

УДК 004.932; 620.19

ВПЛИВ ПЕРВИННОЇ ОБРОБКИ НА СЕГМЕНТАЦІЮ РЕНТГЕНОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЗВАРНИХ ШВІВ

Р. А. ВОРОБЕЛЬ, І. Б. ІВАСЕНКО, Т. С. МАНДЗІЙ, В. В. БОЦЯН

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

Досліджено вплив на результат контролю попередньої обробки цифрових рентгенографічних зображень через їх медіанну фільтрацію та яскравісну нормалізацію шляхом нерізкого маскування і контрастування на основі моделі логарифмічного типу. Наведено приклади експериментального виявлення дефектів зварних швів різного виду.

Ключові слова: *зварний шов, фільтрація, контрастування, сегментація дефектів, логарифмічна обробка зображень.*

Розвиток рентгенографії призвів до широкого використання цифрових зображень під час аналізу потенційно небезпечних ділянок виробів, одним з прикладів яких є зварне з'єднання. Це має місце у нафтогазовій промисловості, зокрема на магістральних трубопроводах, де експрес-аналіз отриманих рентгенограм є важливим елементом діагностування контрольованих виробів. На сьогодні процедура такого діагностування залишається традиційно трискладовою [1]. Перша складова – реєстрація зображення і його подання у цифровій формі. Друга – попередня обробка зображення для усунення завад, а третя – сегментація об'єкта інтересу на зображенні і виділення на ньому дефектів з подальшою їх класифікацією, формуванням паспорта дефектності та архівування отриманих результатів контролю. У цій роботі приділятиметься основна увага другій складовій – первинному опрацюванню зображень, бо від неї значною мірою залежить результат діагностики зварного з'єднання. Зазвичай первинна обробка полягає в усуненні шумів та поліпшенні якості зображення через його контрастування внаслідок чого досягається яскравісна нормалізація зображення. Зазначимо, що аналіз рентгенограм зварних з'єднань скерований на побудову автоматичних систем, для яких зварний шов є областю інтересу на оцифрованому рентгенографічному зображенні. Тобто спочатку виокремлюють зварний шов, а потім, маючи вже цю область інтересу, сегментують дефекти у ньому та детально їх аналізують. Зазвичай розглядають сегментацію (виокремлення) прямої ділянки зварного шва [2]. У іншому підході до виділення шва [3], використали зображення синтезованих моделей труб, що збільшило гнучкість методу та дало змогу застосовувати його для зварних швів іншої геометрії. Однак тут кільцевий зварний шов подається двома окремими ділянками, через що його не аналізують у повному обсязі. Маючи виділену завдяки сегментації зону зварного шва, можна прецизійніше визначати його дефекти. В цілому, під час аналізу рентгенографічних зображень виникає низка труднощів пов'язаних з нечіткістю їх меж та текстури. Зазначені особливості в низці випадків (під час використання методів, що обмежуються виключно інформацією про текстурні характеристики областей зображення) призводять до результатів сегментації об'єктів, що не відповідають їх істинній формі. Для уникнення цих недоліків доцільно застосовувати методи, які, зокрема, базуються на

Контактна особа: Р. А. ВОРОБЕЛЬ, e-mail: vorobel@ipm.lviv.ua

апріорній інформації про форму об'єкта інтересу та можливі її варіації. Саме до таких методів належать моделі активних форм, які використовують статистичний опис форми об'єктів і знаходять широке застосування в обробці зображень [4, 5]. Застосування засобів сегментації, що базуються на комплексній інформації про форму та текстуру об'єкта, дають змогу проводити її коректно навіть на тих ділянках зображення, у яких спотворені або відсутні притаманні об'єкту сегментації текстурні характеристики. Виокремлена ділянка зображення зварного шва стає базовою для подальшої сегментації дефектів і кількісного та якісного аналізу її результатів [6].

