

УДК.383.8:621.396.96:621.396.6.

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ СТАНУ ПОВЕРХОНЬ, УРАЖЕНИХ КОРОЗІЙНИМИ ПІТИНГАМИ

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

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Розглянуто задачу про тривимірну реконструкцію поверхні за двовимірними зображеннями, щоб застосувати результати її розв'язку для аналізу зображень матеріалів з пітингами. Запропоновано метод визначення глибини пітинга за оцінками серії металографічних зображень з допомогою ламбертівської моделі відбиття світла. Параметри моделі визначено за зміною положення джерела світла з використанням додаткового затінення та незмінного приймача. Серія аналізованих зображень містить триаду зображень, отриманих у різних напрямках освітлення, а також затінене зображення пітинга. Описано двокроковий алгоритм оцінки характеристик пітинга на поверхні матеріалу за його зображеннями. Зокрема, показано, що, застосовуючи запропоновані методи, можна отримати інформацію про пітинги. Наведено приклад практичного застосування розробленого алгоритму для 3D реконструкції поверхні реального пітинга.

Ключові слова: *3D реконструкція, стереозображення, триада зображень, кут освітлення.*

Один із методів неруйнівного контролю пітинготривкості елементів трубопроводів [1–6] ґрунтується на дослідженні металографічних зображень, що відтворюють стан поверхні елементів на окремих їх ділянках [7–11]. Як правило, в результаті обстеження трубопроводу одержуємо великі масиви зображень з дефектами. Візуально їх обробляти достатньо складно і здебільш дістаємо інформацію про характеристики пітингів лише у площині зображення. Сучасними методами тривимірної реконструкції зображень можна значно підвищити ефективність роботи операторів із зображеннями та отримати більше інформації про об'єкти. Зокрема, про тривимірну їх структуру, а також оцінити глибину пітинга за його двовимірними зображеннями.

Система отримання і обробки інформації зображень матеріалів з аналізом тривимірної структури поверхні повинна містити джерело світла (систему керування його положенням) та оптичну систему (наприклад, відеокамери високої роздільної здатності). Зразок освітлюють джерелом некогерентного світла. Відбите від його поверхні світло сприймається відеокамерою і передається для аналізу в комп'ютер. Під час відновлення тривимірної структури поверхні об'єктів розглядають дифузне і дзеркальне відбиття світла [12–14]. Оскільки об'єкти з дифузним відбиттям мають однакову світлову інтенсивність у всіх напрямках спостереження, простіші для аналізу та відновлення 3D інформації зображень, то розглянемо саме їх. Аналізуватимемо тільки ділянки, вкриті продуктами корозії.

Серед інформаційних технологій тривимірної реконструкції (до яких входять 3D реконструкція за стереозображенням [10] та моделлю відбиття [9, 15]) перспективним видається відновлення форми пітинга за триадою зображень [15].

Мета цього дослідження – розробити методи та алгоритми неруйнівного контролю стану поверхні, ураженої корозійними пітингами. Зокрема, тривимірно

реконструювати пітинг та оцінити його глибину за результатами аналізу тріади цифрових зображень його поверхні.

Ілюмінаційна модель зображення. Для дифузної моделі (розглядають монохроматичне зображення) інтенсивність відбиття точки поверхні, освітленої одним джерелом світла, визначає рівняння [12, 13]

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

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

Відомо [16], що направлені косинуси нормалі N до поверхні $F(x, y, z) = 0$ у точці $M(x, y, z)$ пропорційні частковим похідним $F'_x(x, y, z)$, $F'_y(x, y, z)$, $F'_z(x, y, z)$, тобто

$$\begin{aligned} \cos(N, X) &= \frac{F'_x(x, y, z)}{\pm \sqrt{F_x'^2(x, y, z) + F_y'^2(x, y, z) + F_z'^2(x, y, z)}}, \\ \cos(N, Y) &= \frac{F'_y(x, y, z)}{\pm \sqrt{F_x'^2(x, y, z) + F_y'^2(x, y, z) + F_z'^2(x, y, z)}}, \\ \cos(N, Z) &= \frac{F'_z(x, y, z)}{\pm \sqrt{F_x'^2(x, y, z) + F_y'^2(x, y, z) + F_z'^2(x, y, z)}}. \end{aligned}$$

