

Piotr LESIAK¹
Piotr BOJARCZAK

MIARY PODOBIENSTWA OBRAZÓW WAD ZŁĄCZY SPAWANYCH

W artykule przedstawiono podstawowe miary podobieństwa obrazów wad materiałowych obiektów jako propozycję nowej oceny diagnostycznej. Opracowano aplikację i wykonano badania symulacyjne podobieństwa uszkodzeń w złączach spawanych, zidentyfikowanych metodami radiograficzną i wiroprądową. Dokonano porównań metody klasycznej i metody opartej o miary podobieństwa.

SIMILARITY MEASURES OF IMAGES OF FLAWS OCCURRING IN WELDED JOINTS

The paper presents basic similarity measures of images of flaws of objects which can be used in diagnostic process. Simulation of similarity of flaws occurring in welded joints captured with the use of radiation and eddy current methods has been presented. The comparison of both classic method and the method being based on similarity measure has been made.

1. WSTĘP

Podstawowa zasada oceny wad obiektów poddawanych badaniom defektoskopowym, opiera się na porównaniu zmierzonych parametrów wad z ich wzorcami. Najczęściej stosowanymi parametrami są wymiary geometryczne jak pole wady lub jej długość, zgodnie z obowiązującymi normami. Przekroczenie krytycznych wartości prowadzi do określonej decyzji diagnostycznej i podjęcie czynności obsługowych lub wyłączenie obiektu z eksploatacji, rys. 1. W przypadku zobrazowania 2-D, wady reprezentowane są w postaci obrazów dyskretnych, które z reguły poddaje się rekonstrukcji w celu przywrócenia pierwotnych ich cech. Taka metoda oceny ma istotne wady, gdyż pomija lokalne różnice obrazu cyfrowego wady, a przyjmuje uśrednione wartości z jej obszaru. Może to doprowadzić do błędnych interpretacji uszkodzenia, gdyż wady o różnym kształcie geometrycznym i różnym rozkładzie jasności pikseli, mogą dawać podobne rezultaty oceny.

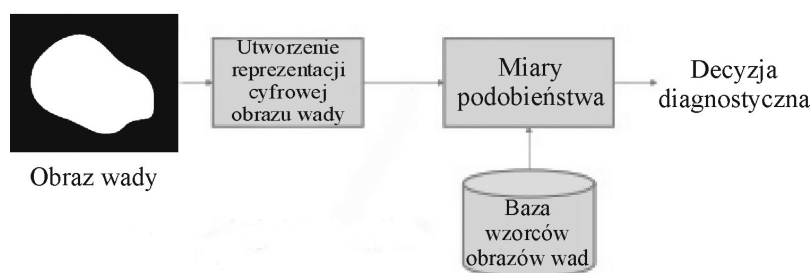
Dlatego też autorzy zaproponowali nowy sposób oceny obrazów wad z wykorzystaniem tzw. miar podobieństwa jako funkcji odległości lub bliskości obiektów. Porównują one obrazy jako macierze pikseli jasności. Przeprowadzono badania symulacyjne typowych uszkodzeń w złączach spawanych. Eksperymenty zrealizowano na obrazach uzyskanych z

¹Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki; 26-600 Radom; ul. Malczewskiego 29. tel: 48 361-77-09, Fax: 48 361-77-42, e-mail: p.lesiak@pr.radom.pl

klasycznych metod badań nieniszczących takich jak radiograficzna i wiropłdowa, poddając je wcześniej rekonstrukcji w celu sunięcia szumów.

2. PODSTAWOWE MIARY ODLEGŁOŚCI I BLISKOŚCI OBRAZÓW

W celu określenia związków między dwoma obrazami wad lub między obrazem wady a jej wzorcem, wprowadza się takie pojęcia jak: odległość, metryka, funkcja odległości, funkcja bliskości czy też funkcja przynależności. Miarą klasyfikatora realizującego regułę decyzyjną jest funkcja ogólnie nazwana miarą podobieństwa lub też funkcją przynależności, rys. 1.