Мета цієї роботи – розробити технологію первинного опрацювання рентгенографічних зображень зварних з'єднань, яка б сприяла підвищенню точності аналізу дефектності зварного з'єднання. Для цього на початку розглянемо метод усунення шуму з оцифрованих рентгенографічних зображень, потім опишемо методи поліпшення зображень через контрастування для їх яскравісної нормалізації, а на завершення подамо стислий опис цілісної процедури сегментування зображення для виділення дефектів шва.

Метод усунення шуму з оцифрованих рентгенографічних зображень.

Оцифровані рентгенографічні зображення характеризуються похибкою квантування, яка виникає під час сканування рентгенографічних плівок. Використовували сканування з точністю 600 дрі та 8-бітним поданням глибини рівня сірого елемента зображення. Отримані цифрові рентгенограми характеризуються шумом, складовими якого є похибки квантування та зернистість плівки. Традиційні підходи для згладження зі застосуванням медіанних фільтрів з квадратною чи прямокутною формою апертури не забезпечували належного результату через спотворення контурної форми дефектів зварного шва. В результаті експериментів обрали для фільтрації медіанний фільтр з ромбовидною рамковою апертурою W товщиною у два елементи та розміром діагоналей в дев'ять елементів. Центральний елемент апертури такого фільтра завжди неінформативний під час визначення поточного результату фільтрації, що забезпечило візуально помітне зменшення шуму на зображенні. При цьому контурні форми дефектів практично не змінилися.

Нехай задано вхідне зображення L розміром $N \times M$ елементів, причому $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, M}$, а $L(i, j) \in [0, 255]$. Ковзна область апертури W фільтра з центром в координатах (i, j) містить 28 елементів і описується виразом

$$W(i, j) = \{L(i, j-4), L(i-1, j-3), L(i, j-3), L(i+1, j-3), \\ L(i-2, j-2), L(i-1, j-2), L(i+1, j-2), L(i+2, j-2), \\ L(i-3, j-1), L(i-2, j-1), L(i+2, j-1), L(i+3, j-1), \\ L(i-4, j), L(i-3, j), L(i+3, j), L(i+4, j), L(i-3, j+1), \\ L(i-2, j+1), L(i+2, j+1), L(i+3, j+1), L(i-2, j+2), \\ L(i-1, j+2), L(i+1, j+2), L(i+2, j+2), L(i-1, j+3), \\ L(i, j+3), L(i+1, j+3), L(i, j+4)\}.$$

Розмір апертури фільтра вибраний співмірним з розмірами дефектів зварного шва. Результат фільтрації $L_{\text{med}}(i, j)$ обчислюємо за формулою

$$L_{\text{med}}(i, j) = \underset{W}{\text{median}} \{W(i, j)\}. \quad (1)$$

Щоб зменшити вплив шуму після фільтрації зображення, потрібно його нормалізувати за яскравісною ознакою, що відповідатиме нормалізації рентгеногра-

ми за інтенсивністю рівнів сірого її елементів. Така процедура узгоджує зміну фактичних фізичних коефіцієнтів поглинання рентгенівського випромінювання у різних за товщиною частинах контрольованого виробу. Однак вона має за мету сприяти кращому наступному виділенню дефектів незалежно від їх глибини та місця розташування у контрольованому виробі, товщина якого не обов'язково постійна. Для цього розробили два методи – нерізкого маскування у просторовій області та алгебричного опрацювання на основі перетворень логарифмічного типу. Вибір методу нерізкого маскування зумовлений тим, що він алгоритмічно використовує адитивну двокомпонентну модель подання зображення через суму низькочастотної фонові складові та високочастотної складові, яка відображає дрібні деталі. Перенесення фонові складові за рівнем інтенсивності до середини можливого діапазону зміни рівнів сірого елементів зображення сприяє оптимальній помітності дефектів на такому фоні. З другого боку, рентгенівські зображення через зміну оптичної густини відображають локальні неоднорідності, які спричинені дефектами у матеріалі. Оптична густина пов'язана з інтенсивністю логарифмічною залежністю. Тому доцільно використовувати для опрацювання такого типу зображень саме алгебричні операції логарифмічного типу. Враховуючи це, опишемо кожен з розглянутих підходів детальніше.

