XXIV Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 14-16 marca 2018

PODWYŻSZANIE WIARYGODNOŚCI BADANIA – STUDIA PRZYPADKÓW ZAAWANSOWANYCH CYFROWYCH TECHNIK NDT

Marek ŚLIWOWSKI
NDTEST Sp. z o.o.
m.sliwowski@ndtest.com.pl

1. Wstęp

W procedurach walidacji urządzeń, systemów badawczych a także nowych zaawansowanych technicznie technik badawczych (high-tech) dużą wagę przykłada 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.

W trakcie procesu walidacji cyfrowego systemu *NDT,* prowadzone są badania porównawcze procesów polegające na:

- uwiarygodnianiu wyniku badania poprzez wykrywanie i wymiarowanie wad na próbkach referencyjnych z wadami sztucznymi lub naturalnymi o znanym położeniu i kształcie;
- podwyższaniu powtarzalności wyniku przez automatyzację skanowania;
- 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 ujednolicenia porównań.

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 [1] oraz DN 800 [2], gdzie wymagania kontraktowe narzucają poziom jakości złączy spawanych *B* lub wyższy wg *PN-EN ISO 5817* [3].

Dla celów porównań walidacyjnych wykorzystano wyniki standardowych badań radiograficznych na błonach analogowych oraz radiogramy cyfrowe z digitalizacji tych radiogramów analogowych, wykonane zgodnie z wymaganiami normy *PN-EN 14096-2* [4].

W przypadku badań UTA przedstawiono weryfikację nastaw systemu do ciągłej pracy w układzie zmechanizowanym na próbkach odniesienia (zakres i czułość badania).

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

2. 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.

2.1. Badanie ultradźwiękowe cyfrowe – np. *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* [5] wymagane jest przygotowanie specjalizowanych próbek odniesienia, dostosowanych do badanej grubości i geometrii obiektu (por. *Rys. 1* i *2*).

2.1.1. 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.

Do weryfikacji nastawy czułości systemu ultradźwiękowego, wykorzystywana będzie specjalna próbka odniesienia (por. *Rys. 1* i *2*), w postaci wycinka rury o badanej grubości *t* średnicy *DN* z nacięciami na powierzchni zewnętrznej o głębokościach *0,5mm, 1mm, t/4, 2t/4 oraz 3t/4 mm* a także z reflektorami na powierzchni wewnętrznej - nacięcia o głębokościach *1mm, 2mm oraz 3mm,* zgodnie z zaleceniami *PN-EN ISO 10863, zał. A* oraz wymaganiami kontraktowymi.

Rys.1 Próbka odniesienia do nastaw i kontroli czułości badania systemu TOFD+PE ultradźwiękowego dla DN 1000
Fig 1 The reference block for sensitivity setting and checking of ultrasonic system TOFD+PE for pipeline DN 1000

Rys. 2 Próbka odniesienia do nastaw i kontroli czułości badania TOFD+PE doczołowych obwodowych złączy spawanych DN 600 i grubości ścianki 105 mm
Fig 2 The reference block for sensitivity setting and checking of ultrasonic TOFD+PE system on girth welds DN 600 and wall thickness 105 mm

2.1.2. Weryfikacja wykrywalności i nastawa czułości na próbce odniesienia

Na *Rys. 3* pokazano wykrywalność reflektorów zaimplementowanych próbce odniesienia pokazanej na *Rys. 1*. Stwierdzono, że na sonogramie kontrolnym uzyskano wskazania od wszystkich dyfraktorów na głowicach *TOFD*, przy czym dokładność wymiarowania tej techniki (±0,1 mm) pozwala na precyzyjne wymiarowanie położenia i rozmiarów wad (dyfraktor: 1 – h_1=10,7 mm; 2 – h_2=7,1 mm; 3 – h_3=3,4 mm; 4 – t_4=11,2 mm, h_4=3,0 mm; 5 – t_5=12,2 mm, h_5=2,0 mm; 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 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 8 powierzchni zewnetrznej – 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 ÷ 20 złączy (por. *Rys. 3*).

Rys. 3 Skan kontrolny na próbce odniesienia wykonany skanerem TOFD+PE na spoinie DN 1000x14,2 mm
Fig. 3 The control scan of reference block done by TOFD+PE scanner on the weld DN 1000x14,2 mm

2.2. Badanie radiograficzne cyfrowe – np. 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* [6] *po*przez 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* [7] uzyskiwane jest przez zapewnienie wykrywalności wskaźnikowej $IQI_{standard,r} = W_{IQI,r}$.