де X, Y, Z – біжучі координати. Вважаємо, що наступну реконструкцію виконують, коли поверхня задана в явній формі $z = f(x, y)$. Тоді $F(x, y, z) = f(x, y) - z = 0$. Направлені косинуси нормалі N до такої поверхні в точці $M(x, y, z)$ пропорційні частковим похідним $p, q, -1$, тобто [17]

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

де $N_x = \cos(N, X)$; $N_y = \cos(N, Y)$; $N_z = \cos(N, Z)$; $p = \frac{\partial z}{\partial x}$, $q = \frac{\partial z}{\partial y}$ – нахил поверхні в околі точки $M(x, y, z)$.

Оскільки інтенсивність джерела освітлення $I_{p\lambda}$ є стала величина, то рівняння (1) є функцією чотирьох невідомих p, q, k_d та I_a . Розглянемо ілюмінаційну модель зображення з контрольованим кутом освітлення та визначимо невідомі параметри з тріади зображень. Щоб позбутися залежності від параметра I_a , експериментально визначимо його, тимчасово штучно затінюючи зразок з пітингом. Затінюємо прямокутником, просторове положення якого над зразком, а отже, і тіні визначає система обробки. Використовуючи базове зображення I_{λ} зі штучним затіненням, визначаємо інтенсивність фону I_a і зводимо модель (1) до трьох невідомих.

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

$$\begin{aligned} I_{\lambda 0} &= I_a + I_{p\lambda} k_d (L_{x0} N_x + L_{y0} N_y + L_{z0} N_z), \\ I_{\lambda 1} &= I_a + I_{p\lambda} k_d (L_{x1} N_x + L_{y1} N_y + L_{z1} N_z), \\ I_{\lambda 2} &= I_a + I_{p\lambda} k_d (L_{x2} N_x + L_{y2} N_y + L_{z2} N_z), \end{aligned} \quad (2)$$

де невідомі компоненти вектора нормалі N . Кожна компонента вектора нормалі N

залежить від похідних p, q , а отже, і система (2). Щоб позбутися залежності моделі (2) від параметра k_d , виконаємо математичні перетворення:

$$\frac{I_{\lambda 0} - I_a}{I_{\lambda 1} - I_a} = \frac{-pL_{x0} - qL_{y0} + L_{z0}}{-pL_{x1} - qL_{y1} + L_{z1}}, \quad \frac{I_{\lambda 0} - I_a}{I_{\lambda 2} - I_a} = \frac{-pL_{x0} - qL_{y0} + L_{z0}}{-pL_{x2} - qL_{y2} + L_{z2}}.$$

Отриману систему двох рівнянь з невідомими параметрами p, q шляхом алгебричних перетворень трансформуємо у таку:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де

$$\begin{aligned} A_{11} &= (I_{\lambda 1} - I_a)L_{x0} - (I_{\lambda 0} - I_a)L_{x1}, & A_{12} &= (I_{\lambda 1} - I_a)L_{y0} - (I_{\lambda 0} - I_a)L_{y1}, \\ A_{21} &= (I_{\lambda 2} - I_a)L_{x0} - (I_{\lambda 0} - I_a)L_{x2}, & A_{22} &= (I_{\lambda 2} - I_a)L_{y0} - (I_{\lambda 0} - I_a)L_{y2}, \\ B_1 &= (I_{\lambda 1} - I_a)L_{z0} - (I_{\lambda 0} - I_a)L_{z1}, & B_2 &= (I_{\lambda 2} - I_a)L_{z0} - (I_{\lambda 0} - I_a)L_{z2}. \end{aligned}$$

За одержаними виразами можна реконструювати похідні p, q , що програмно реалізують засобами МАТЛІАБ [18]. Але перед тим доцільно спростити вираз (3). Приймаємо, що елемент матриці $A_{21} = 0$, а отже, дорівнюватимуть нулю і параметри L_{x0} та L_{x2} . Крім того, умова $A_{12} = 0$ виконується, якщо $L_{y0} = L_{y1} = 0$. Тому застосуємо у системі джерело світла з такими параметрами, що

$$L_0 = (0, 0, 1), \quad L_1 = (\cos\theta, 0, \sin\theta), \quad L_2 = (0, \cos\phi, \sin\phi).$$