Застосування нерізкого маскування в просторовій області. Щоб нормалізувати рентгенографічне зображення, використали нерізке маскування, приведене до середини динамічного діапазону рівнів сірого його елементів. В аналітичному вигляді цю процедуру описують виразом

$$L_1^{\text{norm}}(i, j) = 128 + k[L(i, j) - \bar{L}_1(i, j)], \quad (2)$$

де k – коефіцієнт підсилення локального контрасту ($k = 1 \div 3$), а $\bar{L}_1(i, j)$ – поточне значення рівня сірого для елемента з координатами (i, j) після ковзної усередненої (низькочастотної) фільтрації рівнів сірого зображення у квадратному вікні U з $n \times n$ елементів

$$\bar{L}_1(i, j) = \frac{1}{n^2} \sum_{r=-[n/2]}^{[n/2]} \sum_{s=-[n/2]}^{[n/2]} L(i+r, j+s).$$

Для практичного опрацювання рентгенограм зварного шва вибиралися $k = 3$ та $n = 155$.

Опрацювання зображень на основі алгебричних моделей логарифмічного типу. У працях [7–9] описана базова модель логарифмічної обробки зображень для дійсного векторного простору рівнів сірого їх елементів. Операція додавання $\langle + \rangle$ для $E = (-M, M)$, де $M > 0$, і $\forall u, v \in E$ подана так:

$$u \langle + \rangle v = \text{sign}(u+v) \cdot M \cdot \left(1 - \left(\left(1 - \frac{|u|}{M} \right)^{\text{sign}(u)} \cdot \left(1 - \frac{|v|}{M} \right)^{\text{sign}(v)} \right)^{\text{sign}(u+v)} \right), \quad (3)$$

а операція множення на скаляр для довільних $\alpha \in R$ і $u \in E$ описується виразом

$$\alpha \langle \times \rangle u = \text{sign}(\alpha \cdot u) \cdot M \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{|u|}{M} \right)^{|\alpha|} \right). \quad (4)$$

Побудованій векторній структурі властивий ізоморфізм, який однозначно відображає елементи простору E у простір дійсних чисел R через нелінійну функцію $\varphi: E \rightarrow R$:

$$\varphi: u \rightarrow \varphi(u) = -M \cdot \ln \left(1 - \frac{|u|}{M} \right)^{\text{sign}(u)}. \quad (5)$$

Запропонована попередня обробка полягає у переведенні значень рівнів сірого елементів зображення в логарифмічний простір, згідно з ізоморфізмом (5), застосуванні операції нерізкого маскуванія з адаптивним ітеративним згладженням [9] та зворотному переході, згідно з функцією, оберненою до виразу (5).

Цей метод можна стисло описати так:

$$L_2^{\text{norm}}(i, j) = k_1 \langle \times \rangle \bar{L}_2 \langle + \rangle k_2 \langle \times \rangle (L \langle - \rangle \bar{L}_2), \quad (6)$$

де L_2^{norm} – результат поелементного перетворення зображення, а \bar{L}_2 – рівень сірого згладженого зображення у локальному околі з центральним елементом з координатами (i, j) , для якого обчислюють L_2^{norm} ; k_1 та k_2 – константи, що регулюють передачу та підсилення деталей (k_1 і k_2 потрібно вибирати з урахуванням їх приблизної взаємооберненої залежності, наприклад, $k_2 = 1/k_1$), $\langle + \rangle$ – операція додавання (3), $\langle \times \rangle$ – операція множення на скаляр (4). Тут в експериментах використали такі коефіцієнти: $k_1 = 0,2$ та $k_2 = 4$.

