



ОЦІНКА ГЛИБИНИ ДЕФЕКТУ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ЗА 2D ЗОБРАЖЕННЯМ ПОВЕРХНІ МАТЕРІАЛУ

*РУСИН Б.П., АНУФРІЄВА Н.П., ІВАНЮК В.Г.,
КАПШІЙ О.В., КОРНІЙ В.В., ЮРКЕВИЧ Р. М.*

Розглядається задача тривимірної реконструкції поверхні за двовимірним зображенням дефекту зварного з'єднання. Пропонується алгоритм реконструкції внутрішньої поверхні дефекту зварного з'єднання. Результати роботи алгоритму, програмно реалізованого в системі обробки інформації зображень, демонструються на прикладі тривимірної реконструкції поверхні дефекту макроструктури зварного з'єднання.

1. Вступ

Оцінювання фактичних розмірів дефектів зварних з'єднань на поверхні металу є актуальною науково-технічною проблемою, оскільки такі пошкодження зменшують міцність і експлуатаційну надійність зварних з'єднань і можуть привести до руйнування всієї конструкції [1-6].

За останні роки область контролю якості стану зварних з'єднань значно збільшилась, бо цьому сприяло виникнення нових пристроїв і методів у системах руйнівного контролю і комплексах неруйнівного контролю [7-9]. Одним з методів контролю якості стану зварних з'єднань [3, 4, 10] є дослідження металографічних зображень, на яких зафіксований стан поверхні зварних з'єднань на їх окремих ділянках [11, 12]. Ручна обробка великої кількості зображень є достатньо трудомісткою і дає можливість, у більшості випадків, отримати інформацію про такі характеристики якості стану зварних з'єднань, як граничні розміри дефекту зварного з'єднання [7, 10] 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 такі об'єкти досліджуваної сцени, як дефекти зварних з'єднань. В цьому випадку є потенційна можливість отримати інформацію про тривимірну структуру дефектів на зображеннях, базуючись на інформації двовимірних зображень [13].

Так, в даній статті розглядається одна з проблем контролю якості стану зварних з'єднань, оцінка гли-

бини дефекту зварного з'єднання за його двовимірними зображеннями.

Однією з поширених груп дефектів зварних з'єднань, які можна зафіксувати на двовимірних зображеннях, є дефекти макроструктури [3, 4, 10]. Дефекти цієї групи виявляються при збільшенні не більш ніж в 10 разів і є простіші для відеоспостереження, аналізу та відновлення 3D інформації зображень, тому на даному етапі ми зупинилися лише на них. В цьому випадку система отримання і обробки інформації зображень матеріалів з аналізом тривимірної структури поверхні повинна містити джерело світла і відеокамеру. Досліджуваний зразок з дефектом зварного з'єднання 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 [14-17].

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 дефекту зварного з'єднання, як об'єкта з дифузним відбиттям. Для цього вплив дзеркальної компоненти на формування зображення дефекту зварного з'єднання потрібно максимально зменшити. Ефект зменшення впливу дзеркальної компоненти забезпечимо використанням спеціальних умов відеозйомки: розташуємо відеокамеру так, щоб напрямок відеоспостереження і напрямок відбиття точок поверхні дефекту зварного з'єднання були максимально ортогональні [14-17].

Метою даного дослідження є розробка методів та алгоритмів оцінювання глибини дефекту зварного з'єднання в матеріалі за допомогою аналізу 2D 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 [14-17]

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

де I_a – інтенсивність розсіяного світла; $I_{p\lambda}$ – інтенсивність джерела світла; k_d – дифузний коефіцієнт, який відображає рівень дифузного відбивання досліджуваної точки на 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 (рис. 1); $p = \frac{\partial z}{\partial x}$, $q = \frac{\partial z}{\partial y}$ – визначають нахил поверхні в околі точки [18]; $L = (L_x, L_y, L_z)$ – 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 фон 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 дефекту зварного з'єднання незмінний.

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

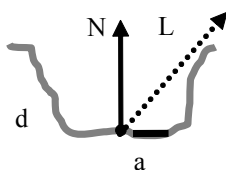


Рис. 1. Вектори дифузної моделі відбиття і сегмент зони затінення (чорний колір) поверхні дефекту зварного з'єднання d : L – вектор напрямку до джерела світла; N – вектор нормалі до поверхні.

Наступним кроком реставрації є визначення дифузного коефіцієнта.

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

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

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

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

Для визначення дифузного коефіцієнта використаємо точку дефекту O (див. рис. 2), в якій має місце

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

і функція $z(x_O, y_O)$ досягає максимуму. В цьому випадку вираз (4) можна представити у такій формі:

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

де $I_{\lambda O} = I_\lambda(x_O, y_O)$.

