УДК 383.8:621.396.96:621.396.6.

ОЦІНКА ГЛИБИНИ ПІТІНГА ЗА ЗОБРАЖЕННЯМИ ПОВЕРХНІ МАТЕРІАЛУ

РУСИН Б.П., ІВАНЮК В.Г., КАПШИЙ О.В., АНУФРІЄВА Н. П., ПОХМУРСЬКИЙ А. Ю.

Пропонується метод визначення глибини пітінга на основі аналізу металографічного зображення ділянки конструкції, яка містить пітінг. Проводиться огляд основних технічно-аналітичних перетворень інформації корисних для контролю стану пітінгостійкості металів за участю даних реставрації глибини пітінга запропонованим методом. На основі цього, віповідно до потреб контролю стану пітінгостійкості металів, представлено практичний результат реставрації глибини пітінга.

1. Вступ

За останні роки область контролю стану пітінгостійкості елементів конструкцій значно збільшилась, бо цьому сприяло виникнення нових пристроїв і методів у системах дефектоскопічних засобів і комплексах неруйнівного контролю [1-6]. Однак, залишаються певні недоліки в роботі зазначених пристроїв, і на їх усунення спрямовані зусилля значної частини дослідників, які працюють у галузі дефектоскопії.

Одним з методів контролю стану пітінгостійкості елементів конструкцій [1, 2, 7] є дослідження металографічних зображень, на яких зафіксований стан поверхні елементів конструкцій на їх окремих ділянках [8,9]. Ручна обробка великої кількості зображень є достатньо трудомісткою і дає можливість, в більшості випадків, отримати інформацію про такі характеристики пітінгостійкості, як граничні розміри пітінга [10,11], 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 від них більше інформації про такі об'єкти досліджуваної сцени, як пітінги. В цьому випадку є потенційна можливість отримати інформацію про тривимірну структуру пітінгів на зображеннях, базуючись на інформації двовимірних зображень [12], що дуже тяжко і навіть практично неможливо зробити вручну в зв'язку з незначними розмірами пітінга. Відомо, що залежно від довготривалості пітінгової корозії глибина і поперечник пітінга може варіювати від мкм до см [1].

В даній статті розглядається одна з проблем контролю пітінгостійкості елементів конструкцій, оцінка глибини пітінга [11] за його двовимірними зображеннями

Система отримання і обробки інформації зображень матеріалів з аналізом 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 [13-16].

Об'єкти з дифузним відбиттям, що відкидають рівну світлову інтенсивність у всіх напрямках спостереження, є простіші для аналізу та відновлення 3D інформації зображень. Саме тому на даному етапі доцільно провести реставрацію 3D інформації пітінга, як об'єкта з дифузним відбиттям. Для цього вплив дзеркальної компоненти на формування зображення пітінга потрібно максимально зменшити. Ефект зменшення впливу дзеркальної компоненти забезпечимо використанням спеціальних умов відеозйомки: розташуємо відеокамеру так, щоб напрямок відеоспостереження і напрямок відбиття точок поверхні пітінга були максимально ортогональні [13-16].

Метою даного дослідження є розробка методів та алгоритмів оцінювання глибини пітінга в матеріалі за допомогою аналізу цифрового зображення його поверхні.

2. Ілюмінаційна модель зображення та визначення її компонентів

Для дифузної моделі відбиття (розглядається монохроматичне зображення) інтенсивність відбиття точки поверхні, освітленої одним джерелом світла, визначається рівнянням [13-16]

$$I_\lambda = I_a + I_{p\lambda}[k_d(N \bullet L), \qquad (1)$$

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

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

– визначає одиничний вектор нормалі до поверхні в досліджуваній точці (рис. 1); $p = \frac{\partial z}{\partial x}$, $q = \frac{\partial z}{\partial y}$ – визначають нахил поверхні в околі точки [17]; $L = (L_x, L_y, L_z)$ – одиничний нормалізований вектор, який визначає напрям на джерело світла (див. рис. 1). Таким чином, маємо для реставрації 3D рівняння з чотирма невідомими p, q, k_d, I_a. Отже, для того, щоб відновити похідні вектора нормалі тривимірної поверхні N, необхідно визначити фонову засвітку I_a та дифузний коефіцієнт k_d. Зробимо припущення, на яке спирається наступний аналіз, а саме будемо вважати, що дифузний коефіцієнт для всіх точок поверхні пітінга незмінний.

Для визначення інтенсивності фону I_a (1) використовуються затінені точки $a = (x_a, y_a)$ (див. рис. 1), розташовані на поверхні пітінга P. В цьому випадку друга складова рівняння (1) дорівнює нулю і $I_a = I_\lambda(x_a, y_a)$.

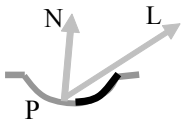


Рис. 1. Вектори дифузної моделі відбиття і зона затінення (чорний колір) поверхні пітінга P: L – вектор напрямку до джерела світла; N – вектор нормалі до поверхні

Наступним кроком реставрації є визначення дифузного коефіцієнта.

Нехай під час відеозйомки для освітлення пітінга в приймачі системи обробки інформації використовується напрям

$$L = (0, \cos\varphi, \sin\varphi) \qquad (3)$$

(рис. 2). При таких умовах освітлення дифузна модель відбиття (1) має вигляд

$$I_\lambda = I_a + I_{p\lambda} k_d \frac{\sin\varphi - q\cos\varphi}{\sqrt{p^2+q^2+1}}. \qquad (4)$$

Для визначення дифузного коефіцієнта використаємо точку максимальної глибини пітінга $z(x_O, y_O)$ (рис. 2), в якій має місце

$$q(x_O, y_O) = p(x_O, y_O) = 0. \qquad (5)$$

В цьому випадку вираз (4) можна представити у такій формі:

$$I_{p\lambda} k_d = \frac{I_{\lambda O} - I_a}{\sin\varphi}, \qquad (6)$$

де $I_{\lambda O} = I_\lambda(x_O, y_O)$. На практиці в околі точки O цілком можливі флуктуації глибини пітінга за рахунок різноманітних дефектів: тріщин, пор, мікровключень, виходу на поверхню границь зерен, дислокацій тощо. Саме тому на даному етапі доцільно провести визначення інтенсивності $I_\lambda(x_O, y_O)$ не локально, а статистично. Ефект зменшення шкідливого впливу флуктуацій глибини пітінга на зображенні забезпечимо усередненням відеосигналу зображення в околі точки O. Для цього з зображення пітінга P виділимо фрагмент

$$Im_O = \{I_\lambda(x,y) \mid (x,y) \in P_O\}, \qquad (7)$$

де

$$P_O = \{(x,y) \mid x \in [x_O - h_x, x_O + h_x], \; y \in [y_O - h_y, y_O + h_y]\} \qquad (8)$$

тут $2h_x (2h_y)$ – горизонтальний (вертикальний (див. рис.2)) розмір сегмента. В результаті усереднення за даними фрагмента Im_O отримується середня арифметична $\bar{I}_\lambda$, яка приймається за оцінку

$$\tilde{I}_{\lambda O} = \bar{I}_\lambda \qquad (9)$$

в (6).

