

Ryszard Sikora  
Tomasz Chady  
Bogdan Piekarczyk  
Tomasz Pietruszewicz

# Inteligentny system analizy radiogramów do oceny jakości złączy spawanych

Intelligent system for radiogram analysis for welds quality inspection

## Streszczenie

W pracy przedstawiono koncepcję systemu do inteligentnej oceny jakości połączeń spawanych dokonywanej na podstawie komputerowej analizy radiogramów. Opisano założenia projektu, sprzęt stosowany do jego realizacji oraz oprogramowanie stworzone na potrzeby omawianego zadania. Projekt przewiduje ograniczenie udziału człowieka w podejmowaniu decyzji do niezbędnego minimum. System ma za zadanie automatyzację procesu wydawania opinii i informowania o stanie badanych złączy na podstawie obowiązujących norm.

## Abstract

An intelligent system for radiogram analysis for welds quality inspection is presented in this paper. The conception of this project, hardware used in it and implemented software applications are described. The limitation of human influence in making decision about welds quality is the main aim of this project. The system is able to prepare an opinion about welds quality automatically taking into consideration existing European standards.

## Wstęp

W badaniach nieniszczących zapotrzebowanie na testowanie jakości połączeń spawanych jest istotne ze względu na wiele gałęzi przemysłu wykorzystujących metody spajania jako efektywny sposób wykonywania połączeń elementów o nieradko krytycznym znaczeniu w konstrukcji. Jakość połączeń ma zatem decydujący wpływ na właściwości użytkowe tych elementów po spawaniu. Opracowano wiele sposobów testowania jakości złączy spawanych, poczynając od najprostszego, polegającego na ocenie wizualnej, a kończąc na zaawansowanych technikach wykorzystujących takie metody jak ultradźwiękowa, penetracyjna, wiropładowa, magnetyczna, a także analizę zdjęć rentgenowskich badanego obszaru [1]. Najprostszą metodą

analizy radiogramu jest ocena dokonywana przez człowieka na podstawie wiedzy i doświadczenia w zakresie fizyki łączenia metali i powstających w nich defektów struktury. Projekt Inteligentny System Analizy Radiogramów (ISAR) jest realizowany w Katedrze Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Celem projektu jest stworzenie oprogramowania do automatycznego testowania radiogramów, wspomagającego i znacznie upraszczającego procedurę analizy złączy spawanych.

System ISAR obejmuje zarówno część sprzętową, stosowaną do wykonania zdjęcia rentgenowskiego, digitalizacji i archiwizacji obrazu zawierającego badane złącze, jak i część programową. Ta druga ma na celu poprawę jakości radiogramu przez eliminację zakłóceń i wyostrenie elementów znajdujących się w obszarze zainteresowania (ROI – *Region of Interest*), poprawę oceny jakości obrazu, rozpoznanie i kwalifikowanie ich do grup niezgodności spawalniczych [2÷5], scharakteryzowanie ich na podstawie cech, odniesienie tych cech do obowiązujących poziomów akceptacji oraz podjęcie decyzji co do jakości złącza.

Prof. dr inż. Ryszard Sikora, dr hab. inż. Tomasz Chady, mgr inż. Tomasz Pietruszewicz – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin, mgr inż. Bogdan Piekarczyk – Technic-Control, Szczecin.

W części programowej wykorzystano stosowane w przetwarzaniu obrazów algorytmy oceny i poprawy jakości zdjęcia rentgenowskiego, rozpoznawania defektów oraz metody podejmowania decyzji wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe pracujące na bazie danych zawierającej informacje dotyczące wad połączeń spawanych.