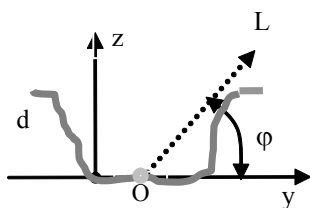


Рис. 2. Дислокація точки максимуму O в дефекті зварного з'єднання d і кутова орієнтація вектора напрямку до джерела світла L

2.1. Реконструкція модуля горизонтальної похідної

Наступним третім кроком реставрації є визначення похідних вектора нормалі. Реконструкцію похідних вектора нормалі проведемо для випадку, коли діє спрощуюче припущення: глибина дефекту зварного з'єднання $z(x, y)$ є незмінною на вертикальному відрізку $[y_O, y_O + d]$, що формально можна представити як

$$q = q(x, y) = 0, \quad (7)$$

де $y \in [y_O, y_O + d]$. З врахуванням (7) і (6) вираз (4) спрощується до рівняння

$$p = \sqrt{\frac{(I_{\lambda O} - I_a)^2}{(I_\lambda - I_a)^2} - 1}. \quad (8)$$

Як видно з (8), параметр p представляє собою модуль горизонтальної похідної, тому у виразі (8) замість позначення p доцільно застосовувати позначення $|p|$. Нехай для наступної реконструкції модуля горизонтальної похідної $|p|$ (8) обрано фрагмент зображення

$$I_{m_{\Delta d}} = \{I_\lambda(x, y) \mid (x, y) \in \Delta d\}, \quad (9)$$

де

$$\Delta d = \{(x, y) \mid x \in [x_e, x_e + \Delta_x], y \in [y_1, y_1 + \Delta_y]\}. \quad (10)$$

Тут Δ_x (Δ_y) – довжина сегмента в апертурі зображення по напрямку x (y).

2.2. Низькочастотна фільтрація по вертикальному напрямку

Ще раз зауважимо, що реставрація модуля похідної $|p| = |p(x, y)|$ в точці (x, y) спирається на припущення незмінності поверхні дефекту зварного з'єднання по напрямку y (7). Але реально в околі кожної точки поверхні дефекту зварного з'єднання цілком можливі вертикальні флуктуації глибини. При зварюванні флуктуації глибини виникають внаслідок коливання напруги в мережі, проковзування дроту в роликах, що подають, нерівномірної швидкості зварювання через люфти в механізмі пересування, неправильного кута нахилу електрода, протікання рідкого металу в зазор. При ручному та напівавтоматичному зварюваннях флуктуації глибини можуть бути викликані поганою якістю електродів та інших зварювальних матеріалів [1-4]. Внаслідок вертикальних флуктуацій глибини ланцюгово виникають вертикальні флуктуації інтенсивності $I_\lambda = I_\lambda(q(x, y))$. Оскільки $|p| = f(I_\lambda)$, тому ще до початку проведення процедури реставрації модуля горизонтальної похідної $|p|$ (8) у фрагменті зображення $I_{m_{\Delta d}}$ (9) доцільно провести визначення інтенсивності $I_\lambda = I_\lambda(x, y)$ з використанням засобів придушення вертикальних флуктуацій глибини. Є різні засоби придушення флуктуацій параметра зображення

по певному напрямку. В нашому випадку для досягнення ефекту зменшення шкідливого впливу вертикальних флуктуацій глибини дефекту зварного з'єднання у фрагменті зображення $Im_{\Delta d}$ (9) на реконструкцію (8) використаємо низькочастотну фільтрацію по напрямку u , базуючись на згортці [13].

По структурі операція низькочастотної фільтрації у фрагменті $Im_{\Delta d}$ складається з двох таких задач:

1. Визначення множини точок $\omega = \{(x, y) \mid$ в точці (x, y) порушено повільнозмінність $I_\lambda(x, y)$, по напрямку $u\}$.

2. Збільшення повільнозмінності в точках $(x, y) \in \omega$ низькочастотною фільтрацією по напрямку u .

Розглянемо першу задачу (п. 1).

Нехай сегмент Δd (10) представлено сукупністю відрізків

$$\Delta d = \{v(y) \mid y \in [y_1, y_1 + \Delta_y]\}, \quad (11)$$

де

$$v(y) = \{(x, y) \mid x \in [x_e, x_e + \Delta_x]\} \quad (12)$$

– відрізок. Нехай з сукупності відрізків (11) вибраний відрізок $v(y)$ (12). Для проведення оцінки виконання умови присутності в зоні незмінності поверхні дефекту по напрямку u для кожної точки (x, y) відрізка $v(y)$ можна застосувати критерій [13]

$$k(x, y) = \begin{cases} 1, & g(x, y) > 0 \\ 0, & g(x, y) = 0, \end{cases} \quad x \in [x_e, x_e + \Delta_x], \quad (13)$$

де

$$g(x, y) = \int_{y-d}^y \zeta(x, y_2) dy_2. \quad (14)$$

Тут, з використанням підставлення $y_2 = y$, представлено

$$\zeta(x, y) = \begin{cases} 1, & [I_\lambda(x, y_a) - I_\lambda(x, y_b)]^2 < \varepsilon; \\ 0, & [I_\lambda(x, y_a) - I_\lambda(x, y_b)]^2 \geq \varepsilon; \end{cases} \quad (15)$$

$$\forall y_a, \forall y_b \in [y, y + d],$$

де ε – заданий поріг; d – відстань, яка теж задається апіорі.