Rys. 1. Ilustracja algorytmu klasyfikatora diagnostycznego na podstawie miary podobieństwa obrazów wad

Niech będą piksele jasności wady w_m oraz jej wzorca Ω_m opisane wektorami M – wymiarowymi w przestrzeni euklidesowej \mathfrak{R}^M . Atrybutami tych prób mogą być długość lub pole powierzchni obrazu wady oraz określone amplitudy (poziomy) pikseli sygnału, które wykorzystano w dalszych rozważaniach. Funkcja podobieństwa może przybierać postać funkcji odległości $D(W, \Omega)$ lub funkcji bliskości $B(W, \Omega)$. Pomędzy tymi funkcjami istnieje zależność $D(W, \Omega) = 1/B(W, \Omega)$, dla $B(W, \Omega) \neq 0$.

Przykładowymi odległościami (metrykami) między dwoma obiektami - obrazem wady i obrazem wzorca mogą być np.: odległość Minkowskiego [1], [4], [5], [10]:

$$D^{Min}(W, \Omega) = \left[\sum_{m=1}^M |w_m - \Omega_m|^\gamma \right]^{1/\gamma} \quad (1)$$

która dla $\gamma = 2$ znana jest pod nazwą odległości Euklidesa:

$$D^{Eu}(W, \Omega) = \sqrt{\sum_{m=1}^M (w_m - \Omega_m)^2} \quad (2)$$

Natomiast wyrażenie (1) dla $\gamma = 1$ zwane jest odlegością miejską (ang. *city-block distance*), taksówkową lub manhattańską. Jeżeli $M \rightarrow \infty$ to metryka Minkowskiego przybiera postać metryki Czebyszewa. Inne odległości to Freche`ta, Canberra, poczty czy metra [5].

Do zalet odległości euklidesowej należą m.in. niewrażliwość odległości pomiędzy dwoma dowolnymi obiektami, na dodanie do zbioru nowych danych, które mogą być obiektami odstającymi. Wadą tej miary jest duży wpływ jednostek między wymiarami, na

podstawie których są wyliczane odległości. W celu wyeliminowania tej wady we wszystkich przeprowadzonych analizach zmienne zostały poddane standaryzacji. Toteż dla dwuwymiarowych (macierzowych) reprezentacji obrazów można określić tę odległość jako:

$$D^{Eu}(W, \Omega) = \frac{1}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \Omega_{m,n}^2}} \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M |w_{m,n} - \Omega_{m,n}|^2} \quad (3)$$

gdzie: $m, n = 1, 2, \dots, M$ wymiar macierzy.

Należy zauważyć, że dla odległości opisanej wyrażeniem (3), obrazy są macierzami kwadratowymi.

Do popularnych miar bliskości można zaliczyć funkcję korelacyjną:

$$B^C(W, \Omega) = \frac{w^T \Omega}{\|w\| \cdot \|\Omega\|} \quad (4)$$

gdzie: $\|w\|$ - oznacza moduł wektora w ,

T - oznacza znak transpozycji wektora.

i funkcję Tanimoto (stosowana również dla wektorów o składowych dyskretnych):

$$B^{Ta}(W, \Omega) = \frac{w^T \Omega}{\Omega^T w + \Omega^T \Omega - w^T \Omega} \quad (5)$$

W szczególnym uproszczonym przypadku, gdy obrazy są binarne, funkcje podobieństwa mają postać odpowiedniej funkcji logicznej. W tych przypadkach stosowane są odległości Hamminga, statystyka χ^2 i współczynnik Jaccarda [4], [5].