Тепер вираз (3) набуде вигляду

$$\begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

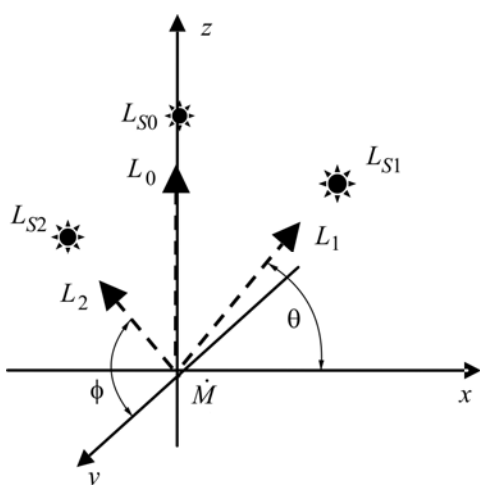


Рис. 1. Геометрична інтерпретація локалізації джерела світла (L_{S0}, L_{S1}, L_{S2}) в тривимірному просторі відносно точки M поверхні пітинга.

Fig. 1. Geometrical interpretation of the light sources (L_{S0}, L_{S1}, L_{S2}) in three-dimensional space of point M of the pittings surface.

Виявили (рис. 1), що джерела світла L_{S0}, L_{S1}, L_{S2} розташовані в двох ортогональних площинах та осі Z . Вважаємо, що вони однакові: $L_{S0} = L_{S1} = L_{S2}$. Тоді коефіцієнти у виразі (4) набувають вигляду

$$\begin{aligned} A_{11} &= (I_a - I_{\lambda 0}) \cos\theta, \\ A_{22} &= (I_a - I_{\lambda 0}) \cos\phi, \\ B_1 &= (I_{\lambda 1} - I_a) - (I_{\lambda 0} - I_a) \sin\theta, \\ B_2 &= (I_{\lambda 2} - I_a) - (I_{\lambda 0} - I_a) \sin\phi. \end{aligned} \quad (5)$$

Якщо підставити вирази (5) у співвідношення (4), то отримаємо реконструкцію похідних p, q :

$$\begin{aligned} p &= \operatorname{tg}\theta - \frac{I_{\lambda 1} - I_a}{(I_{\lambda 0} - I_a) \cos\theta}, \\ q &= \operatorname{tg}\phi - \frac{I_{\lambda 2} - I_a}{(I_{\lambda 0} - I_a) \cos\phi}. \end{aligned} \quad (6)$$

Загалом, якщо досліджуваний пітинг ізотропний у тривимірному просторі, то доцільно покласти, що кут $\theta = \phi$.

Розглянемо особливості алгоритму реконструкції похідних p, q залежно від кута освітлення θ детальніше. Для підвищення точності доцільно виконувати реконструкцію з мінімально можливим зна-

ченням кута θ , але тоді виникає загроза затінення зображень $I_{\lambda_1}, I_{\lambda_2}$. Розглянемо заходи для її усунення. Сформулюємо умову відсутності затінення:

$$|p| < |\operatorname{tg}\theta|,$$

з урахуванням якої отримаємо:

$$\left| \operatorname{tg}\theta - \frac{I_{\lambda_1} - I_a}{(I_{\lambda_0} - I_a) \cos\theta} \right| < |\operatorname{tg}\theta|.$$

Шляхом алгебричних перетворень трансформуємо цю умову у таку:

$$s = \frac{I_{\lambda_1} - I_a}{I_{\lambda_0} - I_a} < 2 \sin \theta. \quad (7)$$

Аналогічно визначимо умову

$$t = \frac{I_{\lambda_2} - I_a}{I_{\lambda_0} - I_a} < 2 \sin \theta. \quad (8)$$

Таким чином, щоб позбутися загрози затінення частин зображень $I_{\lambda_1}, I_{\lambda_2}$, необхідно виконувати їх відеозйомку з таким кутом освітлення, який забезпечує виконання умов (7) і (8).