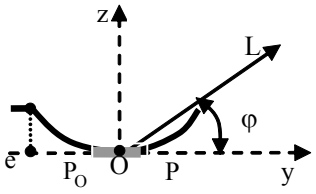


Рис. 2. Проекція сегмента P_O на вісь Oy (сірий відрізок) і кутова орієнтація вектора напрямку до джерела світла L

Наступним, третім кроком реставрації є визначення похідних вектора нормалі. Реконструкцію похідних вектора нормалі проведемо для випадку, коли діє спрощуюче припущення: глибина пітінга $z(x,y)$ є незмінною на деякому відрізку $[x_o, x_o + d]$, що формально можна представити як

$$p = p(x,y) = 0, \qquad (10)$$

де $x \in [x_o, x_o + d]$. З врахуванням (6) і (10) вираз (4) спрощується до рівняння

$$I_\lambda = I_a + \frac{I_{\lambda O} - I_a}{\sin\varphi} \frac{\sin\varphi - q\cos\varphi}{\sqrt{q^2+1}} \qquad (11)$$

з однією невідомою q. Шляхом алгебраїчних перетворень з рівняння (11) отримаємо квадратичне рівняння

$$aq^2 + bq + c = 0, \qquad (12)$$

де

$$a = ctg^2\varphi - \xi; \qquad (13)$$

$$b = -2ctg\varphi; \qquad (14)$$

$$c = 1 - \xi, \qquad (15)$$

причому коефіцієнти a (13), c – (15) залежать від параметра

$$\xi = \frac{(I_\lambda(x,y) - I_a)^2}{(I_{\lambda O} - I_a)^2}. \qquad (16)$$

Корні квадратичного рівняння (12) визначаються стандартно:

$$q_{1,2} = -\frac{b}{2a} \pm \frac{1}{2a}\sqrt{b^2 - 4ac}. \qquad (17)$$

Зауважимо, що реставрація похідної $q_{1,2} = q_{1,2}(x,y)$ в точці (x,y) спирається на припущення незмінності поверхні пітінга по напрямку x (10). Але реально в околі кожної точки поверхні пітінга цілком можливі горизонтальні флуктуації глибини пітінга за рахунок різноманітних дефектів: тріщин, пор, мікровключень, виходу на поверхню границь зерен, дислокацій тощо. Тому на даному етапі реставрації доцільно провести визначення інтенсивності в точці (x,y) з використанням статистичного придушення горизонтальних флуктуацій глибини пітінга. Ефект зменшення шкідливого впливу флуктуацій глибини пітінга на зображенні забезпечимо усередненням відеосигналу зображення пітінга

$$Im_P = \{I_\lambda(x,y) \mid x \in [0, A_x], y \in [0, A_y]\} \qquad (18)$$

в околі точки (x,y) по напрямку x

$$\overline{I}_\lambda(x,y) = \frac{1}{\Delta h}\int_{x_1-\Delta_1}^{x_1+\Delta_1} I_\lambda(s,y)h(x-s)ds, \qquad (19)$$

де

$$I = I_a\ h(x) = \begin{cases} 1, & |x| \le \Delta h/2 \\ 0, & |x| > \Delta h/2 \end{cases}; \qquad (20)$$

$$[x_1 - \Delta_1, x_1 + \Delta_1] \subset [0, A_x]. \qquad (21)$$

Зауважимо, що довжина строба згортки Δh задовільняє умову

$$\Delta h < 2\Delta_1. \qquad (22)$$

В результаті виконання згортки (18) над даними зображення Im_P і сегментації

$$\Delta P = \{(x,y) \mid x \in [x_1 - \Delta_1, x_1 + \Delta_1], y \in [0, A_y]\} \qquad (23)$$

відфільтрованих даних отримується фрагмент зображення

$$\overline{I}\,m_{\Delta P} = \{\overline{I}_\lambda(x,y) \mid (x,y) \in \Delta P\}, \qquad (24)$$

значення якого використовуються для визначення параметра (16) замість $I_\lambda(x,y)$. Щоб зорієнтуватись відносно розміщення сегмента ΔP в апертурі зображення, а також його розміру $2\Delta_1$, наведемо металографічні дані, які стисло описують процес пітінгової корозії [11]. На аноді, яким є пітінг, протікає реакція розчинювання металу, на катоді (решта поверхні) – реакція відновлення окислювача. Внаслідок цих процесів виникає розповсюдження пітінга до виникнення суцільного отвору. Таким чином, найбільшу загрозу елементу конструкції несе збільшення глибини пітінга, особливо максимальної глибини. Точка (x_O, y_O), в якій глибина $z(x_O, y_O)$ досягає критичного максимального значення (див. рис. 2), повинна належати сегменту ΔP. Покладемо в (19), (23)

$$x_1 = x_O. \qquad (25)$$

Переважна частина пітінгів у площині зображення наближено є круглої форми [1, 11]. В цьому випадку застосування декартової системи координат xOy для формального опису пітінга в площині зображення, зокрема в (19), правомірне, коли поперечник пітінга

$$d >> 2\Delta_1. \qquad (26)$$

Оскільки умова незмінності поверхні пітінга по напрямку x (10) є дуже жорсткою, то навіть після низькочастотної фільтрації (19) в сегменті ΔP можуть існувати зони, де ця умова не діє. Тому пом'якшимо умову (10), задавши поріг відмінності точок [18]. Для одномірного відеосигналу $\overline{I}_\lambda(x, y_c) \subset \overline{I}\,m_{\Delta P}$, де $y_c = const$, умова (10) набуває такої форми:

$$\begin{aligned} &[\overline{I}_\lambda(x_a, y_c) - \overline{I}_\lambda(x_b, y_c)]^2 < \varepsilon, \\ &\forall x_a, \forall x_b \in [x_o, x_o + d] \end{aligned}, \qquad (27)$$