З виразу (13) видно, що параметр $k(x, y)$ має логічні властивості, тому можна скористатись параметром $k(x, y)$ при спільному аналізі повільнозмінності $I_\lambda(x, y)$ для точок $\{(x, y) \mid y \in [y_1, y_1 + \Delta_y]\}$ у такому вигляді:

$$c(x) = \bigcap_{y=y_1}^{y_1+\Delta_y} k(x, y), \quad x \in [x_e, x_e + \Delta_x] \quad (16)$$

і на основі цього визначити зони порушень повільнозмінності:

$$\omega = \{(x, y) \mid c(x) = 0\} \mid y \in [y_1, y_1 + \Delta_y]\}. \quad (17)$$

Розглянемо другу задачу низькочастотної фільтрації (п. 2).

Нехай повільнозмінність $I_\lambda(x, y)$ відрізка $v(y)$ по напрямку u в певній зоні ω (17) (п. 1) недостатня. Для збільшення повільнозмінності в зоні ω застосуємо згортку

$$\bar{I}_\lambda(x, y) = \frac{1}{\Delta S} \int_{y_1}^{y_1+\Delta_y} I_\lambda(x, s) S(y-s) ds, \quad (18)$$

де

$$S(y) = \begin{cases} 1, & |y| \leq \Delta S / 2; \\ 0, & |y| > \Delta S / 2. \end{cases} \quad (19)$$

2.2.1. Алгоритм низькочастотної фільтрації по вертикальному напрямку

Нехай задано фрагмент зображення $Im_{\Delta d}$ (9). Алгоритм має таку блок-схему:

1. Операція: Визначення точок зони порушень повільнозмінності ω (17).

2. Якщо зони ω (17) відсутні, алгоритм завершено. Якщо зони ω існують, виконується операція п. 3 алгоритму.

3. Операція: Згортка (18) в зонах ω .

4. Безумовний перехід до операції п. 1 алгоритму.

5. Реконструкція сегмента поверхні дефекту зварного з'єднання.

Перед початком реконструкції зробимо ряд зауважень та припущень, які лежать в основі розробленої методики. Приймаємо, що дифузний коефіцієнт є незмінним для досліджуваного зразка $k_d = \text{const}$ (1). Приймаємо, що модулі похідної векторів нормалі $|p| = |p(x, y)|$ для всіх точок сегмента Δd (10) відомі, а також що похідні $q = q(x, y) = 0$.

Розв'язок поставленої задачі реконструкції можна досягти різними підходами. Наприклад, використати інтегральне накопичення модулів похідної векторів нормалі $|p| = |p(x, y)|$, починаючи від точки $(x_e, y_e) \in \{(x_e, y) \mid y \in [y_1, y_1 + \Delta_y]\}$, яка приймається за опорну. Додатково приймаємо припущення, що на проміжку інтегрування $[x_e, x_u]$ похідна $p(x, y_e)$ має однаковий знак. В цьому випадку

$$z(x_u, y_e) = z_e + \int_{x_e}^{x_u} |p(x, y_e)| dx, \quad (20)$$

де глибина

$$z_e = z(x_e, y_e) \quad (21)$$

задається апіорі.

3.1. Реконструкція знаку горизонтальної похідної

Нехай точка (x_e, y_e) розташована на початку дефекту.

Розглянемо клас зразків з дефектом, який має дві ознаки:

1. Глибина горизонтального перерізу дефекту є функцією

$$z(x, y_e) = f(x), \quad (22)$$

яка починаючи від одного краю дефекту, з точки (x_e, y_e) до точки $(x_{\min}, y_e)$ змінюється, не зростаючи, і в точці $(x_{\min}, y_e)$ досягає мінімального значення $z(x_{\min}, y_e) = z_{\min}$, а потім змінюється, не спадаючи, до іншого краю дефекту, до точки $(x_e + \Delta_x, y_e)$.