Dla radiogramów cyfrowych złączy spawanych norma *PN-EN ISO 17636-2* [7] określa dodatkowo wymaganą rozdzielczość przestrzenną $SR_{b,r}$, którą wyznacza się ze zobrazowania

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.

2.2.1. 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. 4* - obraz prześwietlenia złącza *DN 1000 mm*, grubość ścianki *d = 14,2 mm).*

Rys. 4 Widok wskaźników jakości obrazu IQI (standard i duplex) na kontrolnym radiogramie uzyskanym systemem XPRESS Scan – $IQI_{standard}$ = w15, IQI_{duplex} = D9

Fig. 4 View of wire quality indicators IQI (standard i duplex) on control digital radiograph recorded by XPRESS Scan system– $IQI_{standard}$ = w15, IQI_{duplex} = D9

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.*

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. 4*).

Na kontrolnym radiogramie cyfrowym przy ekspozycji lampą rentgenowską uzyskiwano wykrywalność wskaźnikową dupleksową – 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 SNR_n. 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 <u>wymagana rozdzielczość duplexowa $SR_{b,r}$</u> 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. 4*) jest lepsza o co najmniej 1 wartość pręcika od wymaganej.

<u>Ocena czułości kontrastowej poprzez zapewnienie *SNRn,min*</u>

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 $SR_{b,r}$.

Rys. 5 Widok obszaru na kontrolnym radiogramie cyfrowym służącym do zastosowania algorytmu SNR_n
Fig. 5 View of area of SNR_n evaluation on control digital radiograph

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

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

i pozwoliło to wyznaczyć (por. *Rys. 4*) – znormalizowany stosunek sygnał-szum:

$$SNR_n = 158$$

(pomierzony w strefie *SWC* w pobliżu wskaźnika *IQI),* przy zalecanym normą *PN-EN ISO 17636-2*

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

3. 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.

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.

Rys. 6 Zasada uśredniania sygnałów na przykładzie TOFD
Fig 6 Principle of digital signal averaging by TOFD system

Na *Rys. 6* 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 $\sqrt{5}$.

4. 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 scyntylacyjnym.

4.1. Wyniki badania radiograficznego - przykładowe złącza z budowy DN1000

*Spoina **W1***

Przedstawiono bardzo spektakularne porównanie przedstawiono dla lokalizacji przyklejenia, które na ogół jest dosyć trudno wykrywalne metodami radiograficznymi. W obydwu przypadkach *(*por. *Rys. 7* i *8)* wskazanie daje dosyć słaby kontrast, ale jest ono wykrywalne.

*Rys. 7 Digitalizowany radiogram analogowy spoiny **W1** – widoczne wskazania przyklejenia + pęcherze (4012+2011) x_1= 158,5÷160 cm*

*Fig. 7 Digitalized analogue radiograph of **W1** weld – the LOF+pores indication is visible (4012+2011) x_1= 158,5÷160 cm*

*Rys.8 Radiogram cyfrowy spoiny **W1** – potwierdzone wskazania przyklejenia+ pęcherze (4012+2011) x_1= 123,5÷125cm (0 taśmy rdg zostało przesunięte o Δx= -35cm)*

*Fig. 8 Digital radiograph of **W1** weld – the LOF+pores indication is confirmed (4012+2011) x_1= 123,5÷125cm (0 of radographic meter is moved by Δx= -35cm)*

<u>Spoina W2</u>

*Rys. 9 Digitalizowany radiogram analogowy spoiny **W2** – widoczne wskazanie pęcherzy gniazda i kanalikowych;*

*Fig. 9 Digitized analogue radiograph of **W2** weld – the cluster+warm holes is visible (2013+2016) x_1=41,5 ÷ 42,5cm*

*Rys.10 Radiogram cyfrowy spoiny **W2** - potwierdzone wskazanie gniazda pęcherzy i pęcherzy kanalikowych (2013+2016) x_1= 42,5÷43,5cm (0 taśmy - Δx= +1cm);*

*Fig. 10 Digital radiograph of **W2** weld – the cluster+warm holes is confirmed (2013+2016) x_1= 123,5÷125cm (0 of radographic meter is moved by Δx= +1cm)*

Na *Rys. 9* oraz *10* 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 *Δx= +1cm*, podczas skanowania złącza ***W2*** techniką *DR*.

