

Для програмної апробації алгоритму 3D реконструкції інформації використовувалось дві серії квантованих тестових зображень $\hat{I}_{\lambda\gamma}(L_0)$, $\hat{I}_{\lambda\gamma}(L_1)$, $\hat{I}_{\lambda\gamma}(L_2)$, $\gamma \in \{Cr, CrB\}$.

Процедура реконструкції глибини поверхні пластини з тріщиною, на базі тріади зображень, містить такі операції:

1. На основі $\hat{I}_{\lambda\gamma}(L_0)$, $\hat{I}_{\lambda\gamma}(L_1)$, за виразом (9), у кожній точці ik визначається похідна $P_{ik,\gamma}$.
2. На основі $\hat{I}_{\lambda\gamma}(L_0)$, $\hat{I}_{\lambda\gamma}(L_2)$, за виразом (10), у кожній точці ik визначається похідна $Q_{ik,\gamma}$.
3. Інтерактивно вибирається опорна точка z_{llr} така, що виконується (24).
4. На основі одномірного масиву похідних q_{lmr} , де $m = 1, \dots, K$ (п.2), за накопиченнями (26), визначається одномірний масив глибин z_{lkr} , $m = 1, \dots, K$. Зауважимо, що крок Δy є апріорно заданий.
5. На основі одномірного масиву глибин z_{lkr} , $m = 1, \dots, K$ (п.4) та двохмірного масиву похідних p_{ikr} , де $i = 1, \dots, I$, $k = 1, \dots, K$ (п.1), за накопиченнями (25), визначається двомірний масив глибин z_{lkr} . Зауважимо, що крок Δx також є апріорно заданий.

Згідно з представленою процедурою 3D реконструкції на основі зображень $\hat{I}_{\lambda Cr}(L_0)$, $\hat{I}_{\lambda Cr}(L_1)$, $\hat{I}_{\lambda Cr}(L_2)$ було програмно отримано масив глибин $z_{lk,Cr,r}$, а на основі зображень $\hat{I}_{\lambda CrB}(L_0)$, $\hat{I}_{\lambda CrB}(L_1)$, $\hat{I}_{\lambda CrB}(L_2)$ було програмно отримано масив глибин $z_{lk,CrB,r}$.

Після огляду і співставлення отриманих результатів було встановлено таке.

Якщо не враховувати крайові ефекти реконструкції, то візуально реконструйований масив $z_{Cr,r}$ ($z_{CrB,r}$) збігається з масивом $z_{Cr,a}$ ($z_{CrB,a}$), представленим на рис.2 (рис.3). Тому доцільно простежити якість реконструкції кількісно.

Зауважимо, що для того, щоб у наступному аналізі не враховувати крайові ефекти реконструкції, апертуру реконструйованих зображень $i = 1, \dots, I$, $k = 1, \dots, K$ буде скорочено до розмірів $i = 1, \dots, I-1$, $k = 1, \dots, K-1$.

7.3. Кількісна оцінка похибок розрахунку характеристик тріщини

Для кількісної оцінки якості 3D реконструкції характеристик тріщини застосуємо такі параметри:

1. Абсолютну похибку розрахунку глибини тріщини (29).
2. Відносну похибку розрахунку глибини тріщини (30).
3. Абсолютну похибку визначення швидкості розповсюдження тріщини (31).

Результати роботи програми по визначенню абсолютної похибки розрахунку глибини площини з тріщиною для всіх точок зображення T_1 подані на рис. 6 та, для кращої візуалізації точок, які належать самій тріщині, на скопченій апертурі – на рис. 7.