Obliczenia zrealizowano w aplikacji MATLABA, której interfejs graficzny pokazuje rys. 2. Jako przykład demonstracyjny przedstawiono model wady w kształcie zdeformowanego kwadratu, który zawiera podstawowy szum, czyli addytywne zakłócenia, błąd kwantyzacji, rozmycie czy też ubytek. Obraz wzorca stanowi idealny kwadrat. Różnica między obrazami, pokazuje czarne tło fragmentu zdeformowanego kwadratu (zerowy poziom amplitudy przy koincydencji wysokiego poziomu jasności).

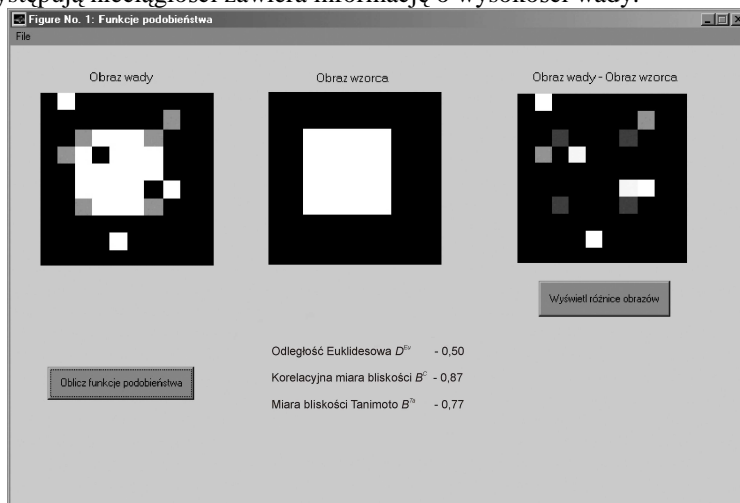
Uzyskane miary podobieństwa obrazów testowych z rys. 2 (wada) i b (wzorec) wyniosły: znormalizowana $D^{Eu} = 0,50$, $B^C = 0,87$, $B^{Ta} = 0,77$.

3. MIARY PODOBIENSTWA OBRAZÓW WAD ZŁĄCZY SPAWANYCH BADANYCH DEFEKTOSKOPOWO

3.1. Badania radiograficzne

Badania radiograficzne polegają na prześwietlaniu obiektów promieniowaniem rentgenowskim X, lub promieniowaniem γ oraz rejestracji cieniowych obrazów nieciągłości. W rezultacie otrzymuje się dwuwymiarowe obrazy trójwymiarowych nieciągłości i ich wymiary (długość i szerokość) w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku

rozchodzenia się promieniowania. Różnica zaczerpnienia radiogramów w miejscach, w których występują nieciągłości zawiera informację o wysokości wady.