де ε – заданий поріг; d – довжина дії умови (20), така, що $d > 0$. З практичної точки зору ця умова означає, що $z = z(x, y_c)$ для $\forall x \in [x_o, x_o + d]$ є практично незмінною. Видно, що умова (27) пом'якшується при зменшенні довжини d і збільшенні порогу ε. Узагальнення форми перевірки незмінності по напрямку x інформації $\overline{I}\,m_{\Delta P}$ алгоритмічною реалізацією умови (27) має такий вигляд:

$$Im_S = \{\varsigma(x,y) \mid (x,y) \in \Delta P\}, \qquad (28)$$

де $$\varsigma(x,y) = \begin{cases} 1, & [\overline{I}_\lambda(x_a, y) - \overline{I}_\lambda(x_b, y)]^2 < \varepsilon; \\ 0, & [\overline{I}_\lambda(x_a, y) - \overline{I}_\lambda(x_b, y)]^2 \ge \varepsilon; \end{cases} \qquad (29)$$
$$\forall x_a, \forall x_b \in [x, x + d].$$

Зауважимо, що вертикальна координата y фіксована в окремому акті оцінки незмінності поверхні пітінга по напрямку x, а поріг ε та відстань d є спільні константи, які задаються апріорі. Таким чином, визначено множину Im_S (28), за допомогою якої на етапі реставраційної інтеграції проаналізуємо приналежність

точок сегмента ΔP зонам незмінності поверхні пітінга по напрямку x.

3. Реконструкція перерізу поверхні пітінга

Розглянемо реконструкцію профілю поверхні дослідного зразка. Перед початком реконструкції зробимо ряд зауважень та припущень, які лежать в основі розробленої методики. Приймаємо, що дифузний коефіцієнт є незмінним для досліджуваного зразка $k_d = \text{const}$. Приймаємо, що для всіх точок зображення проекція вектора нормалі $N_z > 0$. Приймаємо, що похідні $p = p(x, y)$, $q = q(x, y)$ векторів нормалі відомі для точок прямокутного сегмента (23).

Розв'язок поставленої задачі реконструкції можна досягти різними підходами. Наприклад, використати інтегральне накопичення похідних $p(x, y)$, $q(x, y)$ векторів нормалі, починаючи від точки (x_e, y_e), яка приймається за опорну

$$z(x_u, y_u) = z_e + \int_{x_e}^{x_u} p(x, y_e)dx + \int_{y_e}^{y_u} q(x_u, y)dy, \quad (30)$$

де глибина

$$z_e = z(x_e, y_e) \quad (31)$$

задається апріорі або визначається. Якщо точка (x_e, y_e) розташована на початку пітінга (див. рис. 2), а інтеграційний шлях представляє собою відрізок

$$v_e = \{(x_e, y) \mid y \in [y_e, A_y]\} \subset \Delta P, \quad (32)$$

то реконструкція (30) спрощується:

$$z(x_u, y_u) = z_e + \int_{y_e}^{y_u} q(x_e, y)dy. \quad (33)$$

Міняючи дислокацію координати x_e в межах $x_O - \Delta_1, x_O + \Delta_1$, отримаємо множину опорних точок $\{z_e \mid x_e \in [x_O - \Delta_1, x_O + \Delta_1]\}$, причому глибини опорних точок $z_e = \text{const}$. Крім того, міняючи дислокацію координати x_e, отримаємо множину відрізків інтегрування $\{v_e \mid x_e \in [x_O - \Delta_1, x_O + \Delta_1]\}$. Кожний відрізок такої множини може використовуватись для реставрації (33), оскільки глибини опорних точок за умовами визначення однакові. Але до реставрації (33) необхідно перевірити точки відрізка v_e на належність зонам незмінності поверхні пітінга по напрямку x. Нехай для такої перевірки вибраний відрізок v_e. Спираючись на кількісний критерій $\varsigma(x, y)$ (29), для окремої точки $(x_e, y) \in v_e$ необхідно перевірити виконання умови присутності в зоні незмінності поверхні пітінга по напрямку x. Для проведення такої оцінки, користуючись (29), визначимо кількісний критерій у такій формі:

$$\kappa_e(y) = \begin{cases} 1, & I_e(y) > 0, \\ 0, & I_e(y) = 0, \end{cases} \quad (34)$$

де

$$I_e(y) = \int_{x_e - d}^{x_e} \varsigma(x, y)dx. \quad (35)$$

Спираючись на кількісний критерій $\kappa_e(y)$ (34), для окремої точки відрізка v_e необхідно перевірити виконання умови присутності в зоні незмінності поверхні пітінга по напрямку x для всіх точок відрізка v_e. Для проведення такої оцінки скористаємось локальним кількісним критерієм (34) і визначимо загальний кількісний критерій у такій формі:

$$\beta_e = \begin{cases} 1, & \alpha_e = A_y - y_e, \\ 0, & \alpha_e < A_y - y_e, \end{cases} \quad (36)$$

де

$$\alpha_e = \int_{y_e}^{A_y} \kappa_e(y)dy. \quad (37)$$

4. Реконструкція перерізу поверхні пітінга в умовах системи обробки інформації

В системі обробки інформації для формування зображення і проведення реконструкції замість неперервної координати $h \in \{x, y\}$ використовується дискретизована координата $l \in \{i, k\}$, така що $h = l\Delta h$, де Δh – крок дискретизації по координаті $h \in \{x, y\}$; $i = 1, ..., I$ (I – максимальна горизонтальна координата), $k = 1, ..., K$ (K – максимальна вертикальна координата). Дискретизована система координат використовується для опису і розрахунку параметрів реконструкції $u \in \{I_\lambda, \bar{I}_\lambda, \xi, a, b, c, p, q, z\}$, де параметр $u_{ik} = u(x_i, y_k) = u(i\Delta x, k\Delta y)$ є функцією з дискретних координат i, k. Для більшості параметрів реконструкції така операція дискретизації легко реалізується програмно, наприклад, так, як описано у [12]. Специфіка дискретизації може виникнути лише при формуванні специфічних операцій пропонованої роботи: перевірки умови присутності в зоні незмінності поверхні пітінга по напрямку i та реконструкції глибини z. Спочатку розглянемо специфіку дискретизації для множини Im_S (28).

