

Marek Śliwowski*

NDTEST, Warszawa

Zwiększanie wiarygodności badania złączy spawanych rurociągów dla cyfrowych technik radiograficznych oraz ultradźwiękowych

Reliability increase of girth welds inspection in view of digital radiography and ultrasonic techniques

ABSTRACT

In validation procedures of equipment's, inspection systems as well as technically advanced digital inspection techniques (high-tech) a lot weight be attached to the repeatability and regeneration of testing result to be obtained. The performed results comparison aimed to reach increased reliability of testing by:

- detection and sizing of imperfections on reference blocks with implemented discontinuities (natural or prepared) of known localization and shape;
- finding repeatability (i.e. the identical or similar results detected on the same object by the same parameters of NDT technique applied);
- finding regeneration (i.e. the identical or similar results detected on the same object) obtained by: different inspection systems; different NDT methods/techniques; by digitization of analogue results to unify the comparisons;
- finding repeatability increasing by automatization/ mechanizing of testing process.

For illustration the digital and mechanized radiographic technique RTA (digital radiographs) and ultrasonic mechanized technique – UTA (digital sonogram TOFD+PE) are presented, as an example of girth welds inspection on pipelines DN 1000 and DN 800.

The comparison process was realized using analogue and digitized radiographs versus digital radiographs from DR system. The ultrasonic results of TOFD+PE technique be evaluated in respect of radiography or manual ultrasonic results.

It was pointed a complementary aspect of both volumetric methods (RTA and UTA) and its influence on the increasing reliability of inspection result.

Keywords: validation; reliability of inspection result; digital radiography; digital ultrasonic; automated inspection systems.

STRESZCZENIE

W procedurach walidacji urządzeń, systemów badawczych a także nowych zaawansowanych technicznie cyfrowych technik badawczych (high-tech) dużą wagę przykłada się do powtarzalności i odtwarzalności uzyskiwanego wyniku badania. Prowadzone są badania porównawcze polegające na uwiarygodnieniu wyniku badania:

- poprzez wykrywanie i wymiarowanie wad na próbkach referencyjnych z wadami sztucznymi lub naturalnymi o znanym położeniu i kształcie;
- powtarzalności wyniku (tzn. uzyskiwania podobnych lub identycznych wyników na tym samym obiekcie, z zachowaniem tych samych parametrów techniki NDT);
- odtwarzalności wyniku (tzn. uzyskiwania podobnych lub identycznych wyników na tym samym obiekcie) wykonywanych: różnymi systemami; różnymi metodami / technikami; poprzez digitalizację wyników analogowych dla ujednoczenia porównań;
- podwyższeniu powtarzalności wyniku przez automatyzację skanowania.

W celu ilustracji procesu uzyskiwania wyników cyfrowych (radiogramów w metodzie radiograficznej zautomatyzowanej - RTA oraz sonogramów w metodzie ultradźwiękowej zautomatyzowanej - UTA) przedstawiono przykładowe wyniki badań obwodowych złączy spawanych gazociągu DN 1000 oraz DN 800, gdzie wymagania kontraktowe narzucają poziom jakości złączy spawanych B lub wyższy wg PN-EN ISO 5817.

Dla celów porównań wykorzystano wyniki standardowych badań radiograficznych na błonach analogowych oraz radiogramy cyfrowe z digitalizacji tych radiogramów analogowych.

W aspekcie cyfrowych badań ultradźwiękowych referacie zwrócono uwagę w szczególności na porównania wyników uzyskiwanych techniką TOFD+PE w konfrontacji z wynikami badania radiograficznego i ręcznych badań ultradźwiękowych.

Zwrócono uwagę na ważny aspekt komplementarności wyników radiografii i ultradźwięków dla tego samego złącza i tym samym podwyższenia wiarygodności wyniku badania.

Słowa kluczowe: walidacja; wiarygodność wyniku badania; radiografia cyfrowa; ultradźwięki cyfrowe; systemy badań zautomatyzowanych

1. Wstęp

Przedmiotem działań walidacyjnych w kontekście podwyższenia wiarygodności wyniku badania są nowe techniki zmechanizowanego badania złączy spawanych:

- radiografii cyfrowej DR [1] (Direct Radiography), która wykorzystuje do zobrazowania bezpośredniego panele DDA (Digital Detector Arrays), dając cyfrowe

zobrazowanie w całej długości i objętości złącza spawanego;

- ultradźwięków cyfrowych TOFD+PE [2], która wykorzystuje kombinowaną technikę TOFD (dyfrakcyjna technika) oraz PE (klasyczna technika echa – uzupełniająca tzw. „strefy martwe” TOFD) i umożliwia cyfrowe zobrazowanie oraz cyfrowy zapis pełnych wyników badania w całej długości i objętości złącza spawanego.

*Autor korespondencyjny. E-mail: m.sliwowski@ndtest.com.pl

Istotnym argumentem wdrożenia technik cyfrowej radiografii i ultradźwięków na terytorium Polski, w szczególności w przemyśle gazowniczym, jest nowe wydanie normy PN-EN 12732 [3], w której wprowadzono jako preferowane nowe wydania norm europejskich EN ISO, w tym stosowanie normy radiograficznych technik cyfrowych wg - PN-EN ISO 17636-2 [5] oraz norm ultradźwiękowego badania złączy spawanych cyfrową techniką TOFD - PN-EN ISO 10863 [6] oraz techniką PE - PN-EN ISO 17640 [7], zaś kryteria akceptacji przygotowywane są w oparciu o dokumentację projektowo-odbiorczą i dostosowane do nowych technik cyfrowych.

Istotnym elementem badań zautomatyzowanych jest ciągła weryfikacja nastaw systemów zmechanizowanych na próbkach odniesienia (zakres i czułość badania).

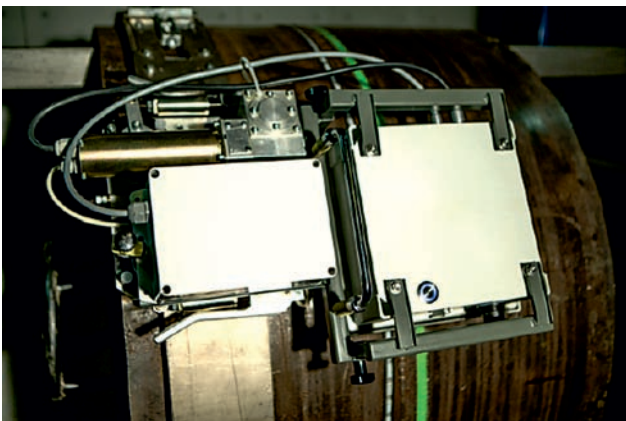
W celu ilustracji procesu uzyskiwania wyników cyfrowych (radiogramów w metodzie radiograficznej RTA oraz sonogramów w metodzie ultradźwiękowej UTA) przedstawiono przykładowe wyniki badań obwodowych złączy spawanych gazociągu DN 1000 [1] oraz DN 800 [2], gdzie wymagania kontraktowe narzucają poziom jakości złączy spawanych B lub wyższy wg PN-EN ISO 5817 [8].

Zwrócono uwagę na wzrost wiarygodności wyników badania wynikających z cyfrowego zapisu i automatyzacji skanowania.

2. Wyposażenie do badań RTA

Zmechanizowany system radiografii cyfrowej – system XPRESS Scan - 3Endt

System został zbudowany z przeznaczeniem do wykonywania połowych badań radiograficznych złączy spawanych na rurociągach o średnicach ϕ 400 ÷ 1420 mm, podczas ich budowy i napraw. Ogólny widok skanera wraz z detektorem przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1. Ogólny widok skanera wraz z detektorem DR prowadzonego na taśmie Crossa podczas badania złączy obwodowych.
Fig. 1. General view of radiographic scanner with DR detector guided on Cross band during testing of girth welds.