2. В горизонтальному напрямку на протилежних краях перерізу дефекту

$$z(x_e, y_e) = z(x_e + \Delta_x, y_e). \quad (23)$$

З використанням ознаки 1 можна ввести таку модель глибини:

$$z(x_u, y_e) = z_e + \Delta z(x_u, y_e), \quad (24)$$

де

$$\Delta z(x_u, y_e) = - \int_{x_e}^{x_{\min}} |p(x, y_e)| dx + \int_{x_{\min}}^{x_u} |p(x, y_e)| dx$$

– приріст глибини. З останнього виразу видно, що приріст глибини є функцією $\Delta z(x_u, y_e) = F(x_{\min})$, де координата $x_{\min}$ невідома. Для реконструкції цієї координати доцільно скористатись ознакою 2. Оскільки умова незмінності по висоті протилежних країв дефекту є дуже жорсткою, то це, фактично, призведе до необхідності отримання зображення дефекту з високою роздільною здатністю. Тому пом'якшимо умову (23), скориставшись критерієм відмінності точок горизонтального перерізу по висоті, сформованим на основі (24):

$$\Delta z(x_u, y_e) = z(x_u, y_e) - z(x_e, y_e), \quad (25)$$

який в точці $(x_e + \Delta_x, y_e)$ має вигляд

$$\Delta z = \int_{x_{\min}}^{x_e + \Delta_x} |p(x, y_e)| dx - \int_{x_e}^{x_{\min}} |p(x, y_e)| dx. \quad (26)$$

де $\Delta z = \Delta z(x_e + \Delta_x, y_e)$. В рамках повного виконання умови (23) маємо $\Delta z = 0$.

Пом'якшимо цю умову до такого рівня. Достатньо забезпечити визначення мінімуму Δz^2 . Для цього, враховуючи $\Delta z = F(x_{\min})$, необхідно та достатньо знайти

$$\frac{\partial \Delta z^2}{\partial x_{\min}} = 0.$$

Базуючись на цьому, в системі обробки інформації зображень варіацією координати $x_{\min}$ знайдемо мінімум квадрата приросту глибини Δz^2 .

4. Реконструкція сегмента поверхні дефекту в умовах системи обробки інформації зображень

В системі обробки інформації зображень 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 ; $i = 1, \dots, I$ (I – максимальна горизонтальна координата), $k = 1, \dots, K$ (K – максимальна вертикальна координата). Дискретизована система координат використовується для опису і розрахунку параметрів реконструкції $u \in \{I_\lambda, \bar{I}_\lambda, \zeta, g, \kappa, |p|, p, q, z\}$, де параметр $u_{ik} = u(x_i, y_k) = u(i\Delta x, k\Delta y)$ є функцією дискретних координат i, k . Фрагмент зображення (9), в якому буде проводитись реконструкція, набуває форми

$$Im_{\Delta d} = \{I_{\lambda, ik} \mid (i, k) \in \Delta d\}, \quad (27)$$

де

$$\Delta d = \{(i, k) \mid i \in [i_e, i_e + \Delta I]; k \in [k_1, k_1 + \Delta K]\} \quad (28)$$

– сегмент апертури зображення (див. (10)), де (i_e, k) – точка, розміщена на лівому краї k -го горизонтального перерізу дефекту; $\Delta I = \Delta_x / \Delta x$, $\Delta K = \Delta_y / \Delta y$, $L \in \{I, K\}$.

Відрізок (12) набуває форми

$$v_k = \{(i, k) \mid i \in [i_e, i_e + \Delta I]\}, \quad (29)$$

а сегмент апертури Δd (10), якому він належить, має в цьому випадку вигляд

$$\Delta d = \{v_k \mid k \in [k_1, k_1 + \Delta K]\}. \quad (30)$$

В дискретизованій системі координат для визначення зон порушень повільнозмінності (17) застосовується вираз

$$\omega = \{(i, k) \mid c_i = 0\} \mid k \in [k_1, k_1 + \Delta K]\}, \quad (31)$$

де

$$c_i = \bigcap_{k=k_1}^{k_1 + \Delta K} \kappa_{ik}. \quad (32)$$

Тут

$$\kappa_{ik} = \begin{cases} 1, & g_{ik} > 0; \\ 0, & g_{ik} = 0, \end{cases} \quad i \in [i_e, i_e + \Delta I], \quad (33)$$

в (33)

$$g_{ik} = \sum_{k_2=k-d}^k \zeta_{ik_2}. \quad (34)$$

В (34), з використанням підставлення $k_2 = k$, представлено

$$S_{ik} = \begin{cases} 1, [\bar{I}_{\lambda,i,k_a} - \bar{I}_{\lambda,i,k_b}]^2 < \varepsilon; \\ 0, [\bar{I}_{\lambda,i,k_a} - \bar{I}_{\lambda,i,k_b}]^2 \geq \varepsilon; \end{cases} \quad (35)$$

де $\forall k_a, \forall k_b \in [k, k+d]$, ε – поріг; d – відстань.

Розглянемо в дискретизованій системі координат реалізацію згортки (18).