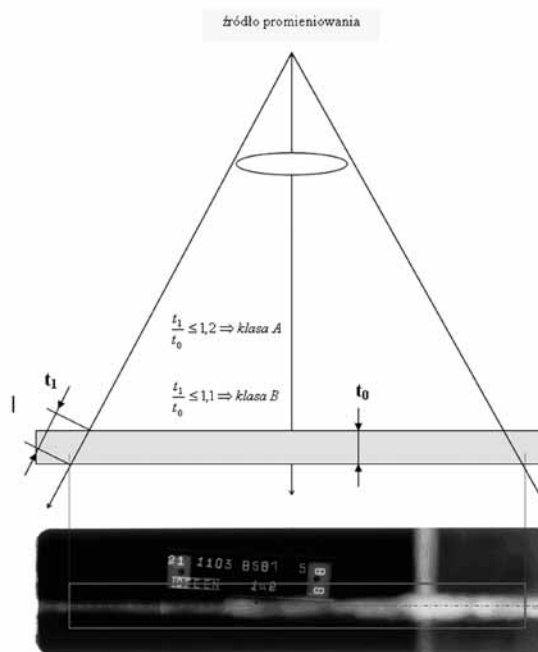
## Wykorzystanie radiogramów do oceny jakości złączy spawanych

Wśród metod oceny połączeń spawanych stosowana jest metoda polegająca na wykonaniu obrazu rentgenowskiego złącza oraz analizie radiogramu przez eksperta. Przeprowadzana analiza wymusza zgromadzenie informacji m.in. na temat najczęściej występujących niezgodności w złączach przy zastosowaniu danego rodzaju materiału i wykonywana jest zarówno pod kątem rodzaju występujących niezgodności spawalniczych – określanych przez cechy, takie jak kształt i rozmiar, jak i ich liczebność oraz rozmieszczenie w złączu.

Analiza wykonana z udziałem radiologa bazuje na doświadczeniu pozwalającym na szybkie wyodrębnienie z obrazu niezgodności i jej klasyfikację. W przypadku tworzenia systemu zautomatyzowanego niezbędne jest również uwzględnienie położenia niezgodności. Istotny jest wybór obszaru analizy radiogramu opisanego długością i szerokością. Obszar ten wyznaczany jest na podstawie informacji o strefie wpływu ciepła (SWC), klasie badania, grubości badanego obiektu, kącie rozwarcia wiązki promieniowania oraz szerokości łoża spoiny (rys. 1). Możliwe jest również wyznaczanie długości obszaru z dodatkowo przyjętymi uproszczeniami.

W celu ustalenia prawdopodobieństwa występowania poszczególnych rodzajów niezgodności spawalniczych wykonano statystyczne opracowanie archiwalnych radiogramów spółki Technic-Control. Zawarte w zbiorze obrazy zawierały niezgodności złączy spawanych występujących głównie w konstrukcjach okrętowych. Ich klasyfikacja pozwoliła na przypisanie poszczególnym niezgodnościom spawalniczym prawdopodobieństwa występowania w złączu. Przyporządkowane wartości zostały wykorzystane w systemie ISAR jako wytyczne do podejmowania bardziej trafnych decyzji dotyczących oceny jakości uzyskanych złączy i identyfikacji rodzaju niezgodności spawalniczych. Zidentyfikowane niezgodności podzielono na: pęcherze i pory (ok. 20%), żużle i wtrącenia stałe (ok. 33%), przyklejenia (ok. 42%), braki przetopu (ok. 5%), pęknięcia (ok. 15%), podtopienia i wady kształtu (ok. 6%) – niektóre radiogramy zawierały jednocześnie kilka typów niezgodności.

Przy tworzeniu systemu zwrócono również uwagę na sytuacje powodujące powstanie obrazu prawidłowego połączenia łudząco przypominającego niezgodność, które mogą być wyeliminowane na podstawie wiedzy i doświadczenia eksperta – konfiguracja systemu ISAR pozwala na identyfikację takich przypadków. Dodatkowo podczas analizy radiogramu uwzględniana



Rys. 1. Radiogram połączenia spawanego oraz sposób wyznaczenia długości obszaru oceny radiogramu

Fig. 1. Radiogram of weld and the method of radiogram inspection area determination

jest zastosowana technika spawania, której znajomość ułatwia automatyczną interpretację obrazu niezgodności przy podejmowaniu decyzji.