Zasadnicze elementy systemu radiografii cyfrowej przedstawiono na Rys. 2. Zapewniają one wykonywanie badań radiograficznych z rejestracją i zobrazowaniem cyfrowym radiogramu na płaskim detektorze krzemowym do zobrazowań bezpośrednich - DR.

Przedstawiony system mobilnej radiografii cyfrowej oznacza

zasadniczą zmianę procesu badania złączy poprzez:

- łatwość operacji - małe rozmiary i waga skanera - 4 kg;
- komunikacja sterowania i akwizycji danych w systemie bezprzewodowym (wi-fi);
- zmniejszenie kosztów badania eliminując stosowanie:
 - błon analogowych;
 - ich obróbki chemicznej;
 - automatów do obróbki filmów;
 - archiwizacji analogowych filmów;
- zwiększenie ochrony środowiska po wyeliminowanie obróbki chemicznej radiogramów;
- otrzymanie wyniku w czasie rzeczywistym badania;
- możliwość wykonywania pełnego badania 6 ÷ 10 złączy spawanych liniowych na godzinę, w zależności od grubości ścianki;
- systemu zasilania z akumulatorów, który pozwala na ciągłą pracę z możliwością wymiany i szybkiego ładowania zapasowych akumulatorów;
- możliwość korekty na bieżąco parametrów spawania dla eliminacji błędów i wad;
- łatwą i intuicyjną obróbkę obrazu cyfrowego przy pomocy oprogramowania XVu;
- możliwość precyzyjnej oceny wskazań obrazu radiograficznego (zoom, optymalizacja kontrastu, polepszenie zobrazowania);
- łatwe przygotowanie dokumentacji badania przy cyfrowym zapisie wyniku.



Rys. 2. Ogólny widok mobilnego systemu radiografii cyfrowej XPRESS Scan – 3Endt (skanera wraz z detektorem DDA) do badania złączy obwodowych rurociągów.

Fig. 2. Schematic diagram of mobile radiographic digital system XPRESS Scan – 3Endt (scanner with DDA detector) dedicated for girth welds inspection of pipelines.

System zapewnia uzyskiwanie wymaganej klasy badania, określonych dla cyfrowych technik radiograficznych wg normy PN-EN ISO 17636-2:

- klasa A: techniki podstawowe;
- klasa B: techniki ulepszone;

co zostanie potwierdzone w badaniach walidacyjnych.

3. Wyposażenie do badań systemu UTA

Skaner (TOFD+PE) do badań zmechanizowanych ultradźwiękowych

Przy badaniu zmechanizowanym złączy techniką TOFD+PE głowice ultradźwiękowe (nadawcza i odbiorcza lub nadawczo-odbiorcza) muszą być prowadzone równolegle do spoiny w ustalonej odległości od siebie oraz środka spoiny.

Rama skanera zamontowana jest na wózku napędzanym silnikiem elektrycznym i prowadzona precyzyjnie względem

osi spoiny przy wykorzystaniu taśmy prowadzącej Crossa (por. Rys. 3).

Główce ultradźwiękowe montowane są do ramy skanera za pośrednictwem specjalnych wahliwych uchwytów zapewniających dokładne przyleganie głowic do powierzchni rury w czasie ruchu skanera. Konstrukcja ramy umożliwia regulację ustawienia głowic ultradźwiękowych względem siebie oraz względem osi spoiny (por. Rys. 4).



Rys. 3. Zmechanizowany system TOFD +PE z układem prowadzenia na taśmie Crossa.

Fig. 3. Mechanical scanner and guiding layout on the Cross band.



Rys. 4. Układ głowic skanera względem osi spoiny.

Fig. 4. The scanner probe layout versus weld axis.

Ważną funkcją skanera jest dostarczanie do jednostki centralnej informacji o położeniu głowic skanujących na obwodzie spoiny. Do odmierzania przesuwu skanera wzdłuż spoiny służy cyfrowy enkoder położenia, którego impulsy generowane są wskutek obrotu koła przylegającego do powierzchni rury.

Do skanera doprowadzony jest specjalnie zabezpieczony kabel zbiorczy, wewnątrz którego znajdują się przewody

sygnałowe głowic, kabel enkodera, kabel zasilający silnik, oraz przewód doprowadzający wodę. Skaner może poruszać się po obwodzie rury w obu kierunkach z prędkością regulowaną płynnie w zakresie od 0 do 2 metrów na minutę.

Sterowanie ruchem skanera odbywa się za pomocą sterownika umieszczonego w samochodzie terenowym i obsługiwane przez operatora systemu.

4. Nastawianie i kontrola czułości badania

Czułość badania jest podstawowym parametrem nastaw w badaniu NDT, który decyduje o poziomie wykrywalności wskazań a tym samym potwierdzeniu, że przeszukanie wyznaczonej zakresem objętości badania zostało wykonane zgodnie z wymaganiami. Dlatego też parametr ten podlega ciągłemu monitorowaniu w procesie badania.

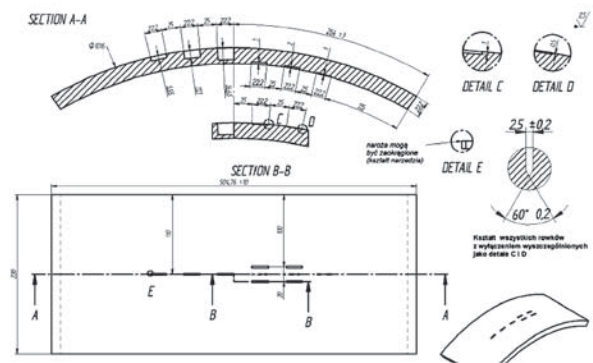
4.1 Badanie ultradźwiękowe cyfrowe –TOFD + PE

W badaniu TOFD+PE nastawianie i kontrola czułości badania zależy od przyjętej/narzuconej klasy badania. Poczynając od podwyższonych klas B, C, D wg PN-EN ISO 10863 wymagane jest przygotowanie specjalizowanych próbek odniesienia, dostosowanych do badanej grubości i geometrii obiektu (por. Rys. 5).

Wzorce kalibracyjne i próbki odniesienia

W badaniu TOFD do oceny wielkości wady wykorzystywana jest informacja o czasie przejścia rejestrowanych impulsów ultradźwiękowych a nie ich amplituda. Stąd też dokładna kalibracja czułości badania systemu TOFD nie jest wymagana. Wzmocnienie to powinno być jednak dostatecznie duże aby zapewnić wykrycie wszystkich impulsów pochodzących od wad nie powodując przy tym nadmiernego wzrostu poziomu szumów.

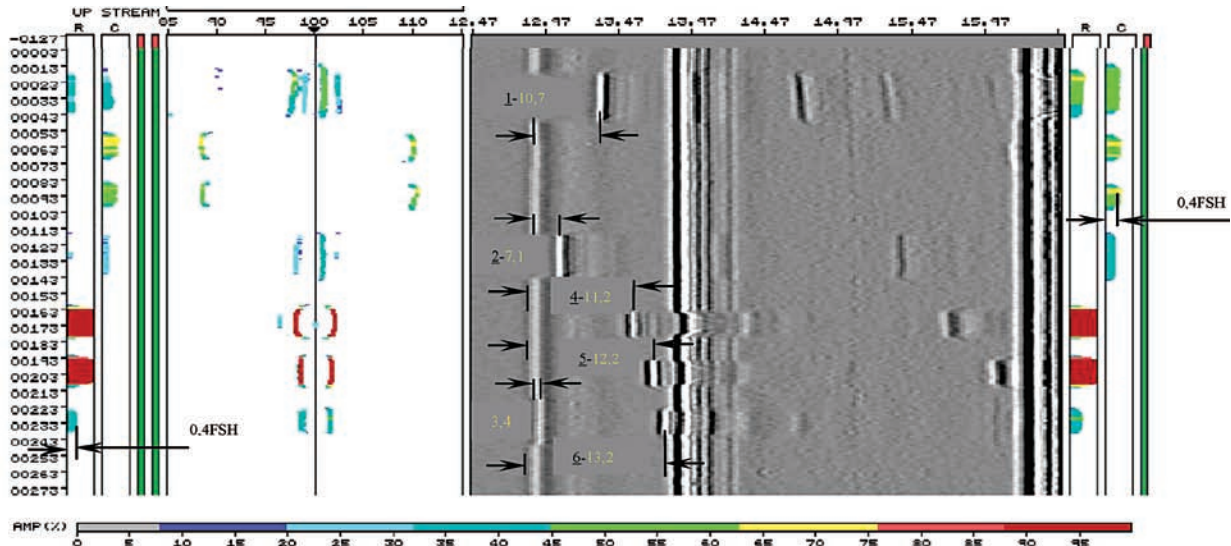
Wzmocnienie dla głowic pracujących w technice echa PE ustawiać należy na nacięciach o głębokości odpowiadającej wielkości rejestrowanych wad.