Rys. 2. Okno aplikacji obliczeń miar podobieństwa obrazów wad

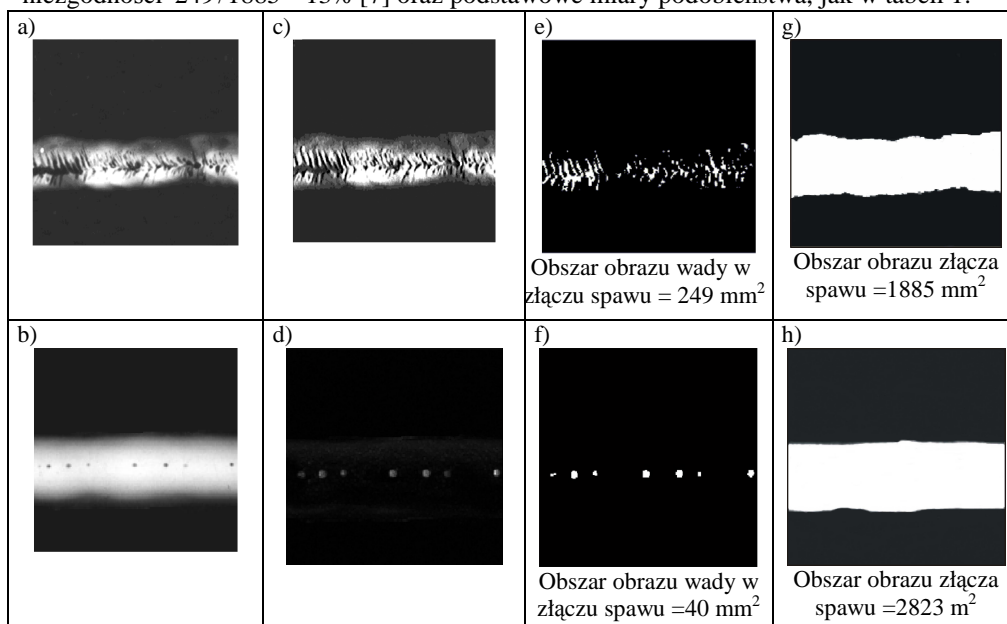
Nieciągłości materiałowe wypełnione są zwykle powietrzem lub materiałem o innej gęstości niż materiał obiektu. Podczas prześwietleń są miejscami, w których występuje osłabienie lub wzmocnienie (ciemne plamy - przechodzi więcej promieniowania, gdyż gęstość materiału wady jest mniejsza od materiału rodzimego, jasne plamy - osłabienie promieniowania, gdyż gęstość materiału wady jest większa od materiału rodzimego) promieniowania, co na zdjęciach daje charakterystyczne ciemniejsze lub jaśniejsze zabarwienie na zdjęciach rentgenowskich.

Do najważniejszych zadań oceniającego radiogram jest sprawdzenie, czy nie ma na nim wskazań niedopuszczalnych. Oceniający wybiera z atlasu niezgodności, dla każdego typu niezgodności stwierdzonych w badanym spawie, jeden radiogram wzorcowy, a następnie ocenia nasilenie tych niezgodności, np. powierzchnię.

Typowymi obiektami poddawanych badaniom radiograficznym, są złącza spawane. Występuje w nich szereg niezgodności spawalniczych, prezentowanych na obrazach radiograficznych. Szczególnie popularne to pustki gazowe (pęcherze) występują w spoinach w postaci: pojedynczych lub rozproszonych pęcherzy gazowych o kształcie zbliżonym do kuli, grup (gniazd pęcherzy) lub szeregów pęcherzy gazowych (łańcuchy pęcherzy) również o kształcie w przybliżeniu kulistym, pęcherzy podłużnych, których większy wymiar jest równoległy do osi spoiny, rurkowych pęcherzy kanalikowych, tworzących zazwyczaj układ jodełki.

Jako reprezentacyjne do przetwarzania ich obrazów wybrano pęcherze kanalikowe i łańcuch pęcherzy, rys. 3 [2]. Obrazem wyjściowym pęcherzy kanalikowych jest obraz z rys. 3a, w którym wzmocniono krawędzie gradientowym filtrem rzeźbiącym, rys. 3c, a następnie poddano binaryzacji z poziomem 60 i zanegowano, rys. 3e. Z kolei poprzez operację segmentacji wyodrębniono z całego obrazu obszar spoiny, rys. 3g. Korzystając z deskryptorów obszarowych, wyznaczono pola powierzchni obrazów wady i spoiny

(przyjęto jako wzorzec) a następnie wyznaczono udział procentowej powierzchni niezgodności $249/1885 \approx 13\%$ [7] oraz podstawowe miary podobieństwa, jak w tabeli 1.



Rys. 3. Algorytmy rekonstrukcji obrazów wad złączy spawanych badanych metodą radiograficzną: a) pęcherze kanalikowe, b) łańcuch pęcherzy, c) pęcherze z a) po gradientowym filtrze rzeźbiącym, d) obraz z a) po kolejnych filtracjach łańcuchem Freemana, maksymalnym i operacji punktowej \wedge^2 , e) obraz z c) po binaryzacji z progiem 60 i negacji, f) obraz z d) po binaryzacji z progiem 20, g) obszar złącza spawu z a), h) obszar złącza spawu z b)

Nieco zmieniony algorytm zastosowano do łańcucha pęcherzy z rys. 3b. Należało tu wydobyć punktowe obrazy pęcherzy, dlatego po filtracji łańcuchem Freemana, nieliniowym filtrze maksymalnym i punktowym wzmocnieniu \wedge^2 , rys. 3d, obraz zbinaryzowano z progiem 20, rys. 3f. Podobnie jak w poprzednim przypadku, wyznaczono procentową powierzchnię niezgodności oraz miary podobieństwa, tabela 1.