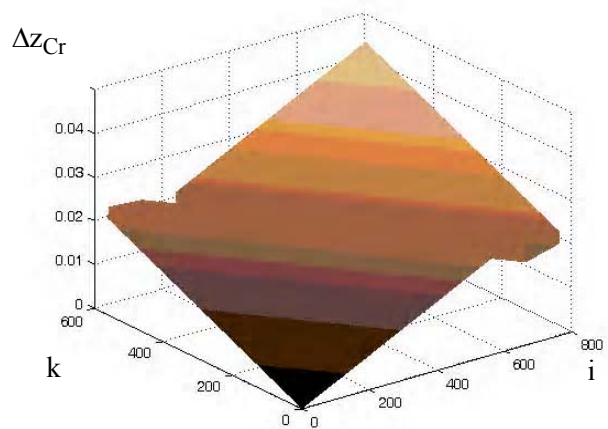


Рис. 6. Абсолютна похибка розрахунку глибини площини з тріщиною

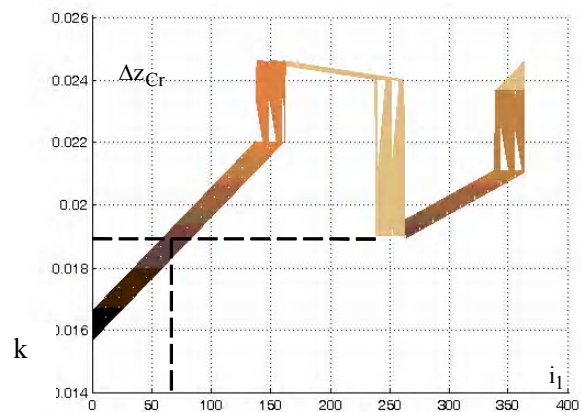


Рис. 7. Фрагмент зображення абсолютної похибки розрахунку глибини тріщини (див. рис. 5). Порівняно з рис.6 розміри апертури скорочено, $i_1 = i - 400$, $k = 1, \dots, 25$

При візуалізації результатів враховано, що комп'ютерна модель зображення пластини з тріщиною і втисненими борозенками $I_{\lambda,CrB}(L_1)$ (див. рис.5) візуально практично співпадає із зображенням комп'ютерної моделі $I_{\lambda,CrB}(L_2)$ та має однаковий робочий діапазон інтенсивності, в якому виконується візуалізація [100, 230].

Як видно з рис. 6, похибки визначення різних точок площини відрізняються. Зауважимо, що з усього масиву похибок найбільший інтерес представляють похибки визначення точок (27)

$$z_v = z_{i,c-i,Cr} \quad (37)$$

З виразу (27) видно, що будь-яку з точок $z_{\beta,o}$, яка належить площині (див. рис. 1, 2), можна використати для визначення глибини тріщини

$$z_{\max,o} = z_{\beta,o} - z_{v,o} \quad (38)$$

Вибір коректуючої точки площини $z_{\beta,o}$ для розрахунку глибини тріщини доцільно провести таким чином, щоб зменшити похибку

$$\Delta z_{\max} = \Delta z_{\beta} - \Delta z_v \quad (39)$$

Як видно з виразу (39), зменшити похибку Δz_{\max} можна провівши взаємокомпенсацію складових. Щоб це зробити, для кращої візуалізації шуканих точок Δz_{β} розглянемо фрагмент зображення абсолютної похибки розрахунку глибини площини з тріщиною (див. рис. 7).

В точках діагоналі мінімуму тріщини $\{(i, c-i), i=1, \dots, 561; c=662\}$ програмно отримане таке значення похибки (29):

$$\Delta z_v = \Delta z_{i,c-i,Cr} = 0.019 \quad (40)$$

Як видно з рис.7, точка площини Δz_{β} , яка мінімізує похибку Δz_{\max} (39), має координати (465, 25). Таким чином, визначено шукану коректуючу точку площини $z_{\beta} = z_{465,25}$.

Програмно отримане наступне значення похибки $\Delta z_{\beta 465,25} \approx 0.0192$, що, спільно з (40), дозволяє оцінити абсолютну похибку розрахунку глибини тріщини

$$\Delta z_{\max} = 2 \cdot 10^{-4}, \quad (41)$$

а також оцінити за (30) відносну похибку розрахунку глибини тріщини $\delta z_{Cr} = 4 \cdot 10^{-4}$. Отже, ми можемо визначати прогноз тріщиностійкості (11) з відносною похибкою $\delta K = 2 \cdot 10^{-4}$.

Таким чином, отримано суттєве зменшення відносної похибки розрахунку глибини тріщини і відповідне підвищення прогнозу тріщиностійкості. Слід зауважити, що таке покращення стало можливим завдяки апріорно визначеній абсолютній похибці розрахунку глибини площини з тріщиною. Така інформація буде відсутня при натурних металографічних дослідженнях і її, у перспективі, потрібно отримати додатковим комп'ютерним моделюванням досліджуваних тріщин.