Rys. 5. Próbka odniesienia do nastaw i kontroli czułości badania systemu ultradźwiękowego TOFD+PE dla DN 1000.

Fig. 5. The reference block for sensitivity setting and checking of ultrasonic system TOFD+PE for pipeline DN 1000.

Do weryfikacji nastawy czułości systemu ultradźwiękowego, wykorzystywana będzie specjalna próbka odniesienia (por. Rys. 5), w postaci wycinka rury o badanej grubości t średnicy DN z nacięciami na powierzchni zewnętrznej o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, $t/4$, $2t/4$ oraz $3t/4$ mm a także



Rys. 6. Skan kontrolny na próbce odniesienia wykonany skanerem TOFD+PE na spoinie DN 1000 x 14,2 mm.
Fig. 6. The control scan of reference block done by TOFD+PE scanner on the weld DN 1000 x 14,2 mm.

z reflektorami na powierzchni wewnętrznej - nacięcia o głębokościach 1 mm, 2 mm oraz 3 mm, zgodnie z zaleceniami PN-EN ISO 10863, zał. A oraz wymaganiami kontraktowymi.

Weryfikacja wykrywalności i nastawa czułości na próbce odniesienia

Na Rys. 6 pokazano wykrywalność reflektorów zaimplementowanych w próbce odniesienia pokazanej na Rys. 5. Stwierdzono, że na sonogramie kontrolnym uzyskano wskazania od wszystkich dyfraktorów na głowicach TOFD, przy czym dokładność wymiarowania tej techniki ($\pm 0,1$ mm) pozwala na precyzyjne wymiarowanie położenia i rozmiarów wad (dyfraktor: $\underline{1} - h_1 = 10,7$ mm; $\underline{2} - h_2 = 7,1$ mm; $\underline{3} - h_3 = 3,4$ mm; $\underline{4} - t_4 = 11,2$ mm, $h_4 = 3,0$ mm; $\underline{5} - t_5 = 12,2$ mm, $h_5 = 2,0$ mm; $\underline{6} - t_6 = 13,2$ mm, $h_6 = 1,0$ mm).

Jednocześnie na paskach R i C, po obydwu stronach sonogramu, przedstawione są cyfrowe wskazania głowic pracujących w technice echa - PE (R - reprezentują maksymalną amplitudę i czas przejścia głowic „patrzących” na strefę przetopu na długości spoiny; C - reprezentują maksymalną amplitudę i czas przejścia głowic „patrzących” na strefę lica na długości spoiny).

Kalibracja głowic R - przetop, odbywa się na nacięciu $\underline{6} - h_6 = 1,0$ mm, przez ustawienie amplitudy na poziomie 40% FSH w bramce echa przetopu; natomiast kalibracja głowic C - lico, odbywa się na nacięciach $\underline{8}$ powierzchni zewnętrznej - $h_8 = 0,5$ mm, przez ustawienie amplitudy na poziomie 40% FSH w bramce echa na początku lica).

Weryfikacja wykrywalności i nastaw czułości odbywa się systematycznie w czasie procesu badania i jest dokumentowana datowanym sonogramem kalibracyjnym co każde $10 \div 20$ złączy (por. Rys. 6).

4.2 Badanie radiograficzne cyfrowe - radiografia DR na detektorze płaskim DDA

Dotrzymanie wymaganej czułości badania, w przypadku radiografii analogowej, wymaga zapewnienia klasy

radiogramu wg normy PN-EN ISO 17636-1 [4] poprzez uzyskiwanie wymaganej wykrywalności wskaźnikowej $IQI_{standard,r} = W_{IQI,r}$. Drugim podstawowym parametrem, mającym na celu uzyskanie wystarczającej czułości kontrastowej radiogramu analogowego, jest zapewnienie minimalnej gęstości optycznej $D_{min,r}$.

Analogicznie dotrzymanie wymaganej klasy radiogramu cyfrowego wg PN-EN ISO 17636-2 [5] uzyskiwane jest przez zapewnienie wykrywalności wskaźnikowej $IQI_{standard,r} = W_{IQI,r}$.

Dla radiogramów cyfrowych złączy spawanych norma PN-EN ISO 17636-2 określa dodatkowo wymaganą rozdzielczość przestrzenną $SR_{b,r}$, którą wyznacza się ze zobrażenia na radiogramie wskaźnika IQI - podwójny pręcik (tzw. duplex - wykorzystywany do określania nieostrości geometrycznej obrazu).

Odpowiednikiem parametru, mającym na celu uzyskanie wystarczającej czułości kontrastowej radiogramu cyfrowego, jest zapewnienie minimalnej wartości znormalizowanego stosunku sygnału do szumu oznaczanego symbolem $SNR_{n,min}$, który jest powiązany z rozdzielczością przestrzenną SR_b zależnością:

$$SNR_n = SNR \times \frac{88,6 \mu m}{SR_b}$$

gdzie:

SNR_n - znormalizowany stosunek sygnał-szum;

SNR - mierzony na radiogramie cyfrowym stosunek sygnał-szum

SR_b - podstawowa rozdzielczość przestrzenna detektora cyfrowego.

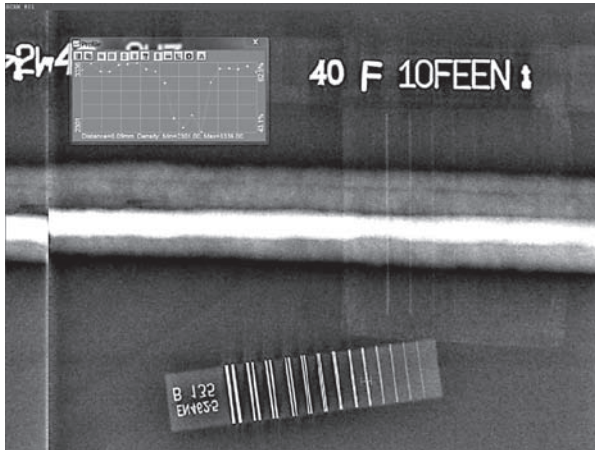
Weryfikacja wykrywalności wskaźnikowej i czułości kontrastowej radiografii DR

Ocena wykrywalności wskaźnikowej

Dostrzegalność nieciągłości należy potwierdzić przez stosowanie wskaźników jakości obrazu IQI oraz dodatkowo

wskaźnik IQI - duplex w przypadku radiografii cyfrowej (por. Rys. 7 - obraz prześwietlenia złącza DN 1000 mm, grubość ścianki $d = 14,2$ mm).

Na radiogramach analogowych oraz cyfrowych przy ekspozycjach lampą rentgenowską w większości przypadków uzyskiwano taką samą wykrywalność wskaźnikową IQI (po zabiegach polepszenia cyfrowego zobrazowania) – $W_{IQI} = w15 = 0,125$ mm - wymaganie dla klasy B wg normy PN-EN ISO 17636-2 narzuca wykrywalność $W_{IQI,r} = w13 = 0,20$ mm.