Należy zauważyć, że dla każdej z grup wad złączy spawanych należy zastosować inny algorytm rekonstrukcji, realizujący oczekiwania eksperymentatora i umożliwiający wyznaczenie ich parametrów.

3.2. Badania wiroprądowe

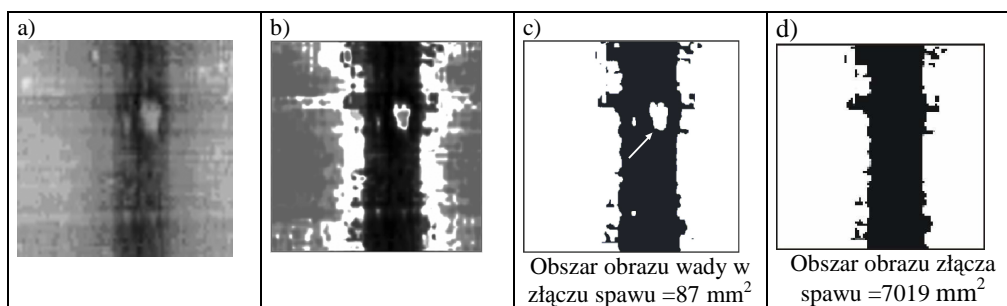
Badania wiroprądowe polegają na indukowaniu w badanych materiałach prądów przemiennych i detekcji zmian pól elektromagnetycznych, umożliwiając wykrywanie nieciągłości powierzchniowych lub leżących bardzo blisko powierzchni, a także zmian struktury materiału. Dlatego ograniczone są do materiałów przewodzących prąd elektryczny. Niewielka głębokość penetracji pola jest odwrotnie proporcjonalna do

częstotliwości prądu magnesującego, przenikalności magnetycznej i przewodności materiału. Dlatego badania wiroprądowe stanowią często uzupełnienie metod ultradźwiękowych w obszarach podpowierzchniowych i trudnodostępnych [6].

Analiza amplitudy i fazy przetwarzanych sygnałów z przetworników informuje o parametrach nieciągłości lub zmianach struktury materiału. W badaniach zautomatyzowanych przy skanowaniu powierzchni, uzyskuje się zobrazowanie badań w postaci obrazów 2-D (ECI- ang. *Eddy Current Image*), które poddawane są dalszemu przetwarzaniu [2], [9].

Jako przykłady do prezentacji algorytmów przetwarzania obrazów uzyskanych z badań wiroprądowych, posłuży spaw aluminiowy (rys. 4b) [8]. Celem będzie ekstrakcja charakterystycznych obszarów wady i ich ocena.

W algorytmie rekonstrukcji zastosowanym do wady złącza spawu z rys. 4a, wykorzystano operator różniczkowania statystycznego i binaryzację na poziomie 70. Dobre rezultaty uzyskuje się również dla tego przypadku, stosując algorytm bazujący na filtracji falkowej [8]. Po segmentacji wady oznaczonej strzałką, wyznaczono pole jej obszaru, rys. 4c i obliczono pozostałe parametry jak w tabeli 1, przyjmując za wzorzec obszar spawu z rys. 4d.