Kolejnym etapem oceny złącza, po określeniu rodzaju niezgodności, jest oszacowanie jej charakterystycznych wymiarów, porównanie ich do wymiarów granicznych określonych w normie oraz ustalenie na tej podstawie poziomu jakości złącza [3]. Analizując radiogramy, należy uwzględnić przede wszystkim dane dotyczące konkretnego obrazu złącza, takie jak: numer wzorca IQI (*Image Quality Indicator* – wskaźnik do oceny jakości radiogramów), grubość prześwietlana, technika badania, odległość źródło–obiekt, kąt wiązki promieniowania, wymagany poziom jakości złącza wg EN ISO 5817 [3], metoda spawania.

## Idea systemu inteligentnego

Zadaniem systemu ISAR jest automatyczna ocena jakości badanych złączy spawanych oraz identyfikacja niezgodności spawalniczych występujących w złączach, co pozwala również na ograniczenie roli lub eliminację pracy, w niektórych sytuacjach, doświadczonego eksperta w procesie oceny jakości połączeń. Tak wyznaczony cel wymusza duże wymagania stawiane wobec tworzonego oprogramowania.

Zastosowanie prostych metod cyfrowych do obróbki obrazu jest często obciążone błędami wynikającymi z działania programu. Dlatego w projekcie ISAR zastosowano nowoczesne algorytmy przetwarzania obrazów, zapewniające możliwość poprawy jakości

analizowanego radiogramu bez utraty istotnych informacji. Ponadto system musi spełniać wysokie kryteria typowania obiektów rozpoznawalnych dla oka ludzkiego. Wymaganiem wobec oprogramowania jest zdolność rozpoznania co najmniej tych wad, które może dostrzec radiolog. Rozdzielczość zdigitalizowanego obrazu musi zrekompensować utratę informacji o najmniejszych istotnych elementach na radiogramie, widocznych dla oka eksperta. Nowoczesne systemy skanujące oraz postęp technologii obliczeniowej umożliwiają stosowanie coraz wyższych rozdzielczości obrazów cyfrowych oraz analizę danych o dużej pamięci.

Istotnym celem projektu ISAR jest uzyskanie na tyle wysokiej trafności podejmowanych decyzji dotyczących oceny połączeń spawanych, aby na wielu etapach pracy możliwe było zastąpienie człowieka przez system zautomatyzowany. Jest zatem konieczne zminimalizowanie liczby błędnych decyzji powodowanych zarówno przez niedoskonałość systemu, jak i w wyniku digitalizacji obrazu. Stosowanie najnowszych rozwiązań informatycznych zarówno pod względem doboru sprzętu, jak i tworzenia spójnego i efektywnego oprogramowania, umożliwia osiągnięcie tego celu.

Zaletą systemu automatycznego rozpoznawania, klasyfikowania i oceny niezgodności spawalniczych jest możliwość wyeliminowania pomyłek spowodowanych czynnikiem ludzkim. Dodatkowo ISAR umożliwia szybkie i ciągłe podejmowanie decyzji co do jakości połączeń spawanych, wymagając przy tym jedynie obecności osoby przygotowanej do obsługi programu komputerowego. Informacje systemu czerpane z bazy niezgodności mogą zastąpić wymaganą wiedzę i doświadczenie radiologa. System może znaleźć zastosowanie wszędzie tam, gdzie istnieje zapotrzebowanie na szybką analizę wielu połączeń spawanych.

## Opis systemu

System ISAR składa się z części sprzętowej odpowiedzialnej za digitalizację radiogramu i wykonanie obliczeń oraz oprogramowania do przetwarzania obrazów, oceny i poprawy ich jakości, grupowania niezgodności i podejmowania decyzji z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych (rys. 2).