Згладжене зображення \bar{L}_2 формується як суперпозиція p (тут $e = \overline{1, p}$, $p = 7$) зображень, кожне з яких отримано з вхідного зображення L шляхом його усереднення за допомогою фільтра з гаусівським ядром. Кожному ядру відповідає своя просторова константа σ_e , вибрана у логарифмічному масштабі зі заданою верхньою межею значення σ_{max} . Завдяки цьому фактично реалізовується кратномасштабна суперпозиція. Зазвичай числове значення σ вибирають рівним 1/6 більшої сторони зображення. Критерієм вибору коефіцієнтів зваженої суперпозиції є середньоквадратичне відхилення. Спеціальною ітеративною процедурою зшивання цих зображень (з множини p усереднених) досягають значного згладження на “плоских” однорідних ділянках (фон, текстура), що дає змогу методам нерізкого маскуванія (6) краще виділяти слабкі неоднорідності. Разом з тим згладження є помірне у перехідних ділянках (на межах об’єктів та висококонтрастних ділянках), що уможлиблює використання методів нерізкого маскуванія з уникненням надмірного підсилення контрасту, яке супроводжується артефактами типу смуг Маха.

Сегментація зварного шва за попередньо обробленим первинним зображенням. Маючи готове попередньо оброблене зображення для виділення ділянки зварного шва, застосовуємо модель статистичного подання форми (у вигляді набору ключових точок), побудовану на основі навчального набору просегментованих вручну рентгенографічних зображень зварних швів [4]. Кінцева статистична модель форми об’єкта інтересу має такий вигляд:

$$x = \bar{x} + \mathbf{Pb},$$

де \bar{x} – усереднений вектор навчального набору ключових точок; \mathbf{P} – матриця, що відповідає за взаємозв’язки та обмеження у взаємному положенні ключових точок; \mathbf{b} – вектор параметрів моделі, що відповідає за варіацію форми, а x – нова згенерована моделлю форма для вектора параметрів \mathbf{b} .

Саме у процедурі навчання цієї моделі задаємо геометричну форму шва – прямолінійного, кільцевого чи якогось іншого. Першим кроком процедури сегментації шва є задання початкового наближення, а саме, початкового положення та геометричної форми моделі у вигляді кусково-лінійного контуру на вхідному зображенні. Наступним етапом є безпосереднє ітеративне та автоматичне налаштування параметрів моделі, кожен крок якого полягає у відшуканні таких пара-

метрів (s, t_x, t_y, θ) (масштаб s , зсув по горизонталі t_x та вертикалі t_y , і кут θ повороту моделі відносно вхідного зображення) та \mathbf{b} , які мінімізують вираз

$$E = (x_{\text{new}} - x_{\text{cur}})W(x_{\text{new}} - x_{\text{cur}})^T,$$

де W – діагональна матриця ваг значимості ключових точок; x_{cur} – поточне розташування ключових точок моделі; x_{new} – нове положення ключових точок, оцінене процедурою їх пошуку на вхідному зображенні. В результаті процедури пошуку модель об'єкта налаштовує свої параметри так, щоб вони якнайкраще відповідали вхідному зображенню.

На завершальному етапі формується бінарна маска зображення зварного шва. Завдяки ній на вхідному зображенні автоматично виділяється зварний шов у напівтоновому поданні. Його використовують для наступної процедури – сегментації дефектів цього шва і їх подальшого аналізу.

Сегментація дефектів у попередньо виділеному зображенні зварного шва. Зображення зварного шва характеризуються значною неоднорідністю фону. Через це виділити на такому фоні дефекти зварювання складно в цілому, а тим більше за автоматичної реалізації. Використання традиційних підходів сегментації об'єктів, які базуються на визначенні порогу, виділенні контурів чи безпосередньому нарощуванні областей, ускладнені різноманітністю дефектів та зміною їх геометричної форми і розмірів. Тому у виділеній зоні зварного шва доцільно сегментувати кратномасштабним структурно-адаптивним методом [10]. Він базується на кусково-лінійній моделі функції інтенсивності зображення та апараті математичної морфології для моделювання локальних об'єктів. Області уваги вибирають за допомогою локальної функції зображення, що набуває більших значень в точках, що належать об'єкту, ніж у точках фону. Розглянемо область об'єкта $O(i, j)$, яка є структурним елементом круглої форми, з центром в точці (i, j) , і область $B(i, j)$, яка є фоном навколо об'єкта. Спочатку для кожного вікна обчислюємо робастні оцінки функції інтенсивності зображення області об'єкта $G_O^q(i, j)$ та фону $G_B^q(i, j)$ для всіх параметрів масштабу q . Щоб зменшити обчислювальну складність, вибрали кусково-сталу модель функції інтенсивності зображення. Робастну оцінку інтенсивності θ для області, що складається з t пікселів вибирають як найкращу за всіма можливими підвибірками довжиною $(t+1)/2$:

$$\theta = \arg \min_{\theta_c} \{d(\xi_c, \theta_c); c = 1, \dots, C_t^{(t+1)/2}\},$$