Rys. 4. Algorytm rekonstrukcji obrazu złącza spawu aluminiowego z badań wiroprądowych: a) obraz złącza spawu z wadą, b) obraz z a) po filtracji z wykorzystaniem operatora różniczkowania statystycznego, c) obraz z b) po binaryzacji dolnej z progiem 70, d) obraz obszaru złącza spawu bez wady

3. WNIOSKI

W przypadku licznych zbiorów obrazów wad, dokonuje się ich klasyfikacji na klasy w celu podjęcia decyzji diagnostycznej. Celem autorów było porównanie obrazów wad z wykorzystaniem różnych kryteriów – np. klasycznych przyjętych w obowiązujących normach badania spawów oraz miar podobieństwa, co jest oryginalną propozycją.

Zagadnienia te zilustrowano na przykładowych obrazach złączy spawanych, gdzie za reguły występuje duża wadliwość, dlatego badane są one różnymi metodami defektoskopowymi. Obrazy tych wad wymagają wstępnej rekonstrukcji w celu ekstrakcji obrazu uszkodzenia. Niezbędne są też wzorce tych obszarów.

Porównując wartości parametrów obrazów wad w złączach z badań radiograficznych, rys. 3, na podstawie tabeli 1 należy stwierdzić, że zarówno pęcherze kanalikowe, jak i łańcuch pęcherzy, ma zbliżone wartości miar podobieństwa (niewielka bliskość i znacząca

odległość – zróżnicowany kształt obrazów wad) przy około dziesięciokrotnej różnicy niezgodności ich powierzchni (wady o innej powierzchni).

Tab. 1. Porównanie miar podobieństwa i powierzchni niezgodności wad złączy spawanych

	Wada z rys. 3e – wzorzec z rys. 3g	Wada z rys. 3f – wzorzec z rys. 3h	Wada z rys. 4c – wzorzec z rys. 4d
Powierzchnia niezgodności wady w złączy spawanym [%]	13	1,4	1,24
Odległość Euklidesowa	0,94	0,99	0,17
Korelacyjne miara bliskości	0,34	0,12	0,98
Miara bliskości Tanimoto	0,10	0,01	0,97

Natomiast regularna wada w złączy aluminiowym, potwierdza zgodność obydwu kryteriów – niewielka niezgodność powierzchni, niewielka odległość i duża bliskość. Dlatego w ostatecznej ocenie, istotny jest kształt obrazu wady i wartość jasności jej pikseli, co uwzględniają miary odległości.

4. LITERATURA

- [1] Choraś R. S.: *Komputerowa wizja. Metody interpretacji i identyfikacji obiektów*. Akademska Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005.
- [2] Elshafiey I., Lalita Udpa L.: *A New Eddy Current Imaging System for Enhancement of Nondestructive Evaluation*. NDT.net, Vol. 9, 2004.
<http://www.ndt.net/article/mendt03/elshaf/elshaf.htm>
- [3] Kopiński J.: *Analiza wadliwości złączy spawanych na podstawie radiogramów*. Praca końcowa STUDIA PODYPLOMOWE „Nowoczesne materiały inżynierskie”. Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Lublin 2010.
- [4] Koronacki J., Ćwik J.: *Statystyczne systemy uczące się*. Akademska Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2008.
- [5] Krzyśko M., Wołyński W., Górecki T., Skorzybut M.: *Systemy uczące się*. WNT, Warszawa 2008.
- [6] Lewińska - Romicka A.: *Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii*. WNT, Warszawa 2001.
- [7] PN-EN 12517-1:2006 *Badania nieniszczące spoin. Część 1: Ocena złączy spawanych ze stali, niklu, tytanu i ich stopów na podstawie radiografii. Poziomy akceptacji*.
- [8] Postolache O., Ribeiro A.L., Ramos H.: *Weld Testing using Eddy Current Probes and Image Processing*. XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology, (438-442), Lisbon 2009.
- [9] Rao B. P. C., R. Baldev, Jayakumar T., Kalyanasundaram P., Arnold W.: *A New Approach for Restoration of Eddy Current Images*. Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 20, No 2, (61-72), 2001.

- [10] Stapor K.: *Automatyczna klasyfikacja obiektów*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005.