Оцінимо похибку розрахунку швидкості розповсюдження тріщини. Як видно з рис.4, максимальна кількість циклів навантажень (15) $n_{\max} = 12$, що сукупно з даними абсолютної похибки розрахунку глибини тріщини (40) за (31) дозволяє оцінити значення абсолютної похибки визначення швидкості розповсюдження тріщини:

$$\Delta \frac{dz_{\max}}{dn} = 3.3 \cdot 10^{-5} \quad (42)$$

Зіставимо отриманий результат з результатами програмних розрахунків, представлених на рис. 8, де показано абсолютну похибку Δz_{CrB} для точок зображення T_2 .

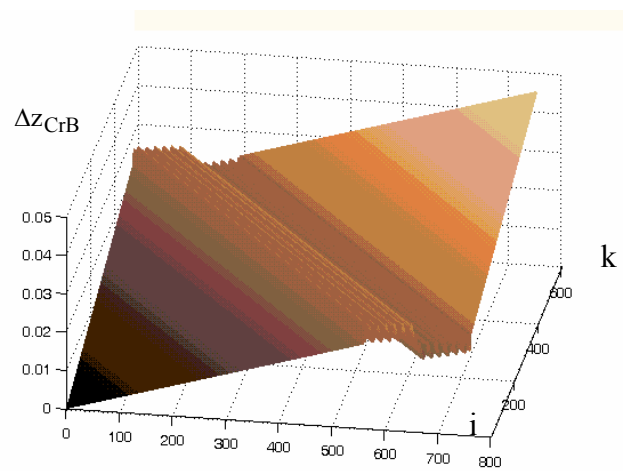


Рис. 8. Абсолютна похибка розрахунку глибини площини з тріщиною і втомними борозенками

Як видно з рис. 8, абсолютна похибка визначення швидкості розповсюдження тріщини (43) менша, ніж похибка Δz_{CrB} для точок зображення T_2 , які належать розкриттю тріщини. Щоб проаналізувати ці похибки, доцільно вилучити з аналізу похибку Δz_{Cr} :

$$\Delta z_B = \Delta z_{CrB} - \Delta z_{Cr} \quad (43)$$

На рис. 9 представлено абсолютну похибку розрахунку Δz_B для точок частини зображення T_2 , які належать переважно розкриттю тріщини.

Як видно з рис. 9, за $\Delta n = 11$ циклів навантажень значення зміни абсолютної похибки $\frac{\Delta(\Delta z_B)}{\Delta n} = 2 \cdot 10^{-4}$ значно переважає оцінку значення абсолютної похибки визначення швидкості розповсюдження тріщини (42), тому останнім при визначенні значення абсолютної похибки швидкості розповсюдження тріщини можна знехтувати і оцінити абсолютну похибку визначення швидкості розповсюдження тріщини

$$\Delta \frac{dz_{\max}}{dn} = 2 \cdot 10^{-4}$$

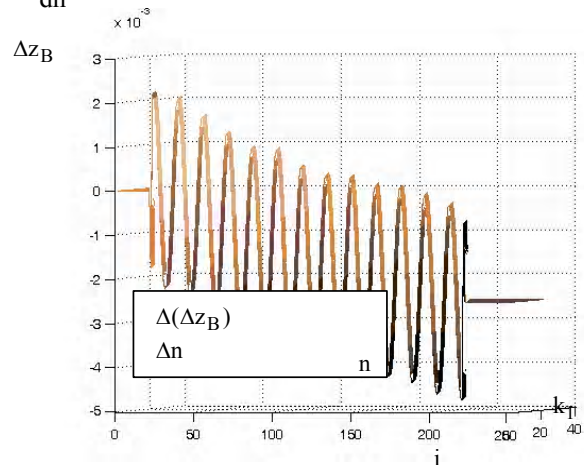


Рис. 9. Фрагмент зображення абсолютної похибки розрахунку втомних борозенок тріщини. Порівняно з рис. 9 розміри апертури скорочено $i=1, \dots, 250$, а $k_1 = k - 540$, де $k=540, \dots, 560$