Нехай в результаті виконання дискретизованої форми згортки (19) над даними зображення Im_P отримано фрагмент зображення

$$\bar{I}\,m_{\Delta p} = \{\bar{I}_{\lambda, ik} \mid (i, k) \in \Delta p\}, \quad (38)$$

де

$$\Delta p = \{(i, k) \mid i \in [i_1 - \Delta I_1, i_1 + \Delta I_1]; k \in [0, K]\} \quad (39)$$

– сегмент апертури зображення. Для програмної реалізації перевірки умови присутності в зоні незмінності поверхні пітінга по напрямку i інформації $\bar{I}\,m_{\Delta p}$ представимо множину Im_S (28) у такому вигляді:

$$\text{Im}_S = \{\varsigma_{ik} \mid (i, k) \in \Delta p\}, \quad (40)$$

де

$$\varsigma_{ik} = \begin{cases} 1, & [\overline{I}_{\lambda,i_a k} - \overline{I}_{\lambda,i_b k}]^2 < \varepsilon; \\ 0, & [\overline{I}_{\lambda,i_a k} - \overline{I}_{\lambda,i_b k}]^2 \geq \varepsilon; \end{cases}, \quad \forall i_a, \forall i_b \in [i, i+d], \quad (41)$$

тут ε – заданий поріг, вертикальна дискретна координата k фіксована в окремому акті оцінки присутності в зоні незмінності поверхні пітінга по напрямку i, відстань $d > 1$ є ціла, яка задається програмно. Користуючись зображенням Im_S, яке в горизонтальному напрямку i, необхідно визначити шлях реставраційної інтеграції

$$v_e = \{(i_e, k) \mid k \in [k_e, k_e + \Delta K]\}, \quad (42)$$

де

$$k_O < k_e + \Delta K < K \quad (43)$$

(див. рис. 2). Як видно з рис. 2, точка (i_e, k_e) розміщена на початку пітінга. З застосуванням відрізка v_e (42) реконструкція (33) приймає таку форму:

$$z_{i_e k_u} \approx z_e + \Delta y \sum_{k=k_e}^{k_u} q_{i_e k}, \quad (44)$$

тут $k_u \in [k_e, k_e + \Delta K]$. Слід відмітити, що існує декілька відрізків (42), на основі яких можна провести реставрацію (44). Якщо змінювати дислокацію координати i_e відрізка v_e (42), то отримаємо множину

$$\{v_e \mid i_e \in [i_O - \Delta I_1, i_O + \Delta I_1]\}, \quad (45)$$

де кожний відрізок може бути майбутнім кандидатом для проведення реставрації (44). Але до проведення реставрації (44) необхідно перевірити точки кожного відрізка v_e на належність зонам незмінності поверхні пітінга по напрямку i. Нехай вибраний відрізок v_e (42). Спираючись на кількісний критерій ς_{ik} (41), для окремої точки $(i_e, k) \in v_e$ необхідно перевірити виконання умови присутності в зоні незмінності поверхні пітінга по напрямку i кількістним критерієм

$$\kappa_{e,k} = \begin{cases} 1, & I_{e,k} > 0; \\ 0, & I_{e,k} = 0. \end{cases} \quad (46)$$

де

$$I_{e,k} = \sum_{i=i_e-d}^{i_e} \varsigma_{ik}. \quad (47)$$

Для проведення оцінки виконання умови присутності в зоні незмінності поверхні пітінга по напрямку i для всіх точок v_e визначимо кількісний критерій у такій формі:

$$\beta_e = \begin{cases} 1, & \alpha_e = |\Delta K| + 1, \\ 0, & \alpha_e < |\Delta K| + 1, \end{cases} \quad (48)$$

де

$$\alpha_e = \sum_{k=k_e}^{k_e+\Delta K} \kappa_{e,k}. \quad (49)$$

5. Приклад практичного застосування розробленого алгоритму

Для апробації алгоритму реставрації 3D використовувалась відеоінформація, отримана на трубі сталевій електрозварній діаметром 1220 мм для газонафтопродуктогонів (марка сталі: 17ГС). Відеозйомку пітінга, дислокованого на трубі, проведено кольоровою відеокамерою (10mp CANON EOS 40D Body). Під час відеозйомки забезпечувався напрямок освітлення джерелом світла $L = (0;\ 0{,}88;\ 0{,}47)$, що відповідає куту

$$\varphi = 0{,}49 \quad (50)$$

(див. рис. 2). В результаті відеозйомки було отримане кольорове зображення пітінга

$$Im_p = \{I_{\lambda,ik} \mid \lambda \in \{r, g, b\}, (i, k) \in p\}, \quad (51)$$

де

$$p = \{(i, k) \mid i \in [1, 360], k \in [1, 280]\}. \quad (52)$$

На рис. 3 представлена напівтонова проекція Im_{pg} кольорового зображення пітінга. Окрім пітінга зліва на зображенні розташована метризована біла смуга з міліметровими рисками. Співставляючи розміри об'єктів в міліметрах і пікселях, можна оцінити один з параметрів реставрації (44), крок

$$\Delta v = \Delta x = 1{,}8 * 10^{-2} \text{mm/pixel} \quad (53)$$

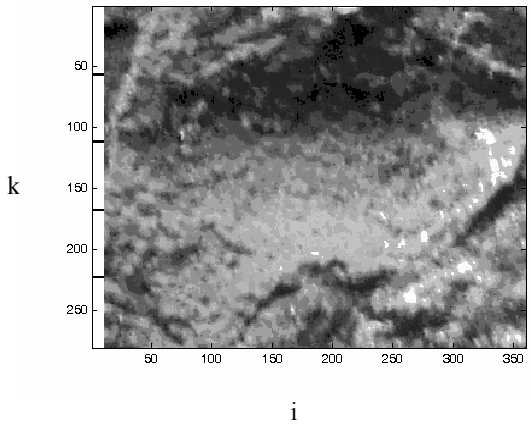


Рис. 3. Зображення пітінга Im_{pg}

Під час контролю стану пітінгостійкості труби найбільш вагомою є інформація про переріз пітінга в найглибшому місці [11]. Як видно з рис. 3, таку інформацію потенційно можна здобути у фрагменті

$$Im_{\Delta p} = \{I_{\lambda,ik} \mid \lambda \in \{r, g, b\}, (i, k) \in \Delta p\}, \quad (54)$$

де

$$\Delta p = \{(i, k) \mid i \in [207, 216], k \in [100, 221]\}. \quad (55)$$

У збільшеному масштабі фрагмент $Im_{\Delta p}$, у вигляді напівтонової проекції $Im_{\Delta pg}$, представлено на рис. 4. Співставляючи рис. 3 та 4 і враховуючи розміри в (55), приходимо до висновку, що систему координат фрагмента $Im_{\Delta pg}$ відносно системи координат зображення Im_{pg} змінено. Застосування нової системи

координат для опису фрагмента $Im_{\Delta p}$ приводить до нової форми

$$Im_{\Delta p} = \{I_{\lambda,i_1k_1} \mid \lambda \in \{r,g,b\}, (i_1,k_1) \in \Delta p_1\}, \quad (56)$$

де $\Delta p_1 = \{(i_1,k_1) \mid i_1 \in [1,10], k_1 \in [1,122]\}$;

$$i_1 = i - 206, \; k_1 = 222 - k. \quad (57)$$

Як видно з рис. 4, на поверхні пітінга спостерігаються горизонтальні флуктуації, порушення стабільності глибини пітінга в горизонтальному напрямку. Така ситуація не дозволяє розпочати перший етап реставрації (13)-(17).