Для підвищення точності реконструкції пропонуємо такий двокроковий алгоритм. Нехай відеозйомкою отримано базове зображення пітинга I_{λ_0} та інтенсивність фону. Встановлюємо максимальний кут освітлення $\theta_{\max+}$, під яким отримуємо зображення $I_{\lambda_1+}, I_{\lambda_2+}$. Нехай у кожній його точці за виразами (7) і (8) визначені параметри s, t , у масивах яких знайдемо максимальний елемент. Припустимо, що це $s_{ik,\max} = s(i\Delta x, k\Delta y)$. У системі обробки за формулою (6) визначимо похідну $p_{ik,\max}$ і за її значенням оцінимо кут $\theta_1 = \operatorname{arctg} p_{ik,\max}$. Кут освітлення $\theta_{\max} = \theta_1 + \Delta\theta$, де $\Delta\theta$ – оцінка похибки визначення кута θ_1 . Далі повторно знімаємо зображення $I_{\lambda_1}, I_{\lambda_2}$. За виразом (6) обчислюємо скореговане значення похідних p, q , тобто маємо точнішу оцінку глибини пітинга.

Визначення глибини пітинга. Глибину пітинга z_{ik} знаходимо інтегральним накопиченням (дискретною апроксимацією інтегрального накопичення) похідних p, q векторів нормалі, починаючи від опорної точки, яку вибираємо на площині за межами пітинга. Глибину у цій точці вважаємо відомою:

$$z_{ik} = z_{11} + \Delta y \sum_{m=1}^{k-1} q_{1m} + \Delta x \sum_{n=1}^{i-1} p_{nk}, \quad (9)$$

де $i = \overline{1, I}$; $k = \overline{1, K}$; $\Delta x, \Delta y$ – крок дискретизації. Опорну точку вибрали так, що $z_{11} = 0$.

Алгоритм відеозйомки (рис. 1) та тривимірної реконструкції складається з таких операцій: вимкнено джерело світла L_{S1}, L_{S2} ; увімкнено джерело світла L_{S0} ; відеозйомка зображення $I_{\lambda_0} = I_{\lambda_0}(L_{S0})$ фіксованою камерою П; сформовано штучне затінення зразка з пітингом; відеозйомка затіненого зображення $I_{\lambda_0} = I_a$ камерою П; знято затінення; вимкнено джерело світла L_{S0}, L_{S2} ; увімкнено джерело світла L_{S1} ; відеозйомка зображення $I_{\lambda_1} = I_{\lambda_1}(L_{S1})$ камерою П; вимкнено джерело світла L_{S0}, L_{S1} ; увімкнено джерело світла L_{S2} ; відеозйомка зображення $I_{\lambda_2} = I_{\lambda_2}(L_{S2})$ камерою П; двокроковим алгоритмом обчислено похідні p, q згідно з виразами (6)–(8); оцінено глибину пітинга z_{ik} за виразом (9).

Практичне застосування алгоритму. Для апробації алгоритму реконструкції 3D пітинга використовували відеоінформацію, отриману з електрозварної труби газонафтопродуктогонів (сталь 17ГС). Для відеозйомки пітинга, дислоковано на трубі, застосовували кольорову відеокамеру 10mp CANON EOS 40D Body. Під час першого знімання тріади зображень забезпечували напрямок освітлення