Rys. 7. Widok wskaźników jakości obrazu IQI (standard i duplex) na kontrolnym radiogramie uzyskanym systemem XPRESS Scan – $IQI_{standard} = w15$, $IQI_{duplex} = D9$.

Fig. 7. View of wire quality indicators IQI (standard i duplex) on control digital radiograph recorded by XPRESS Scan system – $IQI_{standard} = w15$, $IQI_{duplex} = D9$.

Dla radiogramów cyfrowych złączy spawanych określa się dodatkowo rozdzielczość przestrzenną SR_b , stosując obróbkę cyfrową radiogramu referencyjnego a także wyznaczanie profilu liniowego wskaźnika IQI_{duplex} , z którego odczytuje się nr pierwszej nierozdzielonej pary pręcików (por. Rys. 7).

Na kontrolnym radiogramie cyfrowym przy ekspozycji lampą rentgenowską uzyskiwano wykrywalność wskaźnikową duplexową – $IQI_{duplex} = D9 = 0,26$ mm, podczas gdy wymaganie dla klasy B wg normy PN-EN ISO 17636-2 narzuca, dla prześwietlanej grubości ścianki rury – wykrywalność nieostrości $IQI_{duplex,r} = D10 = 0,20$ mm).

Zatem zachodzi tu przypadek, że osiągnięcie wymaganej nieostrości – wyrażonej wykrywalnością duplexową jest utrudnione dla stosowanej techniki cyfrowej DR. W takim przypadku norma PN-EN ISO 17636-2 przewiduje tzw. drugą zasadę kompensacji CP II i w celu wyrównania tego braku można wykorzystać podwyższoną wartość SNRn. Podwyższony SNR musi umożliwić uwidocznienie jednego dodatkowego pręcika wskaźnika $IQI_{standard} = W_{IQI}$ dla każdej brakującej pary pręcików wskaźnika typu IQI_{duplex} .

Oznacza to, że wymagana rozdzielczość duplexowa $SR_{b,r}$ może w tym przypadku być zredukowana do wartości:

$$SR_{b,r} = 0,5 IQI_{duplex,r} = 0,5 D9,$$

ponieważ wykrywalność pręcikowa $IQI_{standard}$ (por. Rys. 6) jest lepsza o co najmniej 1 wartość pręcika od wymaganej.

Ocena czułości kontrastowej poprzez zapewnienie

$SNR_{n,min}$

Podstawową regułą przy stosowaniu zasady kompensacji jest utrzymanie odpowiednio wysokiej wartości znormalizowanego stosunku sygnału do szumu $SNR_{n,min}$. Wartość tego ilorazu jest miarą czułości kontrastowej radiogramu cyfrowego. Jeśli pomierzony SNR dla danej cyfrowej techniki radiograficznej po prawej stronie równania, nie spełnia założonych wymagań narzuconych przez normę, można to skompensować przez odpowiednią kompensację (zmniejszenie) wymaganej rozdzielczości przestrzennej $SR_{b,r}$.

Na kontrolnym radiogramie cyfrowym przy ekspozycji lampą rentgenowską uzyskiwano średnią rozdzielczość przestrzenną:

$$SR_b = 0,5 D9 = 130 \mu m$$

i pozwoliło to wyznaczyć – znormalizowany stosunek sygnał-szum:

$$SNR_n = 158 \text{ (pomierzony w SWC w pobliżu wskaźnika IQI)}$$

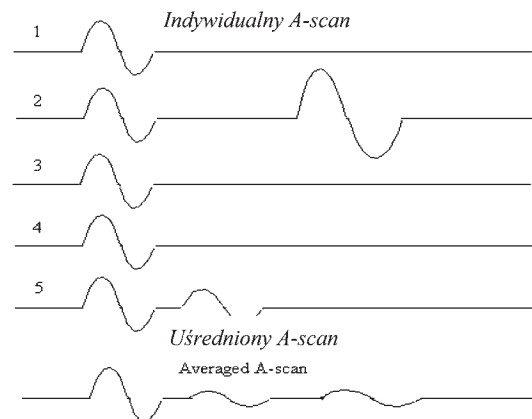
przy zalecanym normą PN-EN ISO 17636-2

$$SNR_{n,min} = 140.$$

5. Obróbka akwizycyjna sygnału cyfrowego – uśrednianie, podwyższanie SNR

Sygnały dyfrakcyjne TOFD zbierane z wierzchołków pęknięcia są bardzo słabe i wymagają dużych poziomów wzmocnienia i przez to często są słabo rozróżnialne w poziomie szumów.

Większość szumów jest generowana przez cyfrowe systemy NDT (zarówno ultradźwiękowe jak też radiograficzne) w postaci losowo rozłożonych sygnałów elektrycznych. Ten rodzaj szumów może być łatwo zredukowany przez uśrednianie sygnału i dotyczy każdej sekwencji sygnałów cyfrowych w badaniu NDT.



Rys. 8. Zasada uśredniania sygnałów na przykładzie TOFD.
Fig. 8. Principle of digital signal averaging by TOFD system.

Uśrednianie sygnału jest to operacja polegająca na n -krotnej akwizycji przebiegu amplitudowo- czasowego (A-scan) dla tego samego odcinka czasowego. Uśrednianie zwiększa SNR poprzez redukcję losowego szumu:

$$SNR_{uśredniony} = n^{0,5} SNR_{losowy}$$

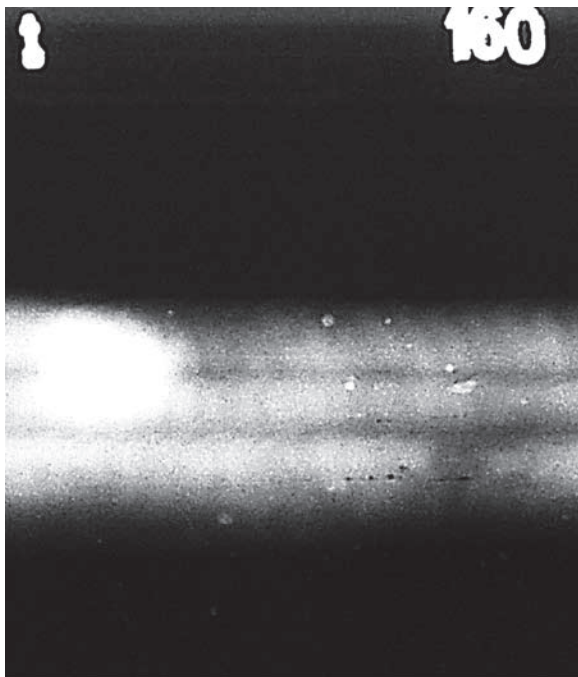
Jeśli n A-scanów, generowanych w danym przekroju obiektu, zostanie dodanych do siebie i wypadkowa suma zostanie podzielona N , wówczas SNR rzeczywistego sygnału wzrasta w stosunku \sqrt{n} . Funkcja uśredniania redukuje prędkość akwizycji danych.

Na Rys. 8 pokazano 5 rejestrowanych kolejno w danym miejscu A-scanów, gdzie sygnał rzeczywisty zachowuje swoje położenie i wielkość, natomiast sygnały szumów ujawniają swój przypadkowy rozkład i wielkość w sekwencji kolejnych zapisów. Na dolnym wykresie przedstawiono A-scan, na którym uśredniony sygnał rzeczywisty zachowuje swoje położenie i wielkość natomiast uśrednione losowe sygnały szumu zostały zredukowane w stosunku $\sqrt{5}$.