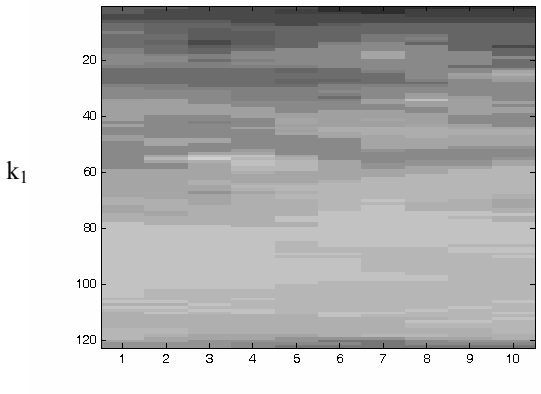


Рис. 4. Фрагмент $Im_{\Delta pg}$ зображення пітінга Im_{pg} (рис.3)

Для усунення шкідливих горизонтальних флуктуацій глибини пітінга було застосовано низькочастотну фільтрацію відеосигналів, базованих на фрагменті (54):

$$Im_{\Delta p} = \{\{I_{\lambda,ik} \mid i \in [207,216]\} \mid k \in [100,221],\}, \quad (58)$$

де $\lambda \in \{r,g,b\}$. Низькочастотна фільтрація відеосигналів (58) програмно реалізована на основі дискретного подання інтегрального перетворення (19). Низькочастотна обробка відеосигналів (58) проведена трьома послідовними кроками. На кожному кроці над вхідним відеосигналом виконувалась дискретизована операція згортки (19). Першим вхідним сигналом був відеосигнал (58). На другому і третьому кроках вхідним сигналом був вихідний сигнал попереднього кроку. Для виконання дискретизованої операції згортки (19) програмою використовувся строб згортки $\Delta h = 7$. Зауважимо, що застосування дискретизованої операції згортки (19) з таким стробом безпосередньо до інформації $Im_{\Delta p}$ (58) неодмінно призводить до крайових пошкоджень інформації

$$\overline{I}\, m_{\Delta p} = \{\{\overline{I}_{\lambda,ik} \mid i \in [207,216]\} \mid k \in [100,221]\}, \quad (59)$$

де $\lambda \in \{r,g,b\}$. Щоб уникнути крайових пошкоджень дискретизованою операцією згортки (19), необхідно мати ширше ніж фрагмент $Im_{\Delta p}$ зображення. От чому низькочастотну обробку проведено з відеосигналами повного зображення

$$Im_p = \{\{I_{\lambda,ik} \mid i \in [1,360]\} \mid k \in [1,280]\}, \quad (60)$$

де $\lambda \in \{r,g,b\}$. В результаті потрійної дискретизованої операції згортки (19) над зображенням Im_p (60) було отримано відфільтроване зображення

$$\overline{I}\, m_p = \{\{\overline{I}_{\lambda,ik} \mid i \in [1,360]\} \mid k \in [1,280]\}, \quad (61)$$

де $\lambda \in \{r,g,b\}$, з якого виділено фрагмент $\overline{I}\, m_{\Delta p}$ (59), вільний від крайових пошкоджень інформації. З масштабом рис. 4 фрагмент $\overline{I}\, m_{\Delta p}$, у вигляді напівтонової проекції $\overline{I}\, m_{\Delta pg}$, представлено на рис. 5.

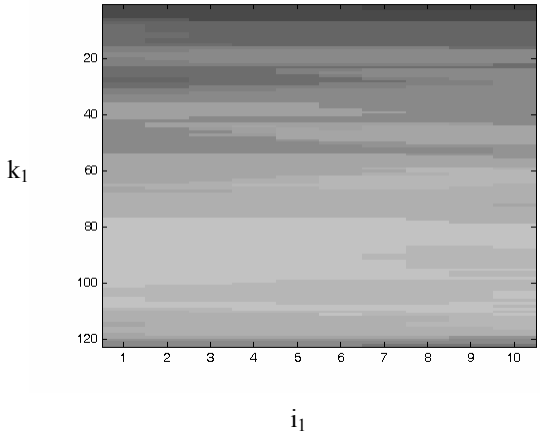


Рис. 5. Низькочастотно відфільтрований фрагмент $\overline{I}\, m_{\Delta pg}$

Зауважимо, що на цьому рисунку використано систему координат (57). Із співставлення фрагмента $\overline{I}\, m_{\Delta pg}$ (див.рис. 5) і фрагмента $Im_{\Delta pg}$ (див. рис. 4) видно, що горизонтальні флуктуації глибини пітінга зменшено і можна розпочати наступний крок реставрації – визначення шляху інтеграції у формі відрізка v_e (42) на основі інформації фрагмента $\overline{I}\, m_{\Delta p}$ (див. рис. 5). Як видно з виразу (42), відрізок $v_e = v_e(i_e,k_e,\Delta K)$. Параметри $i_e, k_e, \Delta K$ потрібно визначити в системі координат фрагмента $\overline{I}\, m_{\Delta p}$ (57). Базуючись на цьому, на основі інформації фрагмента $\overline{I}\, m_{\Delta p}$ (див. рис. 5) необхідно перевірити виконання умови присутності в зоні незмінності поверхні пітінга по напрямку i_1 відрізка v_e.