Urządzeniami wejściowymi są moduły umożliwiające wprowadzenie danych do systemu w postaci obrazu cyfrowego, tzn. skaner płyt i przetwornik rentgenowski pozwalający na digitalizację obrazu oraz obsługę interfejsu TWAIN. Komputer przetwarzający dane wyposażony jest w sześciordzeniowy procesor o częstotliwości taktowania 2,8 GHz, 24 GB pamięci DDR3 RAM oraz w kartę graficzną wspomaganą przez technologię CUDA, co daje możliwość równoległego przetwarzania danych. Akwizycja danych realizowana jest przez ustalony zestaw informacji niezbędnych do prawidłowej pracy systemu, takich jak: zastosowana rozdzielczość skanowania, rozmiar skanowanej płyty, format zapisu danych, intensywność promieniowania



Rys. 2. Część sprzętowa systemu ISAR  
Fig. 2. Hardware of ISAR system

lasera itp., które należy dostarczyć wraz z połączeniem spawanym przeznaczonym do testowania.

Część programowa zawiera algorytmy do poprawy jakości obrazów przez eliminację zakłóceń i wyostrenie niezgodności, wytypowanie obszaru spoiny, SWC oraz regionu zainteresowania (ROI), ocenę gęstości optycznej lub parametru SNR (*Signal to Noise Ratio* – stosunek sygnału do szumu), następnie kwalifikowanie zidentyfikowanych defektów do odpowiednich grup niezgodności spawalniczych [2÷5], wyznaczanie charakterystycznych cech niezgodności, porównywanie ich z wielkościami granicznymi wg obowiązujących norm i ocenę jakości złącza. Oprogramowanie zastosowane w systemie ISAR tworzone jest z wykorzystaniem środowiska Microsoft Visual C++. W skład programu obsługującego analizę radiogramu wchodzi również funkcje niezbędne do obsługi interfejsu użytkownika. Oprócz zautomatyzowanego przetwarzania danych oprogramowanie umożliwia użytkownikowi ingerencję w pracę systemu, w tym np. dobór filtra i jego parametrów, a także inne czynności niezbędne do pracy radiologa – np. dostępne w każdym etapie powiększanie wybranego fragmentu obrazu.

Wstępne przetwarzanie zapisanego w postaci cyfrowej radiogramu obejmuje m.in. filtrację oraz ocenę jakości zdjęcia. W skład używanej grupy filtrów wchodzi m.in. filtry Gaussa, Laplace'a, laplasjan Gaussa, operatory Sobela, Kirscha, Prewitta, pasmowoprzestawowa filtracja w dziedzinie częstotliwości, filtry



medianowe, operacje morfologiczne. Część z wymienionych funkcji oprócz poprawy jakości zdjęcia i eliminacji zakłóceń pozwala na wyostrenie wybranych elementów radiogramu. Istotny w tym zakresie jest dobór parametrów wywoływanych funkcji w zależności od zamierzonych efektów. Do niezbędnych algorytmów należy też zaliczyć funkcje dokonujące progowania i indeksacji obrazu oraz wykonujące obliczenia odległości pomiędzy poszczególnymi obiektami rozpoznanymi na radiogramie. Zaimplementowano funkcję obliczającą wartość współczynnika SNR zgodnie z normą [6]. Wykorzystane algorytmy są stosowane w programach do obróbki obrazów [7], pozwalając na wyodrębnienie oraz ocenę niezauważalnych wcześniej elementów [8].

W ramach oceny jakości obrazu stosowana jest także operacja lokalizacji obszaru występowania wzorca jednoprzecikowego na radiogramie oraz wyznaczania

widocznych przecików z uwzględnieniem wymagań zawartych w normie [9]. Po wstępnej obróbce zdjęcia następuje automatyczne rozpoznanie ROI, detekcja ciągłości oraz jej parametryzacja. Następująca później identyfikacja niezgodności może być realizowana z udziałem operatora systemu, zwłaszcza w przypadku niepewności przy automatycznym podejmowaniu decyzji.