Нехай з фрагмента зображення $Im_{\Delta d}$ (27) фрагментовано одномірний масив

$$Im_i = \{ \{ I_{\lambda,ik} \mid (i,k) \in \Delta d \} \mid k \in [k_1, k_1 + \Delta K] \}$$

довжиною $\Delta K + 1$. Нехай задано одномірний масив одиниць q довжиною n . В цьому випадку згортка $\bar{I}_{\lambda,i}$ є одномірним масивом довжиною $n + \Delta K$, k – й елемент якого визначається формулою [19]

$$\bar{I}_{\lambda,ik} = \sum_{j=\max(1, k+1-n)}^{\min(k, \Delta K+1)} I_{\lambda,ij} q_{k+1-j}. \quad (36)$$

Звідси маємо

$$\bar{I}_{\lambda,ik} = \frac{\bar{I}_{\lambda,ik}}{n}. \quad (37)$$

4.1. Загальна схема алгоритму адаптивної фільтрації в умовах системи обробки інформації зображень

Нехай задано фрагмент зображення k (27).

Пристосування алгоритму низькочастотної фільтрації по вертикальному напрямку (п. 2.2.1) до роботи в умовах системи обробки інформації зображень проведено на основі виразів (31)–(37), а також оператора циклу з невизначеною кількістю операцій `while...end` [19]. Алгоритм має таку блок-схему.

1. Оператор привласнювання $Im = Im_{\Delta d}$.
2. Встановлюються основні робочі параметри програми: поріг ε (35), відстань d (35), довжина n (36), (37), крок Δn наступного поновлення n . Встановлюється початкове значення параметра індикації повільнозмінності $V = V_1$, де $V_1 > 0$.
3. Якщо $V > 0$, то виконуються операції п. 4– п. 7.
4. Визначається зона порушень повільнозмінності ω (31)–(35) масиву Im і на цій основі розраховується параметр індикації повільнозмінності

$$V = \sum_{i=i_e}^{i_e+\Delta I} c_i. \quad (38)$$

5. Згортка (36), (37) в зонах ω масиву Im . Результат обробки – масив $\bar{I}_{\lambda}$.
6. Поновлюється довжина $n = n + \Delta n$ (36), (37).
7. Оператор привласнювання $Im = \bar{I}_{\lambda}$, інакше – завершення програми.

Таким чином, програма, яка реалізує зазначений алгоритм, виконується до тих пір, поки масив логічного виразу, сформований на значеннях параметра індикації повільнозмінності V (38), не стане нульовим.

4.2. Модель глибини

В дискретизованій системі координат модель глибини (24) приймає форму

$$z_{i_u k} = z_e + \Delta x \Delta z_{i_u k}, \quad (39)$$

де

$$\Delta z_{i_u k} = - \sum_{i=i_e}^{i_{\min}} |p|_{ik} + \sum_{i=i_{\min}}^{i_u} |p|_{ik} \quad (40)$$

– приріст глибини; $i_u \in [i_e, i_e + \Delta I]$, $k \in [k_1, k_1 + \Delta K]$. Як видно з (40), приріст глибини в точці $(i_e + \Delta I, k)$ (26), на основі якого визначається координата $i_{\min}$, набуває вигляду

$$\Delta z_{i_e+\Delta I, k} = - \sum_{i=i_e}^{i_{\min}} |p|_{ik} + \sum_{i=i_{\min}}^{i_e+\Delta I} |p|_{ik}. \quad (41)$$

4.2.1. Загальна схема алгоритму реконструкції глибини дефекту в умовах системи обробки інформації зображень

На основі виразів (39)–(41), а також оператора циклу `for...end` [19] було створено алгоритм реконструкції глибини дефекту в умовах системи обробки інформації зображень. Для параметрів $i_{\min}, i_e, i_e + \Delta I, i_u, z_{i_u k}, \Delta z_{i_e+\Delta I, k}$ в алгоритмі використовується відповідно позначення $i_{\min}, l, r, u, z(u, k), dz$.

1. Встановлюється початкове значення квадрата приросту глибини $D = 50000$

`for` $i_{\min} = l : r$.

2. На основі $i_{\min}$ по (39), (40) розрахунок глибини дефекту $z(u, k)$, де горизонтальна координата u належить $[l, r]$.

3. Розрахунок приросту глибини dz (41).

4. $dz2 = dz * dz$.

5. Якщо $dz2 > D$, то перериванням циклу програму завершено.

Інакше: $D = dz2$;

`end`

Таким чином, програма, яка реалізує зазначений алгоритм, виконується до тих пір, поки масив логічного виразу, сформований на значеннях квадрата приросту глибини, не припинить мінімізовуватись.