В системі координат зображення Im_{pg} (див. рис. 3) точки (i_e,k_e) мають координати $\{(i_e,100) \mid i_e \in [207,216]\}$. В системі координат (57) (див. рис. 5) ці ж точки мають координати

$$\{(i_1,122) \mid i_1 \in [1,10]\}. \quad (62)$$

Згідно з (62), (57), (55) в системі координат (57)

$$\Delta K = -121. \quad (63)$$

На основі (62), (63) в системі координат (57) множина відрізків (45), (42) набуває форми

$$\{v_{i_1e} \mid i_1 \in [1,10]\}, \quad (64)$$

де $$v_{i_1e} = \{(i_1,k_1) \mid k_1 \in [1,122]\}. \quad (65)$$

Для точок відрізка v_{i_1e} на основі інформації фрагмента $\overline{I}\, m_{\Delta p}$ (див. рис. 5) перевіримо виконання умови при-

сутності в зоні незмінності поверхні пітінга по напрямку i_1. Скористаємось для цього критеріями (46) і (48). Ключовим елементом для застосування критерію (46) є інформація зображення Im_S (40), яке містить оцінки локальної стабільності глибини пітінга в горизонтальному напрямку, отримані на основі інформації фрагмента $\bar{I}\,m_{\Delta p}$ (59) (див. рис. 5). Зауважимо, що обстеження компонент $\bar{I}m_{\Delta p,\lambda\in\{r,g,b\}} \in \bar{I}\,m_{\Delta p}$ показало, що кольорові компоненти практично пропорційні одна одній, а найбільшу інтенсивність має компонента $\bar{I}m_{\Delta p,r}$.

На основі компоненти $\bar{I}m_{\Delta p,r}$ за алгоритмом (41) з параметрами: відстань $d = 5$, поріг $\varepsilon = 100$ системою обробки інформації було сформовано зображення Im_S (40). Результати роботи програми подано на рис. 6. Для презентації зображення Im_S використано систему координат (57), а одиничні та нульові відліки ς_{ik} (41) – відповідно білі і чорні.

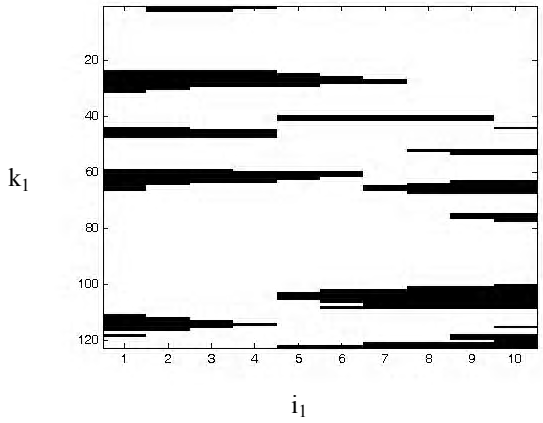


Рис. 6. Зображення Im_S бінарних оцінок стабільності глибини пітінга в горизонтальному напрямку

За критеріями (45), (46) інформація зображення Im_S є основою для перевірки стабільності глибини пітінга в горизонтальному напрямку у відрізків v_{i_1e} (64), (65). На рис. 6 представлено один з відрізків v_{i_1e}:

$$v_8 = \{(8, k_1) \mid k_1 \in [1,122]\} \qquad (66)$$

(див. (65)). Для перевірки стабільності глибини пітінга в горизонтальному напрямку у точок відрізка v_{i_1e} за критерієм $\kappa_{8,k1}$ (46) із зображення Im_S виділено фрагмент

$$Im_{\Delta s} = \{Im_{k1} \mid k_1 \in [1,122]\} \subset Im_S, \qquad (67)$$

де $Im_{k1} = \{\varsigma_{i_1 k_1} \mid i_1 \in [3,8]\}$. В двовимірному масиві $Im_{\Delta s}$ програмою виконується сумування елементів масиву і в результаті отримується сума елементів кожного рядка (див. (47)). На основі цього за операцією селекції (46) визначається одномірний масив бінарних значень $\{\kappa_{8,k1} \mid k_1 \in [1,122]\}$. В цьому одномірному масиві програмою визначена сума його елементів (49). Базуючись на цьому, проведено селекцію (48) і отримано бінарне значення параметра $\beta_8 = 1$, що свідчить про придатність відрізка v_8 для використання в етапі реставрації 3D (17) і в реконструкції (44).

Користуючись відрізком v_8 (66), як масивом координат, з фрагмента $\bar{I}\,m_{\Delta p}$ (див. рис. 5) програмно було виділено одномірний масив початкових даних $\bar{I}_{r,8} = \{\bar{I}_{r,8,k_1} \mid k_1 \in [1,122]\}$, необхідний для визначення параметра ξ (16) в етапі реставрації 3D (17). Інформація масиву початкових даних

$$\bar{I}_{r,8} = \{\bar{I}_{r,8,k_{-1}} \mid k_{-1} \in [1,122]\} \qquad (68)$$

із застосуванням координати

$$\bar{k} = 123 - k_1, \; k_1 \in [1,122], \qquad (69)$$

представлена на рис. 7.

Процедура реставрації похідної $q_{1,2} = q_{1,2}(\xi)$, де $\xi = \xi(\bar{I}_{r,8}, I_a, \tilde{I}_{\lambda O})$, визначена виразом (17), а параметр ξ (16). Оскільки визначення параметра ξ за початковими даними $\bar{I}_{r,8}$ зорієнтовано на червоний колір, то й інші параметри, від яких залежить ξ, фонову засвітку I_a та інтенсивність відбиття $\tilde{I}_{\lambda O}$ (9) теж потрібно визначити на основі червоної компоненти відеосигналу Im_p.

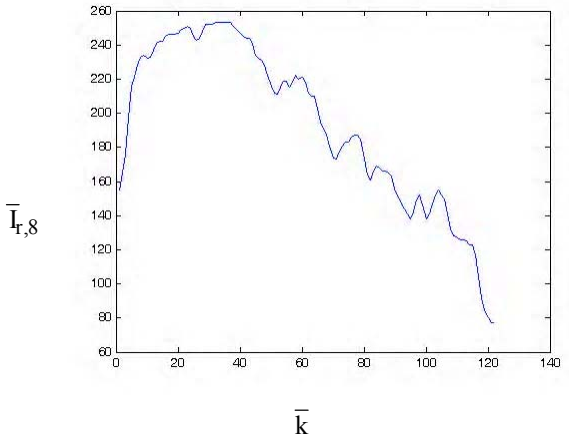


Рис. 7. Масив початкових даних реставрації 3D $\bar{I}_{r,8}$

Для визначення фонової засвітки I_a із зображення пітінга Im_p (51) (див. рис. 3) в зоні тіні виділено фрагмент $Im_{pa} = \{I_{\lambda,ik} \mid i \in [180,225], k \in [50,99]\}$, де $\lambda \in \{r,g,b\}$. На рис. 8 цей затінений фрагмент

$$Im_{pa} = \{I_{\lambda,i_a k_a} \mid i_a \in [1,46], k_a \in [1,50]\}, \qquad (70)$$

де $\lambda \in \{r,g,b\}$ із застосуванням системи координат: $i_a = i - 179$, $k_a = 100 - k$ представлено у вигляді напівтонової проекції Im_{pag}.