джерелом світла з координатами $L_0 = (0,0,1)$, $L_{1+} = (0,17; 0; 0,98)$, $L_{2+} = (0; 0,17; 0,98)$, що відповідає куту $\theta = \phi = 80^\circ$. Отримали тріаду зображень $I_{\lambda 0}(L_0)$, $I_{\lambda 1+}(L_{1+})$, $I_{\lambda 2+}(L_{2+})$, де $\{I_{\lambda m} \mid \lambda \in \{r, g, b\}; m \in \{0, 1+, 2+\}\}$. Виявили, що компоненти $\{I_{\lambda m} \mid \lambda \in \{r, g, b\}\}$ практично пропорційні, а найбільшу інтенсивність має червона компонента I_{rm} . На основі отриманої інформації за виразами (7) і (8) розрахували масиви параметрів s, t , в яких знайдемо максимальний елемент $s_{ik, \max}$. У точці (i, k) обчислили значення похідної $p_{ik, \max}$ і визначили кут $\theta_1 = 65^\circ$, за яким уточнили значення кута освітлення $\theta_{\max} = 70^\circ$, необхідного для повторної відеозйомки зображень $I_{\lambda 1}$, $I_{\lambda 2}$. Таким чином, під час повторної відеозйомки забезпечували напрямок освітлення джерелом світла з такими координатами: $L_1 = (0,34; 0; 0,94)$, $L_2 = (0; 0,34; 0,94)$. Отримали тріаду зображень $I_{\lambda m}(L_m)$, де $\{I_{\lambda m} \mid \lambda \in \{r, g, b\}\}$, $m = 0, 1, 2$, а також напівтонову проекцію I_{gm} кольорових зображень пітинга (рис. 2а, с). На одному з них (рис. 2с) розташована метрична смуга з міліметровими рисками. Зіставляючи розміри об'єктів у міліметрах і пікселях, можна оцінити один з параметрів реконструкції, зокрема крок $\Delta x = \Delta y = 1,8 \cdot 10^{-2}$ mm/pixel.

Для визначення інтенсивності фону I_a використовували інформацію з базового зображення $I_{\lambda 0}$ зі штучним затіненням пітинга прямокутником (рис. 2d).

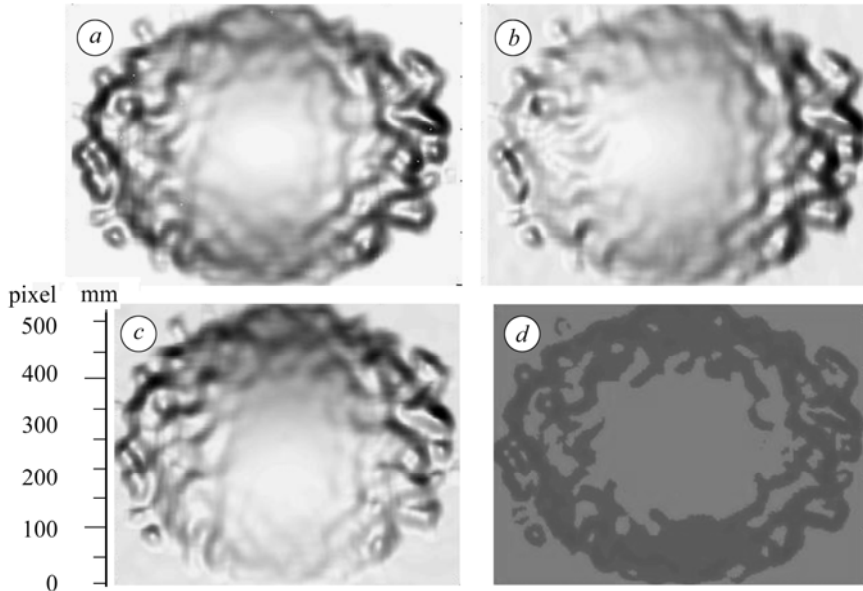


Рис. 2. Тріада зображень пітинга під різними кутами освітлення (а–с) та інтенсивність фону (d).

Fig. 2. Triad of pitting images under different angles of illumination (a–c) and background intensity (d).

За компонентами I_{rm} , $m = 0, 1, 2$, а також червоною компонентою інтенсивності фону I_{ra} , використовуючи алгоритм системи обробки інформації, реконструювали оцінки похідних:

$$p_{ik} = 2,74 - \frac{I_{r1,ik} - I_{ra,ik}}{0,34 (I_{r0,ik} - I_{ra,ik})}, \quad q_{ik} = 2,74 - \frac{I_{r2,ik} - I_{ra,ik}}{0,34 (I_{r0,ik} - I_{ra,ik})}, \quad (10)$$

де $i = \overline{1, 732}$; $k = \overline{1, 532}$.

За реконструйованими масивами значень похідних p, q (10), кроком Δx та апріорі заданим значенням $z_{11} = 0$ за виразами (9) знайдено глибину пітингового пошкодження (рис. 3).