6. Badania walidacyjne złączy spawanych systemem radiografii analogowej i cyfrowej

W ramach procesu walidacji techniki cyfrowej DR zbadano problem odtwarzalności wyniku (tzn. uzyskiwania podobnych lub identycznych wyników na tym samym obiekcie) uzyskiwanego:

- tą samą metodą radiograficzną, ale różnymi systemami: z jednej strony system radiografii błonowej, z drugiej system radiografii cyfrowej;
- poprzez cyfrową akwizycję końcowego wyniku różnymi technikami: z jednej strony digitalizacja radiogramu analogowego, z drugiej bezpośredni zapis radiogramu na płaskim detektorze scyntylicyjnym.

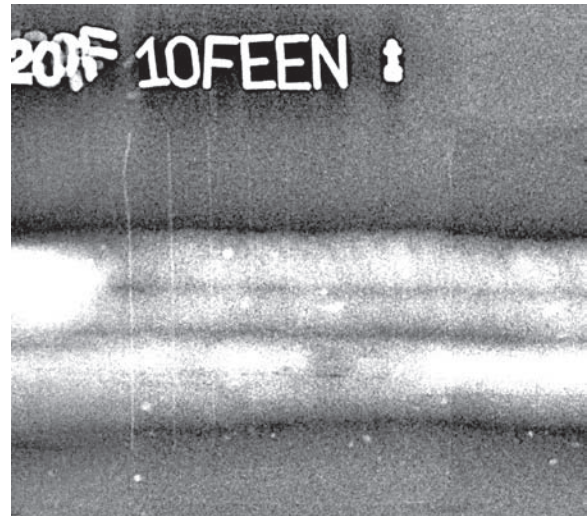


Rys. 9. Digitalizowany radiogram analogowy spoiny W1 – widoczne wskazania przyklejenia + pęcherze (4012 + 2011) $x_1 = 158,5 \div 160$ cm.
Fig. 9. Digitalized analogue radiograph of W1 weld – the LOF+pores indication is visible (4012 + 2011) $x_1 = 158,5 \div 160$ cm.

6.1 Wyniki badania radiograficznego - przykładowe złącza z budowy DN1000

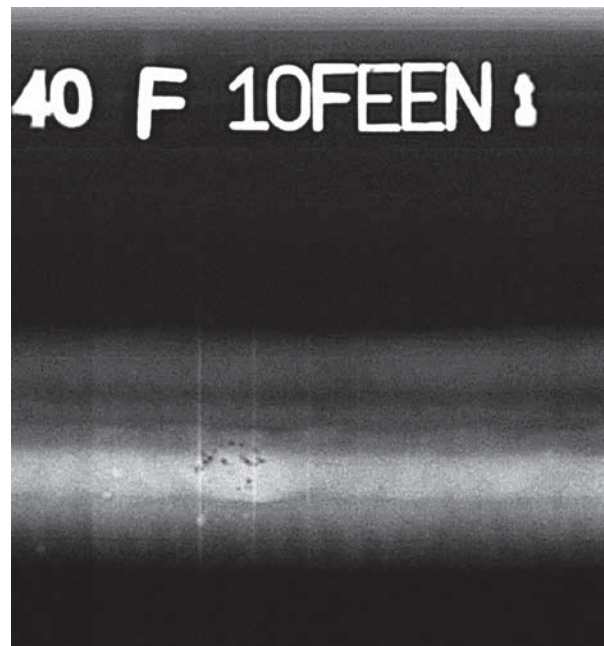
Przedstawiono bardzo spektakularne porównanie przedstawiono dla lokalizacji przyklejenia, które na ogół jest dosyć

trudno wykrywalne metodami radiograficznymi. W obydwu przypadkach (por. Rys. 9 i 10) wskazanie daje dosyć słaby kontrast, ale jest ono wykrywalne.



Rys. 10. Radiogram cyfrowy spoiny W1 – potwierdzone wskazania przyklejenia + pęcherze (4012 + 2011) $x_1 = 123,5 \div 125$ cm (0 taśmy rdg zostało przesunięte o $\Delta x = -35$ cm).

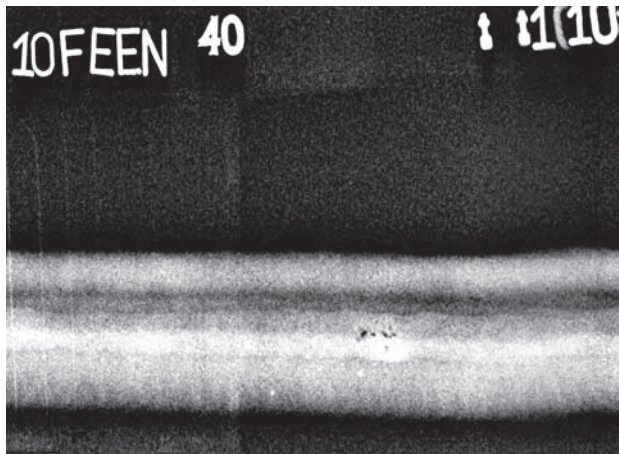
Fig. 10. Digital radiograph of W1 weld – the LOF + pores indication is confirmed (4012 + 2011) $x_1 = 123,5 \div 125$ cm (0 of radiographic meter is moved by $\Delta x = -35$ cm).



Rys. 11. Digitalizowany radiogram analogowy spoiny W2 – widoczne wskazanie pęcherzy gniazda i kanalików (2013 + 2016) $x_1 = 41,5 \div 42,5$ cm.

Fig. 11. Digitized analogue radiograph of W2 weld – the cluster + warm holes is visible (2013 + 2016) $x_1 = 41,5 \div 42,5$ cm.

Na Rys. 11 oraz 12 porównano zobrazowanie gniazda pęcherzy oraz pęcherzy kanalikowych uzyskane techniką radiografii analogowej i cyfrowej – zgodność obrazu wad i ich rozmiarów doskonała. Przy lokalizacji należy uwzględnić przesunięcie „0” metra radiograficznego na radiogramach cyfrowych o wartość $\Delta x = +1$ cm, podczas skanowania złącza W2 techniką DR

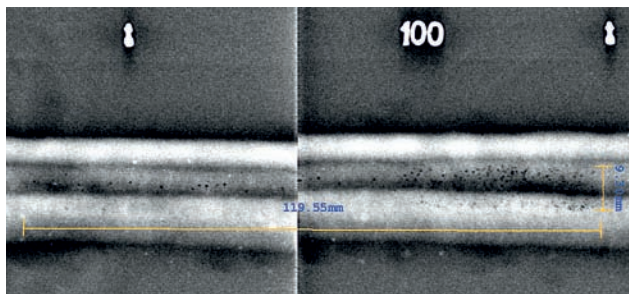


Rys. 12. Radiogram cyfrowy spoiny W2 - potwierdzone wskazanie gniazda pęcherzy i pęcherzy kanalikowych (2013 + 2016) $x_1 = 42,5 \div 43,5$ cm (0 taśmy - $\Delta x = +1$ cm).

Fig. 12. Digital radiograph of W2 weld – the cluster + warm holes is confirmed (2013 + 2016) $x_1 = 42,5 \div 43,5$ cm (0 of RT. meter is moved by $\Delta x = +1$ cm).

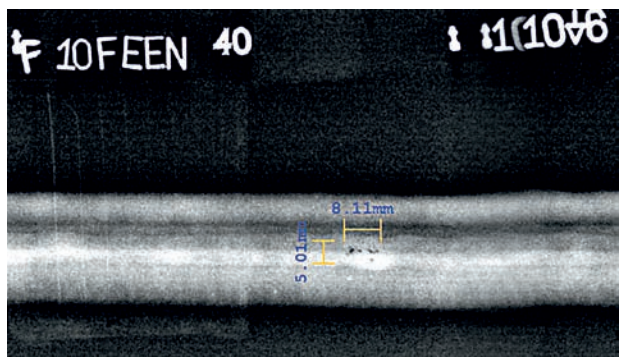
6.2 Ocena możliwości obróbki cyfrowej: lokalizacja i wymiarowanie wskazań

W tym punkcie podano przykłady ulepszonego zobrazowania cyfrowych radiogramów złączy spawanych, uzyskiwanych zarówno systemem cyfrowym DR, jak też analogowych po procesie digitalizacji z dobrą rozdzielczością.