Як видно з рис. 8, максимальне затінення спостерігається у масиві фрагмента Im_{pag}:

$$Im_{a\lambda} = \{I_{\lambda,i_a,24} \mid i_a \in [25,45]\}, \qquad (71)$$

де $\lambda \in \{r,g,b\}$. Для визначення фонової засвітки I_a з масиву $Im_{a\lambda}$ (72) сегментовано компоненту червоного кольору Im_{ar}. На основі даних цієї компоненти визначено середнє арифметичне $\bar{I}_{ra} = 30{,}4$. Отримане значення прийняте за оцінку фону

$$\hat{I}_a = 30{,}4 \qquad (72)$$

і буде використане при проведенні розрахунку параметра $\xi = \xi(\bar{I}_{r,8}, \hat{I}_a, \tilde{I}_{\lambda O})$ (16). Зауважимо, що для розрахунку параметра ξ лишилося визначити оцінку інтенсивності відбиття точки площини $\tilde{I}_{\lambda O}$ (7)-(9).

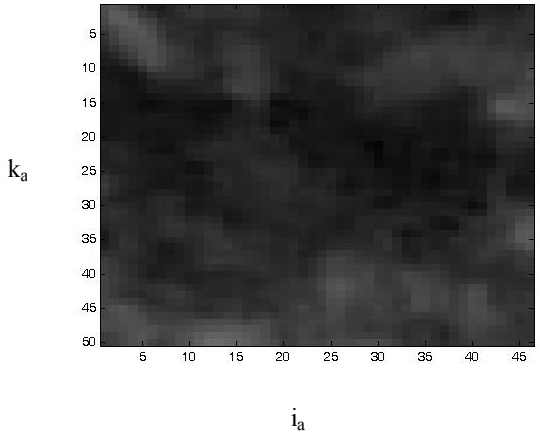


Рис. 8. Затінений фрагмент Im_{pag}, вилучений із зображення пітінга Im_{pg} (рис.3)

Для цього із зображення пітінга Im_p (51) (див. рис. 3) виділено фрагмент $Im_{O\lambda} = \{I_{\lambda,ik} \mid i \in [150,225], k \in [109,130]\}$, де $\lambda \in \{r, g, b\}$. На рис. 9 цей фрагмент

$$Im_{O\lambda} = \{I_{\lambda,i_O k_O} \mid i_O \in [1,76], k_O \in [1,22]\}, \qquad (73)$$

тут $\lambda \in \{r, g, b\}$ із застосуванням системи координат $i_O = i - 149$, $k_O = 131 - k$ представлено у вигляді напівтонової проекції Im_{Og}.

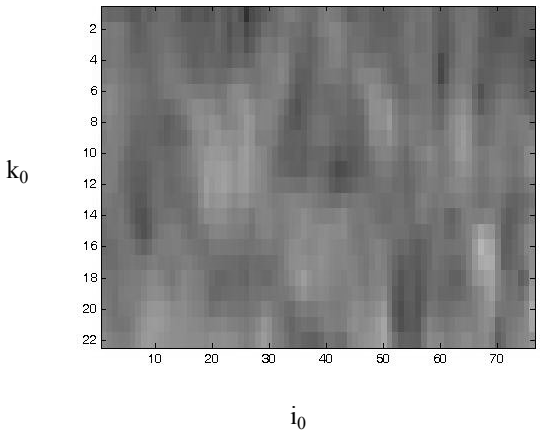


Рис. 9. Фрагмент Im_{Og} з площиною, пошкодженою флуктуаціями

З фрагмента $Im_{O\lambda\in\{r,g,b\}}$ (73) системою обробки інформації сегментовано компоненту червоного кольору Im_{Or}. На основі даних цієї компоненти визначено середнє арифметичне $\bar{I}_O = 141{,}4$. Отримане значення приймається за оцінку інтенсивності відбиття точки площини $\hat{I}_{\lambda O} = 141{,}4$ і спільно з параметрами: оцінкою фону $\hat{I}_a$ (72) і масивом початкових даних реставрації 3D $\bar{I}_{r,8}$ (див. рис. 7) використане при проведенні розрахунку масиву значень параметра $\xi = \xi(\bar{I}_{r,8}, \bar{I}_a, \tilde{I}_{\lambda O})$ (16).

Базуючись на отриманому масиві ξ та оцінці кута φ (50), за виразом (17) системою обробки інформації було розраховано два варіанти вертикальної похідної: масив q_1 та масив q_2.

Наступне дослідження масивів q_1, q_2 в інтеграційній ланці реставрації (44) показало, що кожний масив практично забезпечує реставрацію глибини, але краще кореляція результатів, отриманих системою обробки інформації, з результатами відновлення глибини пітінга спостерігачем досягається із застосуванням масиву q_1. Розглянемо результати реставрації 3D з масивом q_1 детальніше.

Інформація масиву значень вертикальної похідної

$$q_1 = \{q_{\bar{k},1} \mid \bar{k} \in [1,122]\}, \qquad (74)$$

зі застосуванням координати $\bar{k}$ (69) представлена на рис. 10.

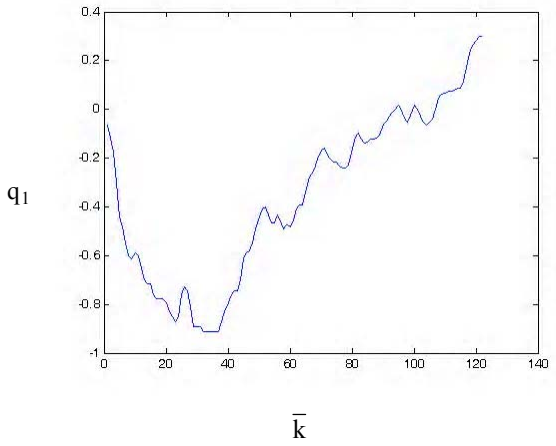


Рис. 10. Масив значень вертикальної похідної q_1

На основі інформації масиву значень вертикальної похідної q_1 (див. рис. 10), кроку Δy (53) та апріорі заданого значення $z_e = 0$ за виразом (44) в системі обробки інформації було реконструйовано масив оцінок глибини пітінга $z = \{z_{\bar{k}} \mid \bar{k} \in [1,122]\}$. З врахуванням кроку Δy (53) результати проведеної реконструкції представлено на рис. 11.