де θ_c – коефіцієнт регресії, що відповідає підмножині ξ_c ; $d(\cdot)$ – функція похибки коефіцієнтів поліноміальної регресії. Під час побудови піраміди зображень використовуємо процедуру усереднення чотирьох сусідніх пікселів. Функцію інформативності обчислюємо за виразом

$$R\{g^q(i, j)\} = G_B^q(i, j) - G_O^q(i, j).$$

Поріг локалізації визначаємо методом трикутника на основі гістограми значень функції інформативності. Для цього будуємо гістограму розподілу функції інформативності для всього зображення та застосовуємо правило трикутника від мінімального до максимального значення функції інформативності, тобто максимального перепаду інтенсивності. Далі сегментуємо кожну область уваги. Після цього формуємо таблицю локалізованих дефектів та їх параметрів, зокрема, координати центра та площі. В такий спосіб отримуємо виявлені дефекти у зварному шві.

Однак за реального опрацювання зображень зварних швів можемо отримати різні результати кінцевої бінарної картини дефектності контрольованого зварного шва за різних параметрів опрацювання діагностичних зображень. Тому виникає задача зведення таких результатів до одного спільного. Для цього використовуємо операцію поелементного логічного додавання результатів виявлення дефектів (тут не дефект це 0, а дефект – це 1). Завдяки цьому отримане нове зображення включає усі дефекти і відображає завищену оцінку дефектності в цілому. Після цього поелементно перевіряємо відповідність складових дефекту пороговій чутливості [11]. Якщо для елемента зображення порогова чутливість є вища за його фактичний локальний контраст, то це означає, що він був класифікований як дефект з наперед завищеними вимогами щодо чутливості.

Експериментальні дослідження з виявлення дефектів зварного шва. Дослідили описану технологію виділення дефектів прямого (рис. 1) та кільцевого (рис. 2) зварних швів.

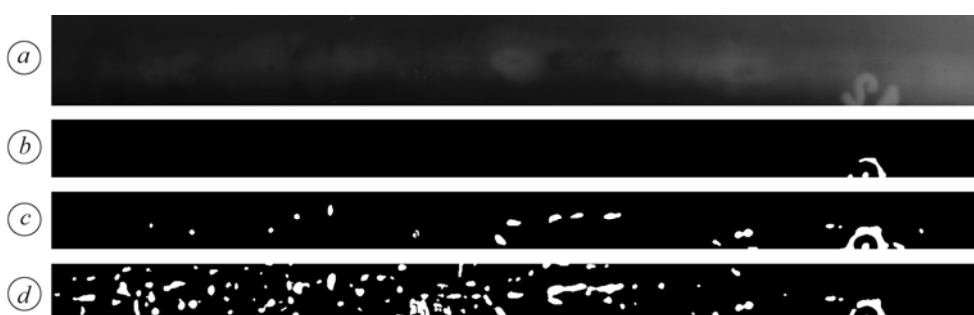


Рис. 1. Зображення прямого зварного шва (а) і результати його сегментації після медіанної фільтрації (b), обробки нерізким маскуванням (с) і на основі моделі логарифмічного типу (d).

Fig. 1. Straight welded joint image(a) and results of its segmentation after median filtering (b), non-sharp masking (c) and after processing based on logarithmic image model (d).

Результати оцінювання кількості об'єктів та їх площ у пікселях наведено в таблиці. Інтегральне оцінювання фактичного ступеня підвищення достовірності визначення дефектів зварного шва можливе тільки експериментально шляхом механічного визначення дефектів та їх розмірів.