5. Приклад практичного застосування розробленого алгоритму

Для апробації алгоритму реставрації 3D використовувалась відеоінформація, отримана на зразку для визначення впливу дефектів на механічні властивості

зварних з'єднань трубної сталі 17Г1СУ, виконаному зварювальним електродом Уонии – 13/55 Р. Відеозйомку зразка проведено фотоапаратом Canon EOS 3500. Під час відеозйомки забезпечувався напрямок освітлення джерелом світла $L = (0; 0,24; 0,97)$, що відповідає куту $\varphi = 1,33$.

На рис. 3 представлена напівтонова проекція Im_{Mg} кольорового зображення зразка. В центральній частині зразок має форму циліндра з діаметром $D = 6,4 \text{ mm}$. В центрі, на поверхні цього циліндра, дислокований дефект макроструктури зварного з'єднання.



Рис. 3. Зображення зразка Im_{Mg}

На початку реконструкції, співставляючи довжину діаметра D , визначену в міліметрах і в пікселях, можна оцінити один з параметрів реконструкції (39), а саме реальний розмір пікселя – крок дискретизації

$$\Delta x = \Delta y = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ mm/pixel} . \quad (42)$$

Для визначення інших параметрів реконструкції використовується фрагмент зображення зразка з дефектом Im_d , який, у вигляді напівтонової проекції Im_{dg} , представлено на рис. 4. Для зручності роботи з цим фрагментом використовуються його власні координати і збільшений масштаб візуалізації.

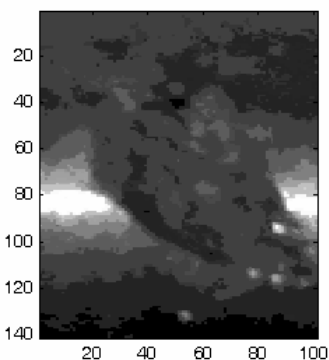


Рис. 4. Зображення дефекта зварного з'єднання Im_{dg}

На початку наступного етапу реконструкції необхідно сегментувати фрагмент зображення дефекта Im_d на дрібніші фрагменти, які містять інформацію шуканих параметрів реконструкції p , k_d , I_a (1). Зробимо ряд зауважень, на які спирається така сегментація. Під час

контролю якості стану зварного з'єднання з дефектом найбільш вагомою є 3D інформація в центральній частині дефекта [10]. Оскільки процедура реконструкції (8) передбачає застосування дифузійної моделі відбиття (1), тому умови відеозйомки фрагмента зображення дефекта, який містить інформацію параметрів p та k_d , повинні відповідати дифузійній моделі відбиття.

Як видно з рис. 4, інформацію для реконструкції модуля горизонтальної похідної $|p|$ (8), що відповідає зробленим зауваженням, потенційно можна здобути у фрагменті

$$Im_{\Delta d} = \{I_{\lambda,ik} \mid \lambda \in \{r, g, b\}, (i, k) \in \Delta d\} , \quad (43)$$

де

$$\Delta d = \{(i, k) \mid i \in [19, 90], k \in [62, 67]\} . \quad (44)$$

Додатково зауважимо, що розроблений метод реконструкції модуля горизонтальної похідної $|p|$ (8) спирається на припущення повільнозмінності поверхні дефекта макроструктури у фрагменті $Im_{\Delta d}$ по вертикальному напрямку k . Тому на даному етапі реконструкції було застосовано програму адаптивної фільтрації фрагмента $Im_{\Delta d}$ (п. 5.1) з такими параметрами: поріг $\varepsilon = 49$ (35), відстань $d = 4$ (35), довжина $n = 4$ (36) і (37), крок довжини $\Delta n = 4$.

Зауважимо, що застосування згортки безпосередньо до $Im_{\Delta d}$ приводить до крайових ефектів, тому згортка виконувалася з цілим зображенням Im_d , після чого з нього вирізався відповідний фрагмент. У результаті після подвійної фільтрації зони порушень повільнозмінності ω зникли і було отримано відфільтроване зображення $\bar{Im}_{\Delta d}$, вільне від крайових ефектів. Ці результати обробки у вигляді напівтонової проекції $\bar{Im}_{\Delta dg}$ зображено на рис. 5.

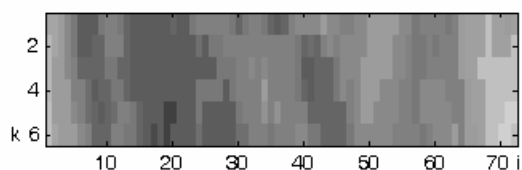


Рис. 5. Низькочастотно відфільтрований фрагмент $\bar{Im}_{\Delta dg}$ зображення дефекта Im_{dg} (рис. 4)

Для зручності роботи з цим фрагментом

$$\bar{Im}_{\Delta d} = \{\bar{I}_{\lambda,ik} \mid i \in [1, 72], k \in [1, 6]\} , \quad (45)$$