Rys. 13. Radiogram cyfrowy spoiny W1. Przykład wymiarowania gniazda pęcherzy (2013).

Fig. 13. Digital radiograph of W1 weld. An example of cluster porosity (2013) dimensioning.



Rys. 14. Radiogram cyfrowy spoiny W2. Przykład wymiarowania gniazda pęcherzy (2013).

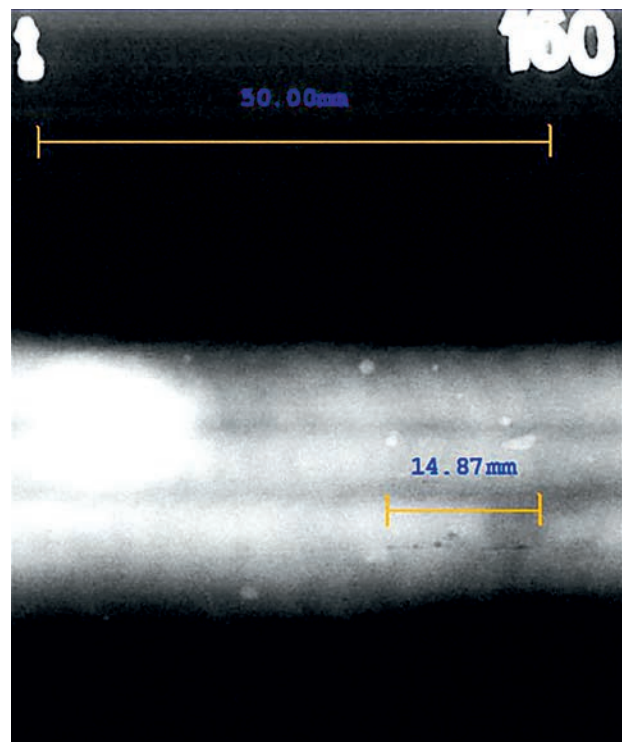
Fig. 14. Digital radiograph of W2 weld. An example of cluster porosity (2013) dimensioning.

Na Rys. 13 i 14 przedstawiono przykłady wymiarowania ulepszonego zobrazowania cyfrowego spoiny W1 oraz W2

(podwyższona czułość kontrastowa), które pozwala precyzyjnie określić rozmiary wad (gniazda pęcherzy) z wykorzystaniem oprogramowania systemowego XVu do obróbki cyfrowych obrazowań radiograficznych

Proces digitalizacji radiogramów analogowych powinien odbywać się z rozdzielczością zapewniającą klasę DB (wymagania kontraktowe DN 1000) wg normy PN-EN ISO 14096-2 [9] i jest ona odpowiednikiem klasy B wg normy PN-EN ISO 17636-1 dla radiogramów analogowych. Wszystkie radiogramy, digitalizowane w scannerze MII-900 plus firmy Microtek, prezentowane w tym opracowaniu osiągają wymaganą klasę DB co w świetle wymagań normy PN-EN ISO 14096-2 objawia się jako niewielkie pogorszenie jakości w stosunku do oryginalnych radiogramów analogowych (wykrywalność wskaźnikowa radiogramów digitalizowanych - $W_{IQI} = w14 = 0,16$ mm; oryginalnych analogowych - $W_{IQI} = W15 = 0,125$ mm).

Wymaganie dla klasy B wg norm PN-EN ISO 17636-1, -2 narzuca, dla prześwietlanej grubości ścianki $t = 14,2$ mm rury DN 1000 - wykrywalność $W_{IQI,r} = W13 = 0,20$ mm, co oznacza spełnienie warunków digitalizacji.



Rys. 15. Radiogram analogowy zdigitalizowany spoiny W1. Przykład kalibracji kursora liniowego i wymiarowania przyklejenia (4012).

Fig. 15. Digitalized analogue radiograph of W1 weld. An example of linear cursor calibration and LOF (4012) dimensioning.

Na Rys. 15 przedstawiono przykład skalowania kursora liniowego na taśmie radiograficznej (odcinek skalowania 50 mm) oraz wymiarowania digitalizowanego ulepszonego zobrazowania analogowego spoiny W1 (podwyższona czułość kontrastowa), które pozwala precyzyjnie określić rozmiary trudno rozróżnialnej wady (przyklejenie - 4012) z wykorzystaniem oprogramowania systemowego XVu do obróbki cyfrowych obrazowań radiograficznych.

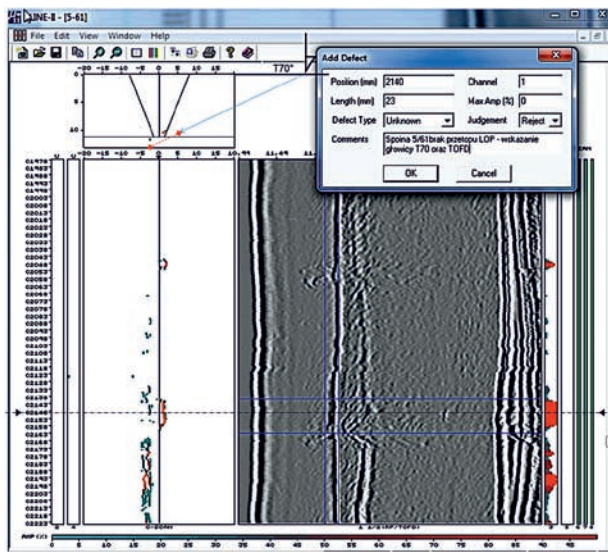
7. Badania walidacyjne złącza systemem zautomatyzowanych ultradźwięków

Poniżej zamieszczono kilka przykładów działań walidacyjnych, które zawsze powinny towarzyszyć wprowadzaniu nowej techniki badawczej (TOFD+PE) na większych przedsięwzięciach technicznych. Temu celowi służy jednocześnie stosowanie kontroli NDT alternatywnymi metodami/technikami objętościowymi (tu zastosowano radiografię analogową z digitalizacją radiogramów i ręczne ultradźwięki).

Trzeba mieć przy tym na uwadze znane ograniczenia metod/technik objętościowych NDT, gdzie techniki radiograficzne są bardziej czułe na wykrywanie wad objętościowych, podczas gdy metody ultradźwiękowe skuteczniej wykrywają wady płaskie i nie należy oczekiwać pokrywania wyników badania w każdym przypadku.

7.1 Zmechanizowane skanowanie złącza spawanego TOFD+PE – podwyższanie wiarygodności wyniku badania

Podstawowym skanowaniem jakie wykonuje się przy badaniu spoin techniką TOFD+PE jest skanowanie typu nierównoległego, w którym symetrycznie ustawione głowice patrzą poprzecznie na spoinę i przesuwane równoległe do osi spoiny.



Rys. 16. Przykładowy zapis cyfrowy badania złącza DN 800 x 11 wykonany skanerem TOFD + PE – na rysunku pokazano sposób weryfikacji wskazań braku przetopu LOP oraz wskazań geometrii złącza przy pomocy głowic fal poprzecznych o kącie wiązki 70°, penetrujących obszar przetopu (kanały 3 i 4 – na poprzecznym B-scanie orientacyjnie zaznaczono przebieg osi wiązki głowicy i szerokość bramki próbkowania) – na podstawie takiej informacji można również zinterpretować wskazanie z głowicy TOFD jako pochodzące od braku przetopu.

Fig. 16. The exemplary digital scan of DN800 x 11 mm girth weld done by TOFD + PE scanner – on the diagram verification of lack of penetration (LOP) as well as geometrical indications are presented using additional shear wave probe of 70°, penetrated root weld area (channels 3 and 4 – on the upper B-scan scheme of probe beam axis and gate width are shown) – using this additional information one can interpret the TOFD indications of LOP in this area.