Оцінювання результатів сегментації за кількістю (площею) об'єктів

Зварний шов	Метод попередньої обробки		
	медіанна фільтрація	нерізке маскування	на основі моделі логарифмічного типу
прямий (рис. 1a)	3 (6342)	21 (41844)	102 (146062)
кільцевий (рис. 2a)	26 (25747)	122 (147837)	159 (136261)
кільцевий (рис. 2e)	16 (19182)	55 (57473)	129 (98214)

Наведені результати виділення дефектів зварних швів різної конфігурації ілюструють ефективність первинної обробки зображень за запропонованими методами і підтверджують доцільність використання описаної технології опрацювання цифрових рентгенографічних зображень.

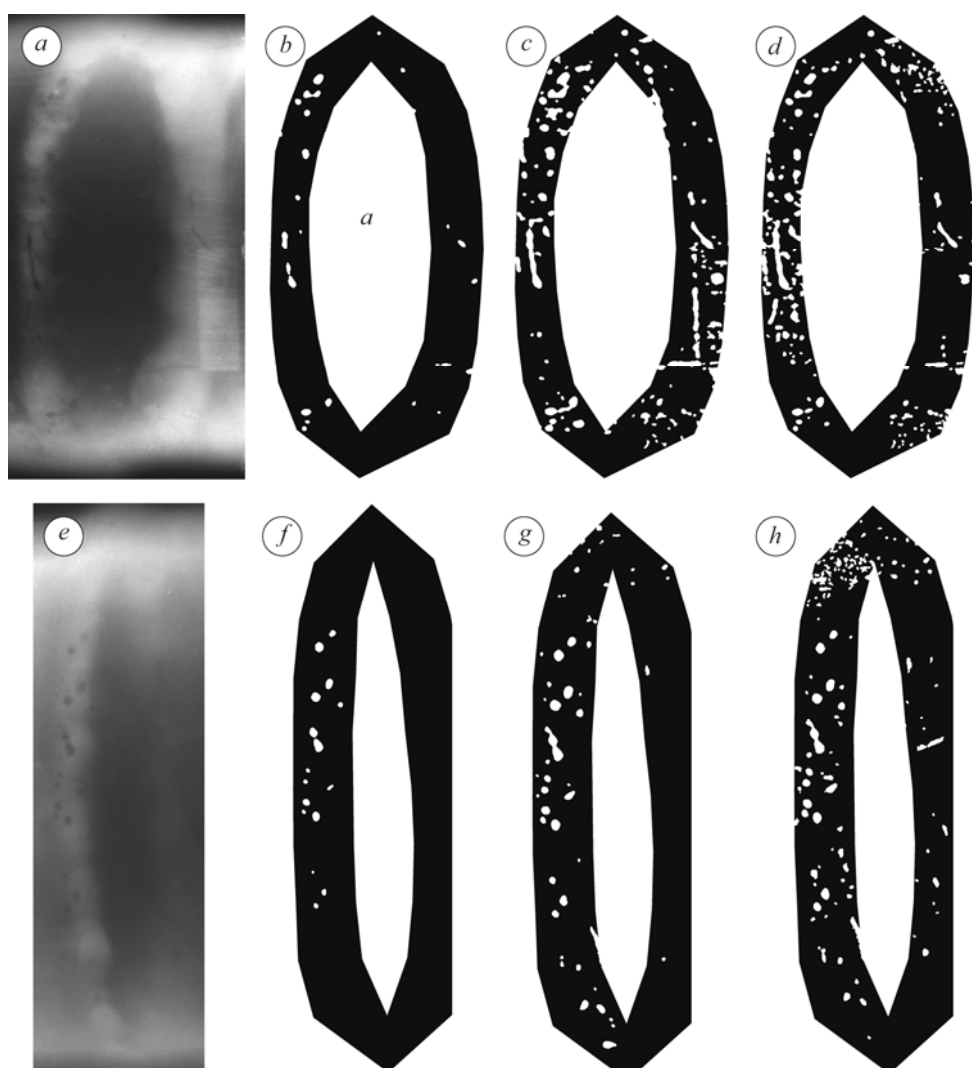


Рис. 2. Зображення кільцевих зварних швів (*a, e*) та результати їх сегментації після медіанної фільтрації (*b, f*), попередніх обробок нерізким маскуванню (*c, g*) і на основі моделі логарифмічного типу (*d, h*).