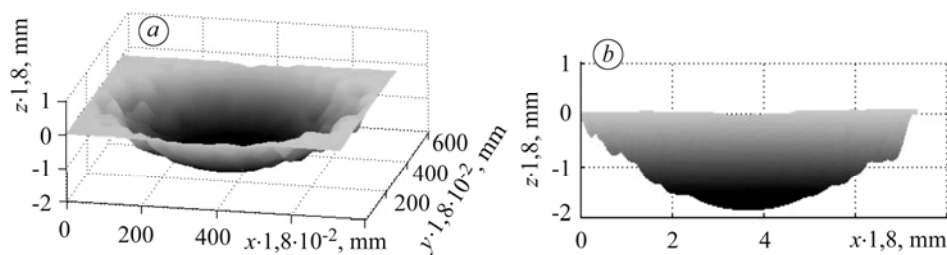


Рис. 3. Реконструйований пітинг:
 a – перспектива огляду зверху; b – проекція в площині [XZ].

Fig. 3. Reconstructed pitting: a – view perspectiva from above; b – projection in [XZ] plane.

ВИСНОВКИ

Вперше для тривимірної реконструкції пітинга запропоновано використовувати триаду зображень, отриманих за різних кутів освітлення поверхні, з затіненим зображенням пітинга. За інформацією про відбиття, зокрема за дифузною моделлю, яка оперує функціональною залежністю від кута освітлення джерела світла (інші параметри моделі відбиття фіксовані), та експериментальними результатами про інтенсивність фонового освітлення тривимірну поверхню матеріалу описали системою рівнянь реконструкції, яку побудували на основі інформації про триаду зображень та затінене зображення пітинга. Вперше розв'язано систему рівнянь про реконструкцію (оцінка похідних векторів нормалі) для триади зображень з різними кутами освітлення. Подано розв'язок такої системи для діагональної матриці системи реконструкції і доведено правомірність такої інформації. Базове зображення отримано з вертикальним розташуванням джерела світла. Інші інтенсивності відбиття (два додаткові зображення) знайдено з кутами, які локалізовані в одній з двох вертикальних ортогональних площин тривимірного простору. Тут оцінено похідні векторів нормалі. Для визначення останніх двох інтенсивностей відбиття, які є функціями кута освітлення, запропоновано двокроковий алгоритм обчислення кута освітлення. В системі обробки спочатку встановлюють максимальний кут освітлення, коли нема затінення додаткових зображень. Отримано триаду зображень та затінене зображення. Оцінено максимальні значення векторів нормалі (верхня межа експлуатаційного діапазону 3D реконструкції значень косинусів кутів нахилу поверхні пітингового пошкодження), за якими розраховано кут освітлення повторної відеозйомки додаткових зображень. Так вдалось зменшити неконтрольований вплив похибки реконструкції, викликаной кутом освітлення на першому кроці алгоритму. Глибину пітинга знайдено за інтегральним накопиченням кутів нахилу поверхні пітинга, починаючи від однієї з точок поверхні, яку приймають за опорну. Наведено приклад практичного застосування розробленого алгоритму 3D реконструкції поверхні реального пітинга трубопроводу.

РЕЗЮМЕ. Рассмотрена задача о трехмерной реконструкции поверхности по двухмерным изображениям с целью применения ее результатов для анализа изображений материалов с пittingами с помощью ламбертовской модели отражения света. Параметры модели найдены по изменению положения источника света с использованием дополнительного затенения при неизменном положении приемника. Серия анализируемых изображений содержит затененное изображение пittingа и триаду его изображений, где каждое получено при индивидуальном направлении освещения. Описаны отдельные этапы двухшагового алгоритма анализа характеристик пittingа на поверхности материала по его изображениям. В частности, показано, что так можно получить информацию о горизонтальной и вертикальной производных, а также глубине пittingа в каждой исследуемой точке. Приведен пример практического использования разработанного алгоритма для 3D реконструкции поверхности реального пittingа.