8. Висновки

Розглянута проблема отримання інформації про поверхню матеріалів за допомогою методів обробки та аналізу зображень. А саме, розглянуто задачу тривимірної реконструкції поверхні матеріалу за тріадою її зображень, отриманих із спеціально узгодженими положеннями джерела світла за кутом. Зображення зразка із тріщиною штучно згенеровані за допомогою комп'ютера. Реконструкція проводиться в рамках дифузної моделі відбиття. Покроково описано методи та алгоритми, які на основі зображень зразка з тріщиною виконують реконструкцію тривимірної поверхні тріщини та дозволяють оцінити її глибину.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що, на основі описаних методів визначення інформації про інтенсивність відбиття, для випадку функціональної залежності від кута освітлення джерела світла (інші параметри приймача системи обробки є фіксованими) отримано оцінки похідних векторів нормалі. Для цього визначається тріада зображень інтенсивності відбиття. Базове зображення отримується з вертикальним розташуванням джерела світла. Визначення інших двох інтенсивностей відбиття виконується з кутами, які локалізовані у одній з двох вертикальних ортогональних площин трьохмірного простору. Ця інформація дозволяє описати тривимірну поверхню матеріалу у вигляді системи рівнянь, що дозволяє визначити похідні векторів нормалі. Оцінка глибини тріщини знаходиться інтегральним накопиченням похідних векторів нормалі тріщини, починаючи від однієї з точок поверхні, яка приймається за опорну. Для штучно створеного зображення визначена абсолютна і відносна похибки реконструкції глибини тріщини і встановлений вплив відносної похибки реконструкції на якість прогнозу тріщиностійкості матеріалу.

Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблений алгоритм програмно реалізований у вигляді віртуальної системи обробки інформації, яка забезпечена приймачем з джерелом світла, що має змінний кут освітлення. Визначені похибки реконструкції глибини тріщини. Запропонована система дозволить по тріаді зображень отримувати тривимірну інформацію про матеріали, які досліджуються, в даному випадку про тріщини у матеріалі.

Наведено програмно розраховані похибки реконструкції та теоретичні прийоми, які дозволяють зменшити вплив похибок реконструкції на визначення глибини тріщини, що, у перспективі, при розповсюдженні дії наведеного аналізу на реконструкцію тріщин з реальних металографічних зображень дозволить проводити прогноз тріщиностійкості з більшою 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 // Elsevier Wear. 2001. V.251. P.1218-1226. 6. *Szala J.* Zastosowanie metod komputerowej analizy obrazu do ilościowej oceny struktury materialow. W. Politechnika Slaska, Zeszyty naukowe, 2000. №1518. 167 p. 7. *Русин Б.П., Іванюк В.Г., Лау Г., Довгунік В.М., Корній В.В.* Комп'ютерна кількісна оцінка фазового складу матеріалу за кольоровим металографічним зображенням // Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2004. № 5. С.77-80. 8. *Andrea Basso, Hans Peter Graf, Dave Gibbon, Eric Cosatto, Shan Liu* Virtual Light: Digitally-Generated Lighting For Video Conferencing Applications // ICIP 2001. 2001. P.1085-1088. 9. *Романюк О.Н., Чорний А.В.* Високопродуктивні методи та засоби зафарбування тривимірних графічних об'єктів. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.190с. 10. *Порев В.* Комп'ютерна графіка. Київ: "Корнійчук", 2000. 256с. 11. *Русин Б.П., Іванюк В.Г., Корній В.В., Лисак Ю.В.* Оцінка об'єму тріщин на серіях зображень // Радіоелектроніка та інформатика. 2007. № 3. С. 65-70. 12. *Смирнов В.И.* Курс высшей математики. Т. 1. М.: Наука, 1967. 480с. 13. *V. Ivanjuk, O. Kapshy, G. Lau, M. Lobur.* Quantizer error of image processing systems, Матеріали Міжнародної конференції TCSET'2005. "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій комп'ютерної інженерії". 2005, Львів-Славськo Вид. Національного університету "Львівська політехніка". С.437-438.

Надійшла до редколегії 13.03.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Пуятін Є.П.

Русин Богдан Павлович, д-р техн. наук, проф., зав. відділом "Методи та системи обробки, аналізу та ідентифікації зображень" Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАНУ. Наукові інтереси: обробка та розпізнавання зображень. Адреса: Україна, 79601, Львів, вул. Наукова, 5а, e-mail: rusyn@ipm.lviv.ua.

Іванюк Віталій Григорович, інженер відділу "Методи та системи обробки, аналізу та ідентифікації зображень" 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.

Капшій Олег Вірославович, канд. техн. наук, н.с. відділу "Методи та системи обробки, аналізу та ідентифікації зображень" Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАНУ. Адреса: Україна, 79601, Львів, вул. Наукова, 5а, тел.: 22-96-530, e-mail: dep32@ipm.lviv.ua.

Ануфрієва Наталія Павлівна, аспірантка Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАНУ. Наукові інтереси: обробка та розпізнавання зображень. Адреса: Україна, 79601, Львів, вул. Наукова, 5а.