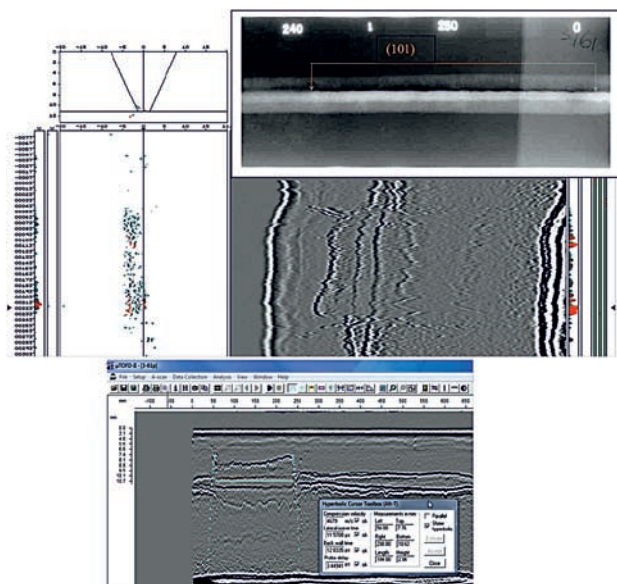
Podczas przesuwu skanera impulsy ultradźwiękowe przechodzące między głowicami (zobrazowania typu A) są

systematycznie próbkowane cyfrowo w zakresie ustawionych bramek i zapisywane w pamięci komputera. Przebiegi te są następnie przekształcane w zobrazowania typu B i C, będące obrazem spoiny w przekroju podłużnym lub poprzecznym po grubości oraz rzutem na powierzchnię obwodu zewnętrznej badanej złącza. Rys. 16 podaje przykładowy zapis cyfrowy badania objętości złącza skanerem TOFD+PE. Zobrazowanie to pozwala na lokalizację wad na obwodzie spoiny oraz na określenie długości, wysokości oraz głębokości zalegania wad w sposób cyfrowy.

Na Rys. 16 pokazano sposób wymiarowania wskazania braku przetopu oraz odróżniania go od wskazań geometrii złącza. Sonogram pokazuje również jak trudna i niejednoznaczna jest interpretacja braku przetopu tylko na podstawie wskazań dyfrakcyjnych głowicy pracującej w modzie TOFD. Podwyższenie wiarygodności badanie odbywa się w klasie badania D poprzez uzupełnienie dodatkową techniką ultradźwiękową PE, która pozwala potwierdzić wskazania ze stref przetopu i lica i krytycznie interpretować wskazania geometryczne oraz rzeczywiste wady.

7.2 Badania walidacyjne TOFD+PE

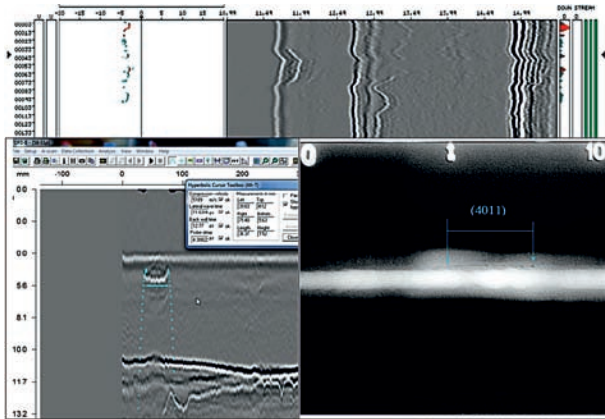
W ramach potwierdzenia odtwarzalności wyniku badania skonfrontowano wyniki kilku badań metodą ultradźwiękową z kontrolą radiograficzną lub na odwrót, ponieważ obydwie metody objętościowe były stosowane, w sposób komplementarny, podwyższający wiarygodność wyniku.



Rys. 17. Badania radiograficzne (Se-75) ujawniły występowanie pęknięcia (101) w linii przetopu o współrzędnych $X + l_x = 2410 + 192$ mm; badania walidacyjne systemem UTA potwierdziły pęknięcie (Crack - 101: $X + l_x = 54 + 184$ mm; $h = 2,86$ mm). Niezgodność początku wskazania wyniku z rozpoczęcia skanowania UTA z przesunięciem około $X_0 = -200$ mm względem „0” radiograficznego.

Fig. 17. In radiographic inspection (Se-75) a longitudinal crack (101) occurs along weld root with coordinate $X + l_x = 2410 + 192$ mm; the UTA scanning confirm an indication – interpreted as a crack - 101: $X + l_x = 54 + 184$ mm; $h = 2,86$ mm. The nonconformity of initial coordinates of both indication implies from delay about $X_0 = -200$ mm in UTA scanning in respect to radiographic coordinates.

Na Rys.17 podano zobrazowanie pęknięcia podłużnego (101) o długości $l_x = 192$ mm, uzyskane w badaniu radiograficznym (radiogram zdigitalizowany), które zinterpretowano jako wadę w przetopie. Obraz UTA - TOFD + PE nie pozostawia wątpliwości co do zgodności lokalizacji i wymiarów pęknięcia, dając dodatkową pełną informację o wysokości i przebiegu wady w przekroju grubości złącza - TOFD-B-scan.



Rys. 18. Badania walidacyjne wskazania przyklejenia wykrytego UTA (LOF: $X + l_x = 39 + 36$ mm; $h \sim 1,5$ mm); weryfikacja badania radiograficznego (Se-75) ujawniła w przyklejenie na wskazanym przez UTA odcinku (4011): $X + l_x = 45 + 35$ mm; (na radiogramie naniesiono informacyjnie początek i koniec wskazania).

Fig. 18. In the UTA has occurred LOF($X + l_x = 39 + 36$ mm; $h \sim 1,5$ mm); Validation by the radiographic inspection (Se-75) confirm an indication (LOF: $X + l_x = 39 + 36$ mm; $h \sim 1,5$ mm - on the film is viewed the course of LOF on original digitized radiograph).

Z kolei na Rys.18 pokazano badania walidacyjne wskazania przyklejenia wykrytego UTA (LOF: $X + l_x = 39 + 36$ mm; $h \sim 1,5$ mm); weryfikacja poprzez badanie radiograficzne (Se-75) ujawniła typowe dla radiografii wskazanie przyklejenia. Dokładna klasyfikacja (4011): $X + l_x = 45 + 35$ mm. Obraz UTA - TOFD + PE nie pozostawia wątpliwości co do lokalizacji i wymiarów, dając dodatkową informację o wysokości i przebiegu wady w przekroju grubości złącza TOFD-B-scan, natomiast ocena radiograficzna wymaga bardzo uważnego przeglądania radiogramu w celu wykrycia wskazania przyklejenia.