де $\lambda \in \{r, g, b\}$ використовуються з застосуванням підстановок:

$$i = i_1, \quad k = k_1 ; \quad (46)$$

його власні координати:

$$i_1 = 18 + i, \quad (47)$$

$$k_1 = 64 + k ;$$

збільшений масштаб візуалізації та підсилення інтенсивності в 2 рази. Зауважимо, що фрагмент $\bar{I}m_{\Delta d} = \{\bar{I}m_{\Delta d\lambda} | \lambda \in \{r, g, b\}\}$ має три кольорові компоненти і кожна з них містить інформацію шуканих модулів горизонтальної похідної $|p|$ (8). Обстеження компонент $\bar{I}m_{\Delta dr}$, $\bar{I}m_{\Delta dg}$, $\bar{I}m_{\Delta db}$ (45) показало, що кольорові компоненти практично пропорційні одна одній, але у наступній ланці реставрації буде використана інформація червоної компоненти, бо вона має найбільшу інтенсивність. На основі інформації цієї компоненти необхідно розрахувати двовірний масив модулів горизонтальної похідної

$$|p| = \{|p|_{ik} | i \in [1, 72], k \in [1, 6]\}. \quad (48)$$

Оскільки визначення модулів горизонтальної похідної $|p|$ за початковими даними $\bar{I}m_{\Delta dr}$ (45) зорієнтовано на червоний колір, то й інші параметри, від яких залежить $|p|$, фонову засвітку I_a та інтенсивність відбиття $I_{\lambda O}$ (6) теж потрібно визначити на основі червоної компоненти зображення дефекта зварного з'єднання Im_d (див.рис. 4).

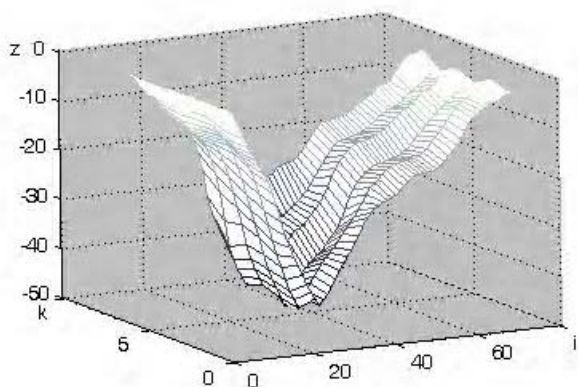


Рис. 6. 3D зображення дефекта

Для визначення фонової засвітки I_a з зображення дефекта зварного з'єднання Im_d (див. рис. 4) виділено фрагмент, який містить компоненту червоного кольору $Im_{pa} = \{I_{r,ik} | i \in [19, 90], k \in [20, 120]\}$. В результаті аналізу визначено її мінімальний елемент, який прийнято за оцінку інтенсивності фону

$$\hat{I}_a = 20. \quad (49)$$

Для визначення оцінки інтенсивності відбиття $I_{\lambda O}$ (6) з зображення дефекту зварного з'єднання Im_d (рис. 4) виділено фрагмент, який містить компоненту червоного кольору $Im_O = \{I_{r,ik} | i \in [40, 80], k \in [45, 73]\}$. В результаті аналізу визначено її максимальний елемент, який прийнято за оцінку інтенсивності відбиття

$$\hat{I}_{\lambda O} = 99. \quad (50)$$

В системі обробки інформації зображень отримане значення інтенсивності відбиття $\hat{I}_{\lambda O}$ спільно з параметрами: оцінкою фону $\hat{I}_a$ (49) і масивом червоної компоненти $\bar{I}m_{\Delta dr}$. Вираз (45) було використано для

розрахунку по формулі (8) масиву значень модулів горизонтальної похідної $|p|$ (48).

На основі цієї інформації, кроку Δx (42) та апіорі заданого значення $z_e = 0$ в системі обробки інформації зображень програмою, яка реалізує алгоритм реконструкції глибини дефекта п. 4.2.1, було розраховано масив оптимальних значень $i_{\min} = i_{\min}(k)$ і ланцюгово визначено відповідну глибину дефекта

$$z = \{z_{ik} | i \in [1, 72], k \in [1, 6]\}. \quad (51)$$

Результати проведеної реконструкції представлено на рис. 6, звідки видно, що для відображення трьохвірної будови дефекта використовуються дві розмірності: розмірність у пікселях, яка застосовувалась для проведення реконструкції, і розмірність у міліметрах, яку можна використовувати для потреб аналізу як зварне з'єднання.

6. Висновки

Розглянута проблема отримання інформації на поверхні матеріалів за допомогою методів обробки та аналізу металографічних зображень. Зокрема розглянута задача тривимірної реконструкції поверхні матеріалу дефекта зварного з'єднання за 2D зображеннями цієї поверхні. Шляхом такої реконструкції в 2D сегменті реконструкції, розташованому в центральній частині дефекта зварного з'єднання, отримано серію горизонтальних перерізів дефекта. Покроково описано методику та алгоритм розрахунку тривимірної інформації дефекта.