Określenie jakości połączenia spawanego musi odbywać się przy uwzględnieniu specyfiki połączeń występujących w danej konstrukcji, gdyż poziomy jakości dla poszczególnych dziedzin przemysłu mogą się różnić (np. wymagania wobec połączeń wyposażenia statków i urządzeń poddozorowych) [1]. Praca systemu kończy się automatycznym bądź półautomatycznym wygenerowaniem raportu dotyczącego jakości analizowanego złącza.

## Podsumowanie

Zastosowanie zautomatyzowanych systemów informatycznych w obszarach prac dotychczas wykonywanych wyłącznie przez człowieka budzi wiele wątpliwości. Dzięki zastosowaniu nowoczesnej techniki komputerowej oraz możliwości oceny efektów pracy systemu i w szczególności porównania jej z dotychczas stosowanymi metodami istnieje szansa na ustalenie progu jego błędnych decyzji. ISAR stworzony jest i rozwijany z myślą o obniżeniu tego progu do minimum, tak aby ograniczenie roli lub w niektórych przypadkach zastąpienie radiologa było opłacalne. Wprowadzone dotychczas algorytmy przynoszą efekty na tyle korzystne, że istnieje realna szansa na rozpoznawanie wszystkich niezgodności, jakie może dostrzec człowiek, co stanowi wymagane minimum [10].

Realizacja projektu ISAR przewiduje stworzenie kompletnego systemu gotowego do przemysłowego

zastosowania. System podlega ciągłej rozbudowie przez wprowadzenie nowych algorytmów pozwalających na poprawę jakości analizowanego obrazu z jednoczesnym unikaniem efektów ubocznych polegających m.in. na rozmyciu elementów istotnych z punktu widzenia działania programu lub wyostreniu elementów zbędnych, np. artefaktów. Istniejące rozwiązania informatyczne są w tym bardzo pomocne.

System ISAR w zamierzeniach nie będzie całkowicie pozbawiony obsługi przez człowieka, jednak ma zagwarantować, że możliwa jest nieobecność eksperta kontrolującego pracę systemu pod względem merytorycznej decyzji. Jest to zatem istotny krok na drodze do całkowitego wyeliminowania udziału czynnika ludzkiego w omawianym zakresie badań nieniszczących i stworzenia systemu inteligentnego.

## Literatura

- [1] Lewińska-Romicka A.: Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii, WNT, Warszawa 2001.
- [2] PN-EN 12062:2000 Badania nieniszczące. Badania nieniszczące złączy spawanych. Zasady ogólne dotyczące metali.
- [3] PN-EN ISO 5817: 2009 Spawanie. Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązek). Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych.
- [4] PN-EN 1435:2001 Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania radiograficzne złączy spawanych.
- [5] PN-EN 12517-1:2008 Badania nieniszczące spoin. Cz. 1: Ocena złączy spawanych ze stali, niklu, tytanu i ich stopów na podstawie radiografii. Poziomy akceptacji.
- [6] PN-EN 14784-1:2007 Badania nieniszczące – Radiografia przemysłowa z użyciem pamięciowych luminoforowych płyt obrazowych – Część 1: Klasyfikacja systemów.
- [7] Russ J.C.: The Image Processing Handbook, Fourth Editio, CRC Press 2002.
- [8] Sikora R., Baniukiewicz P., Chady T., Ruciński W., Świadek K., Caryk M., Łopato P.: Comparison of selected weld defects extraction methods, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, 27/2008, 1034-1041.
- [9] PN-EN 462-1 Badania nieniszczące – Jakość obrazu radiogramów – Wskaźniki jakości obrazu (typu przecikowego). Liczbowe wyznaczanie jakości obrazu.
- [10] Sikora R., Chady T., Caryk M., Baniukiewicz P., Łopato P., Napierała L., Pietrusiewicz T.: Conception of Industrial System of Automatic Radiograms Analysis, ENDE 2010, P. 84, 13-16.06. 2010, Szczecin.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego MNiSW Inteligentny System Analizy Radiogramów nr N N510 535 339 (2009-2012).