SUMMARY. The problem of three dimensional surface reconstruction based on two dimensional images is considered using Lambertian reflection model for pitting depth estimation. Parameters of the model are estimated by determining the movement of the light source location with additional shading, the receiver location being not changed. Parameters of the model are estimated by using the information of image sequence. This image sequence contains triad of light modulated images of materials with pitting corrosion where each image is obtained under individual directed illumination. Certain steps of the proposed two step algorithm of pitting characteristics analysis on the material surface by its images are described. Especially it is shown that in such a way the information about horizontal and vertical derivatives in the investigated point can be obtained. The practical example of the developed algorithm for 3D reconstruction of the real pitting surface is presented.

1. Рибаків А. О., Семенов С. Є., Гончаренко Л. В. Оцінка стану деформаційного старіння металу газопроводів при використанні сталі контрольованої прокатки // Звітна сесія цільової комплексної програми “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин” (“РЕСУРС”), 6–8 січня 2006 р. / Під заг. ред. Б. Є. Патона. – К.: Національна академія наук України, Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона, 2006. – С. 324–327.
2. Красовський А. Я., Ориняк І. В., Лохман І. В. Оцінка залишкового ресурсу трубопроводу, ушкодженого стрес-корозією // Трубопровідний транспорт. – 2011. – № 2 (68). – С. 18–21.
3. Marcus P. Corrosion mechanisms in theory and practice. – New York, 2002 – 742 p.
4. Sharland S. M. A review of the theoretical modeling of crevice and pitting corrosion // Corr. Sci. – 1987. – 27, № 3. – P. 289–323.
5. Таранцева К. Р., Пахомов В. С. Оценка влияния движения среды на пассивацию питтингов и их предельные размеры // Защита металлов. – 2002. – 38, № 1. – С. 57–64.
6. Арутюнян Р. А. Вероятностная модель разрушения вследствие питтинговой коррозии // Проблемы прочности. – 1989. – № 12. – С. 106–108.
7. The use of color in wear debris analysis / N. K. Myshkin, H. Kong, A. Ya. Gngoriev, and E. S. Yoon // Elsevier Wear. – 2001. – 251. – P. 1218–1226.
8. Метод оцінки глибини корозійного пітинга / А. Ю. Похмурський, Б. П. Русин, В. Г. Іванюк, О. В. Капшій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – Спец. вип. № 8. – С. 617–623.
9. Оцінка глибини пітинга за зображеннями поверхні матеріалу / Б. П. Русин, В. Г. Іванюк, О. В. Капшій та ін. // Радіоелектроніка і інформатика. – 2010. – № 1. – С. 83–91.
10. Синівський А. Т., Русин Б. П. Реалізація методу реконструкції мікроструктури поверхні за її стереозображенням з оптичних камер // Там же. – 2005. – № 2. – С. 112–118.
11. Реконструкція та кількісний аналіз металевих поверхонь з пітингами на основі удосконаленого методу погодження стереозображень / Б. П. Русин, Ю. В. Лисак, А. Ю. Похмурський, Я. Ю. Варецький // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – 47, № 2. – С. 126–133.
(Rusyn B. P., Varets'kyi Ya. Yu., Lysak Yu. V., and Pokhmurs'kyi A. Yu. Reconstruction and quantitative analysis of metallic surfaces with pits based on improved stereo image matching method // Material Science. – 2011. – 47, № 2. – P. 255–263.)
12. Digitally-Generated Lighting For Video Conferencing Applications / A. Basso, H. P. Graf, D. Gibbon et al. // ICIP. – 2001. – P. 1085–1088.
13. Shintaro Watanabe, Koji Miyajima Detecting Building Changes Using Epipolar Constraint From Aerial Images Taken At Different Positions // Ibid. – P. 201–204.
14. Computer graphics: principles and practice / James D. Foley et al. – 1997. – 1200 p.
15. Оцінка глибини тріщини за триадою зображень / Б. П. Русин, В. Г. Іванюк, О. В. Капшій, Н. П. Ануфрієва // Радіоелектроніка і інформатика. – 2010. – № 2. – С. 70–78.
16. Смирнов В. И. Курс высшей математики. – М.: Наука, 1967. – Т. 1. – 480 с.
17. Смирнов В. И. Курс высшей математики. – М.: Наука, 1967. – Т. 2. – 656 с.
18. Потемкин В. Г. Система МАТЛАБЖ: Справ. пос. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1998. – 350 с.

Одержано 16.04.2013