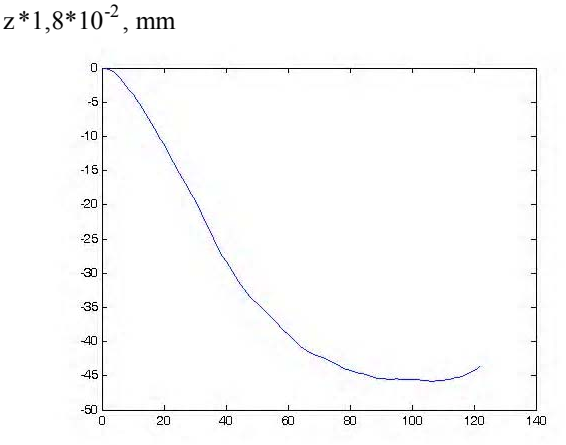


Рис. 11. Реконструкція глибини пітінга z

Базуючись на отриманій оцінці глибини пітінга z (див. рис. 11), визначено шуканий параметр пітінгостійкості максимальну глибину [11] z_m = -0,82 mm .

6. Висновки

Розглянута проблема отримання інформації на поверхні матеріалів за допомогою методів обробки та аналізу металографічних зображень. Зокрема, розглянута задача тривимірної реконструкції поверхні матеріалу пітінга за зображеннями цієї поверхні. Шляхом такої реконструкції в центральній частині пітінга отримано вертикальний переріз пітінга, що дозволяє оцінити такий параметр пітінгостійкості матеріалу, як максимальна глибина. Покроково описано методи та алгоритми розрахунку тривимірної інформації пітінга.

На основі описаних методів та визначення інформації про інтенсивність фонового освітлення, інтенсивність освітлення в центрі пітінга, інтенсивність освітлення точок вертикального перерізу пітінга, з врахуванням стабільності характеристик пітінга в перпендикулярному до площини перерізу напрямку отримано оцінку вертикальної похідної вектора нормалі. Ця інформація дозволяє описати тривимірну будову перерізу пітінга. Оцінка глибини перерізу пітінга знаходиться інтегральним накопиченням вертикальної похідної вектора нормалі пітінга, починаючи від одного з країв.

Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблений алгоритм можна технологічно-програмно реалізувати в рамках стандартної системи обробки інформації, що дозволить отримувати додаткову інформацію про матеріали, які досліджуються, зокрема як в даному випадку, про стан пітінгостійкісті матеріалу на основі визначення, згідно з запропонованою методикою, максимальної глибини пітінга.

Література: 1. *Marcus P.* Corrosion mechanisms in theory and practice 2nd Edition - 2002. New York, Technology & Engineering. 742p. **2.** *Steven J. McDanels*. Failure Analysis Of Launch Pad Tubing From The Kennedy Space Center. Microstructural Science, Vol. 25. 1998. ASM International, Materials Park, OH. P. 125-129. **3.** *Szlarska-Smialowska Z.*. Pitting Corrosion of Metals, NACE, Houston, 1986.TX. P. 120-145. **4.** *Sharland S. M.* A review of the theoretical modeling of crevice and pitting corrosion // Corrosion Science 1987. V. 27. N 3. P. 289-323. **5.** *Таранцева К. Р., Пахомов В. С.* Оценка питтингостойкости нержавеющих сталей в хлоридсодержащих средах химико-фармацевтических производств// Защита металлов. 2004. Т. 40, № 5. С. 1-9. **6.** *Таранцева К. Р., Пахомов В. С., Богатков Л. Г.* Прогнозирование питтинговой коррозии по потенциалу образования солевой пленки//Защита металлов. 1994. Т. 30, № 4. С. 377. **7.** *Андрейко І.М., Волчок І.Л., Осташ О.П., Акімов І.В., Головатюк Ю.В.* Вплив міді на циклічну пітінгостійкість і термотривкість графітизованих сталей // Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2004. № 3. С.109-112. **8.** *Myshkin N.K., Kong H., Gngoriev A.Ya., Yoon E.-S.* The use of color in wear debris analysis // Elsevior Wear. 2001. Vol.251. P.1218-1226. **9.** *Szala J.* Zastosovwanie metod kompputerowej analizy obrazu do ilosciowej oceny stryktury materialow. W. Politechnika Slaska, Zeszyty naukowe, 2000. №1518. 167p. **10.** *Таранцева К. Р., Пахомов В. С.* Оценка влияния движения среды на пассивацию питтингов и их предельные размеры //Защита металлов. 2002. Т. 38. № 1. С. 57-64. **11.** *Арутюнян Р.А.* Вероятностная модель разрушения вследствие питтинговой коррозии // Проблемы прочности. 1989. № 12. С. 106–108. **12.** *Іванюк В.Г., Капшій О.В., Русин Б.П., Ануфрієва Н.П.* Розвиток алгоритму оцінки характеристик тріщин за зображеннями поверхні матеріалів // Радіоелектроніка і інформатика. 2007. №4. С.123-130. **13.** *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. **14.** *Shintaro Watanabe, Koji Miyajima* Detecting Building Changes Using Epipolar Constraint From Aerial Images Taken At Different Positions // ICIP 2001. 2001. P.201-204. **15.** *Порев В.* Комп'ютерна графіка. Київ: Корнійчук, 2000. 256с. **16.** *Foley et al.* Computer Graphics. Addison Wesley. 1997. **17.** *Смирнов В.И.* Курс высшей математики. Т. 1. Москва: Наука, 1967. 480с. **18.** *Русин Б.П., Іванюк В.Г., Капшій О.В.., Корній В.В.* Оцінка характеристик тріщин за зображеннями поверхні матеріалів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2007. №4. С.107-111.

Надійшла до редколегії 19.02.2010

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

Русин Богдан Павлович, д-р техн. наук, проф., зав. відділом "Методів та систем 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: dep32@ipm.lviv.ua

Іванюк Віталій Григорович, інженер відділу "Методів та систем 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.

Похмурський Андрій Юрійович, аспірант Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАНУ. Наукові інтереси: обробка та розпізнавання зображень.. Адреса: Україна, 79601, Львів, вул. Наукова, 5а. тел: 22-96-530. e-mail: dep32@ipm.lviv.ua