На основі описаної методики та визначення інформації про інтенсивність фонового освітлення, інтенсивність освітлення точок екстремумів в центрі дефекта, інтенсивність освітлення точок, що належить 2D сегменту реконструкції, з врахуванням створеної стабільності характеристик дефекта у вертикальному напрямку, отримано оцінку модуля горизонтальної похідної вектора нормалі. Наступна реконструкція локалізована в окремих горизонтальних перерізах, що належить 2D сегменту реконструкції.

В перерізі оцінка глибини тріщини визначається інтегральним накопиченням оцінок модуля горизонтальної похідної вектора нормалі дефекта починаючи від одного з країв перерізу дефекта. Базуючись на цій моделі глибини, створюється інтегральна модель глибини перерізу з одним мінімумом, розташованим між протилежними краями перерізу. При переході через точку мінімуму інтегральне накопичення оцінок модуля горизонтальної похідної вектора нормалі змінює знак. Спираючись на припущення про однакову висоту протилежних країв перерізу, відносно найглибшої точки перерізу, розроблено алгоритм визначення горизонтальної координати точки мінімуму глибини. В алгоритмі варіацією цієї координати шукається мінімум квадрата приросту глибини на протилежних краях перерізу.

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 якості зварних з'єднань сталі на основі визначення, згідно із запропонованою методикою, глибини в сегменті дефекта макроструктури зварного з'єднання.

Література: 1. Гривняк І. Зварюваність сталей. М.: Машинобудування, 1984. 216с. 2. Бадьянов Б.Н., Давидов Б.Н. Зварювальні процеси в електронній техніці. М.: Вища школа, 1988. 189с. 3. Моцохін С.Б. Контроль якості з'єднань і конструкцій. М.: Стройиздат, 1985. 229с. 4. Шебеко Л.П., Яковлев А.П. Контроль якості зварних з'єднань. М, 1972. 253с. 5. Щербинский В.Г., Алешин Н.П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. М.: Стройиздат, 1989. 320с. 6. Троицкий В.А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. Методические рекомендации для специалистов-дефектоскопистов. К: ИЭС им. Е.О.Патона, 1997. 224с. 7. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Румянцев С.В. и др. Неразрушающий контроль. Россия. 1990-2000 гг. Справочник / Под. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2001. 616с. 8. Троицкий В.А. Пособие по радиографии сварных соединений. Киев, ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины. 2000. 266 с. 9. Маслова В.А., Стороженко В.А. Термография в диагностике и неразрушающем контроле. Харьков: "Компания СМИТ", 2004. 160с. 10. ДСТУ 3491-96 (ГОСТ 30242-97) Дефекты з'єднань при зварюванні металів плавленням. Класифікація, позначення та визначення. 11. Myshkin N.K., Kong H., Gngoriev A.Ya., Yoon E.-S. The use of color in wear debris analysis // Elsevier Wear. 2001. Vol.251. P.1218-1226. 12. Szala J. Zastosowanie metod komputrowej analizy obrazu do ilosciowej oceny struktury materialow. W. Politechnika Slaska, Zeszyty naukowe, 2000. №1518. 167с. 13. Русин Б.П., Иванюк В.Г., Капшій О.В., Ануфрієва Н.П., Похмурський А.Ю. Оцінка глибини пітинга за зображеннями поверхні матеріалу // Радіоелектроніка і інформатика. 2010. № 1. С. 83-91. 14. 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. 15. Shintaro Watanabe, Koji Miyajima Detecting Building Changes Using Epipolar Constraint From Aerial

Images Taken At Different Positions // ICIP 2001. 2001. P.201-204. 16. Порев В. Комп'ютерна графіка. Київ: "Корнійчук", 2000. 256с. 17. Foley et al. Computer Graphics. - Addison Wesley. 1997. 18. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. 1. М.: Наука, 1967. 480с. 19. Потемки В.Г. Система МАТЛАБ. Справочное пособие. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1998. 350с.

Надійшла до редколегії 12.03.2011

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

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, 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

Корній Валентина Василівна, канд. техн. наук, ст. наук. співроб. Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАНУ. Наукові інтереси: обробка та розпізнавання зображень. Адреса: Україна, 79601, Львів, вул. Наукова, 5а, тел. 229-62-65, e-mail: valia@imp.lviv.ua

Юркевич Роман Михайлович, м. н. с. відділу "Корозійного розтріскування металів" Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАНУ. Наукові інтереси: визначення впливу дефектів на механічні властивості зварних з'єднань сталі, обробка та розпізнавання зображень. Адреса: Україна, 79601, Львів, вул. Наукова, 5а, тел. 229-62-66, e-mail: iurkevych@ipm.lviv.ua