Fig. 2 Circular welded joint images (*a, e*) and results of their segmentation after median filtering (*b, f*), non-sharp masking (*c, g*) and after processing based on logarithmic image model (*d, h*).

ВИСНОВКИ

Завдяки використанню рамкової ромбовидної апертури для медіанного фільтра зменшено вплив шумів квантування та зернистості плівки. Зі застосуванням для яскравісної нормалізації діагностичних зображень нерізкого маскуванню та контрастування на основі моделі логарифмічного типу розроблено взаємодоповнювальні методи опрацювання зображень зварних швів, які, в поєднанні з сегментаціями зони зварних швів методом активних форм та безпосередньо дефектів у зварних швах за їх зображеннями, зробили можливим виявлення дефектів відповідно до чутливості рентгенівського контролю.

РЕЗЮМЕ. Исследовано влияние на результат контроля предварительной обработки цифровых рентгенографических изображений путем их медианной фильтрации и яркостной нормализации нерезким маскированием и контрастированием на основе модели логарифмического типа.

рифмического типа. Приведены примеры экспериментального выявления дефектов сварных швов разного вида.

SUMMARY. The influence of preliminary digital radiographic images processing on the testing result is investigated. Median filtering and intensity normalization by unsharp masking and contrasting by using the logarithmic type model are proposed. The examples of experimental detection of defects of different types of welded joints are presented.

1. *Automatic* weld recognition and extraction from real-time X-ray images using quadratic curve fitting and multi-order differences analysis of intensity profile / J. Shao, D. Du, H. Shi et al. // *Insight*. – 2011. – **53**, № 10. – P. 562–569.
2. *Hassan J., Majid Awan A., and Jalil A.* Welding Defect Detection and Classification Using Geometric Features // *Proc. of IEEE 10th Int. Conf. on Frontiers of Information Technol.* – 2012. – P. 139–144.
3. *Genetic Algorithms to Automatic Weld Bead Detection in Double Wall Double Image Digital Radiographs* / M. Kroetz, T. M. Centeno, M. R. Delgado et al. // *WCCI 2012 IEEE World Congress on computational Intelligence*. – Brisbane (Australia), 10–15 June. – 2012. – P. 1–7.
4. *Mandziy T.* Active shape models with adaptive weights // *Відбір і обробка інформації*. – 2009. – Вип. 30 (106). – P. 133–137.
5. *Active shape models – their training and application* / T. F. Cootes, C. J. Taylor, D. H. Cooper, and J. Graham // *Computer Vision and Image Understanding*. – 1995. – **61**(1). – P. 38–59.
6. *Rathod V. R. and Anand R. S.* A novel method for detection and quantification of incomplete penetration type flaws in weldments // *J. of X-Ray Science and Technology*. – 2011. – **19**. – P. 261–274.
7. *Воробель Р. А.* Логарифмічна обробка зображень. Ч. 1: Базова модель // *Відбір і обробка інформації*. – 2009. – Вип. 31 (107). – С. 26–35.
8. *Воробель Р. А.* Логарифмічна обробка зображень. – К.: Наук. думка, 2012. – 231 с.
9. *Боцян В. В., Воробель Р. А.* Покращання зображень з використанням адаптивної моделі логарифмічного типу // *Відбір і обробка інформації*. – 2012. – Вип. 37 (113). – С. 86–92.
10. *Івасенко І. Б.* Локалізація та сегментація різномасштабних об'єктів з використанням функції інформативності // *Там же*. – 2005. – Вип. 22 (98). – С. 76–80.
11. *Компьютерная технология определения чувствительности рентгенографического контроля по изображению канавочного эталона* / Р. А. Воробель, Н. В. Опыр, З. А. Бернык, О. Р. Берегуляк // *Дефектоскопия*. – 2009. – № 5. – С. 81–89.

Одержано 28.05.2013