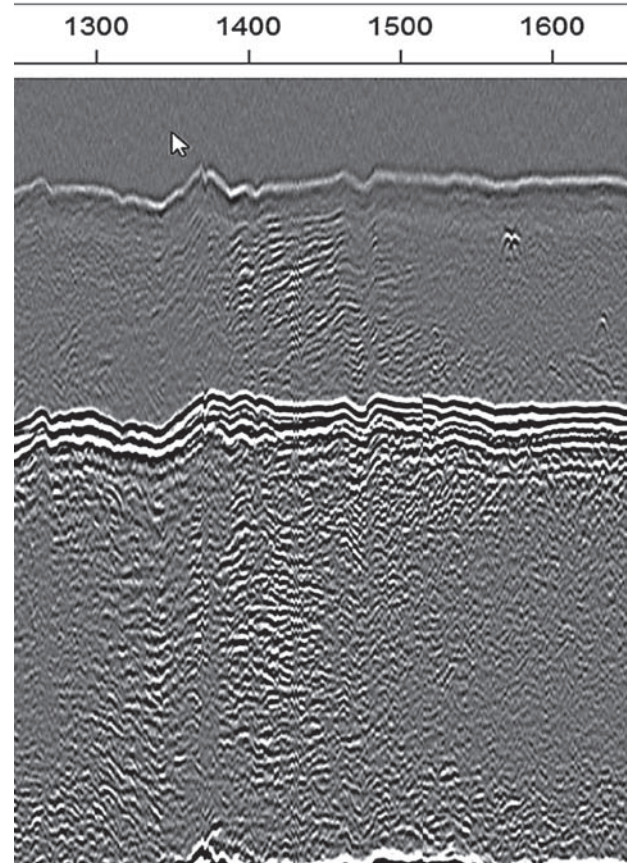
W ramach walidacji wiarygodności wyniku badania pojawił się problem interpretacji wskazań dyfrakcyjnych pojawiających w badaniach TOFD (por. Rys.19)

Stwierdzono następujące cechy charakterystyczne:

- zobrazowaniach głowic TOFD i występowały jako wskazania dyfrakcyjne, charakterystyczne dla rozproszonych wskazań punktowych;
- wskazania występowały z mniejszym lub większym nasileniem i wielkością amplitudy w całym przekroju wzdłuż grubości spoiny;
- miejsce występowania tych wskazań było zawsze związane z sąsiedztwem strefy wpływu ciepła wokół spiralnych spoin hutniczych,

W wyniku przeprowadzonej analizy oraz weryfikacyjnych badań magnetyczno-proszkowych podczas otwierania złącza, stwierdzono że występujące w tych miejscach wskazania

dyfrakcyjne (sugerujące występowanie wad o znaczącej, nieakceptowanej długości i wysokości) wynikają ze zmienionej gruboziarnistej struktury złącza hutniczego. Złącza hutnicze wykonywane są metodą spawania pod topnikiem i w ich strefie wpływu ciepła oraz w samym złączu może dochodzić do znacznego rozrostu ziarna, przy wysokich parametrach spawania.



Rys. 19. Obraz wskazań TOFD na zmienionej gruboziarnistej strukturze złącza hutniczego w strefie HAZ.

Fig. 19. The TOFD image on the coarse grained structure of longitudinal weld & HAZ.

Pokazane przykłady działań walidacyjnych potwierdzają wysoką wiarygodność zastosowanej techniki ultradźwiękowej TOFD+PE, która kumuluje w sobie wszystkie zalety związane z cyfrowym zapisem wyników badania wzdłuż długości złącza. Bardzo istotnym elementem wiarygodności wyniku jest mechanizacja procesu skanowania oraz informacja ze stref przypowierzchniowych uzyskiwane głowicami pracującymi w modzie PE, które stanowią o poprawności interpretacji wyników badania.

8. Podsumowanie

W referacie zaprezentowano niektóre istotne elementy pracy specjalisty NDT 3-go stopnia w procesach przygotowania, rozwiązywania i sterowania nietypowymi zadaniami badawczymi. W tego typu działaniach wymagana jest odpowiednia wiedza inżynierska, jak też doświadczenie w praktycznym stosowaniu wielu metod NDT. Często zdarzają się sytuacje, że badanie jedną metodą/techniką nie daje jednoznacznej odpowiedzi albo uzyskana ilość informacji

jest niewystarczająca, ze względu na znane ograniczenia każdej metody badań nieniszczących.

Zastosowanie, w sposób komplementarny, wielu technik specjalnych NDT np. radiografii i ultradźwięków pozwala w wielu przypadkach uwiarygodnić wynik i pozwolić na wydawanie opinii technicznych o badanym obiekcie.

Niezwykle istotną sprawą jest przygotowanie pisemnych procedur i instrukcji badania, które w przypadku rozwiązywania nietypowych problemów badawczych wymagają poszerzonej wiedzy, popartej często wykonywaniem wstępnych analiz i badań próbnych (porównaj kontrolę czułości badania – p. 2).

Doświadczenia nabyte przez firmę NDTEST podczas stosowania technik cyfrowych:

- radiografii bezpośredniej DR na płaskich detektorach DDA;
- zaawansowanej kombinacji ultradźwięków TOFD+PE, zaimplementowanych w postaci badań zmechanizowanych obwodowych złączy spawanych - potwierdzają, że stanowią one istotny krok naprzód w stosunku do klasycznych technik radiograficznych i ultradźwiękowych.

W procedurach walidacji urządzeń, systemów badawczych a także nowych technik badawczych dużą wagę przykładają się do powtarzalności i odtwarzalności uzyskiwanego wyniku badania. Pozytywne wyniki tych procesów przekładają się w prostej linii na potwierdzenie wiarygodności wyniku badania – co jest z kolei głównym wymaganiem procesu walidacji.

Wszystkie procesy porównań zakończyły się wynikiem pozytywnym (bardzo dobra zgodność, w niektórych przypadkach – dobra), czasami informacje z porównań należy traktować jako uzupełniające i podwyższające ogólną wiarygodność wyniku badania.

Pozwala to ocenić prezentowaną technikę zobrazowania bezpośredniego DR jako bardzo wiarygodne elementy nowej technologii badania radiograficznego, opartej na technikach cyfrowych.

Jako podstawowe atuty cyfrowej i zmechanizowanej techniki skanowania TOFD+PE, w kontekście podwyższania wiarygodności badania, należy wymienić:

- pełny zapis cyfrowy wyników badania z całej objętości złącza i ocena wyniku badania w czasie rzeczywistym;

- analizę wyników (również zdalnie na odległość) z możliwością dokładnego pomiaru położenia, długości, oraz głębokości i wysokości wad przy pomocy specjalnego oprogramowania;
- zobrazowanie stanu złącza w przekroju podłużnym wzdłuż głębokości, co stanowi komplementarną informację do wyników badania radiograficznego;
- podwyższoną wiarygodność wyników – wynikającą z mechanizacji skanowania oraz zastosowania techniki wielu głowic pracujących w różnych modach do potwierdzania wskazań w tych samych obszarach.

Techniki: radiografii bezpośredniej DR raz ultradźwiękowa TOFD+PE, z użyciem zmechanizowanych skanerów zostały efektywnie wdrożone przez NDTEST na obiektach rurociągowych o dużym zróżnicowaniu średnic i grubości, na różnego rodzaju instalacjach w przemyśle gazowniczym i petrochemicznym i stanowi komplementarną informację w badaniach objętościowych NDT tych obiektów.

9. Literatura/References

- [1] M. Śliwowski: Zmechanizowane badania złączy spawanych techniką radiografii cyfrowej DR, Krajowa Konferencja Badań Radiograficznych, Stary Młyn 2017.
- [2] M. Śliwowski: Zmechanizowane badanie ultradźwiękowe złączy spawanych techniką wielogłowicową TOFD+PE, Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane 2013
- [3] PN-EN12732+A1:2014-06 - Infrastruktura gazowa . Spawanie stalowych układów rurowych. Wymagania funkcjonalne
- [4] PN-EN ISO 17636-1:2013-06 - Badania nieniszczące spoin. Badanie radiograficzne. Część 1: Techniki promieniowania X i gamma z błoną
- [5] PN-EN ISO 17636-2:2013-06 - Badania nieniszczące spoin. Badanie radiograficzne. Część 2: Techniki promieniowania X i gamma z detektorami cyfrowymi
- [6] PN-EN ISO 10863:2011: Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe złączy spawanych. Zastosowanie techniki dyfrakcji fal ultradźwiękowych (TOFD)
- [7] PN-EN ISO 17640:2011: Badania nieniszczące spoin.. Badania ultradźwiękowe złączy spawanych.
- [8] PN-EN ISO 5817:2014-06 – Spawanie. Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką), Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych.
- [9] PN-EN 14096-2:2007 - Badania nieniszczące. Kwalifikacja systemów digitalizacji błony radiograficznej. Część 2: Wymagania minimalne.