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

Na *Rys. 11 i 12* 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 zobrazowań radiograficznych

*Rys. 11 Radiogram cyfrowy spoiny **W1**. Przykład wymiarowania gniazda pęcherzy (2013)*
*Fig. 11 Digital radiograph of **W1** weld. An example of cluster porosity (2013) dimensioning*

*Rys. 12 Radiogram cyfrowy spoiny **W2**. Przykład wymiarowania gniazda pęcherzy*
*Fig. 12 Digital radiograph of **W2** weld. An example of cluster porosity (2013) dimensioning*

Proces digitalizacji radiogramów analogowych powinien odbywać się z rozdzielczością zapewniającą klasę *DB* (wymagania kontraktowe DN 1000) wg normy *PN-EN ISO 14096-2* i jest ona odpowiednikiem klasy *B* wg normy *PN-EN ISO 17636-1* dla radiogramów analogowych. Wszystkie radiogramy, digitalizowane w scanerze 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= 0,16mm;* oryginalnych analogowych - W_{IQI} = *W15= 0,125mm).*

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

Fig. 13 *Digitalized analogue radiograph of **W1** weld. An example of linear cursor calibration and LOF (4012) dimensioning*.

Na *Rys. 13* 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 zobrazowań radiograficznych.

5. Badania walidacyjne złączy 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 jednoczesne 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 się wyników badania w każdym przypadku.

5.1. 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 równolegle do osi spoiny. 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 zewnętrznego badanego złącza (na *Rys. 14* podano 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.

Rys. 13 Przykładowy zapis cyfrowy badania złącza DN 800x11 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 głowic TOFD jako pochodzące od braku przetopu

Fig 13 The exemplary digital scan of DN800x11 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.

Na *Rys. 14* podano 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*. Podwyższanie wiarygodności badanie odbywa się w klasie badania D poprzez uzupełnienie dodatkową techniką ultradźwiękową *PE*, która pozwala potwierdzić wskazania ze

stref przetopu i lica a także krytycznie interpretować wskazania geometryczne oraz rzeczywiste wady.

5.2. Badania walidacyjne techniki *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. 15 Badania radiograficzne (Se-75) ujawniły występowanie pęknięcia (101) w linii przetopu o współrzędnych $X+l_x$=2410+192[mm]; badania walidacyjne systemem UTA potwierdziły pękniecie (Crack - 101: $X+l_x$=54+184[mm]; h= 2,86 [mm]). Niezgodność początku wskazania wynika z rozpoczęcia skanowania UTA z przesunięciem około X_o = - 200[mm] względem „0" radiograficznego.
Fig, 15 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_o = - 200 [mm] in UTA scanning in respect to radiographic coordinates.

Na *Rys.15* 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. 16. Badania walidacyjne wskazania przyklejenia wykrytego UTA (LOF: $X+l_x$=1610+452[mm]; h~ 1 [mm]); weryfikacja badania radiograficznego (Se-75) ujawniła w przyklejenie przerywane na wskazanym przez UTA odcinku(4012+4013): $X+l_x$=1600+330[mm]; (na radiogramie naniesiono informacyjnie przebieg wskazań przyklejenia obserwowany na oryginalnym rdg analogowym)

Fig. 16. Validation of lack of fusion discovered by UTA (LOF: $X+l_x$ = 1610 +452 [mm]; h~1 [mm]); verification by radiographic inspection (Se-75) showed intermittent LOF on the location suggested by UTA (4012+4013): $X+l_x$ = 1600 +330[mm]; (because of weak contrast on the radiograph - LOF visible on origin is informationally marked by blue line)

Na *Rys.16* pokazano badania walidacyjne wskazania przyklejenia wykrytego UTA (*LOF: $X+l_x$=1610+452[mm]; h~1[mm]*); weryfikacja poprzez badania radiograficzne (Se-75) ujawniła występowanie bardzo słabo kontrastowego wskazania, które bez informacji o wskazaniu UTA można z dużą dozą prawdopodobieństwa pominąć w ocenie. Dokładna ocena radiograficzna przyklejenia pozwala je oszacować jako: *(4012+4013) $X+l_x$ = 1600 + 330[mm]*. Obraz UTA -*TOFD+PE* nie pozostawia wątpliwości o lokalizacji, dając dodatkową informację o wysokości i przebiegu wady w przekroju grubości złącza *TOFD-B-scan.*

Rys. 17 Badania walidacyjne wskazania przyklejenia wykrytego UTA (LOF: $X+l_x=39+36$[mm]; h~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. 17 In the UTA has occurred LOF($X+l_x=39+36$[mm]; h~1,5 [mm]); Validation by the radiographic inspection (Se-75) confirm an indication (LOF: $X+l_x=39+36$[mm]; h~1,5 [mm]- on the film is viewed the course of LOF on original digitized radiograph

Na *Rys.17* pokazano badania walidacyjne wskazania przyklejenia wykrytego UTA (*LOF: $X+l_x=39+36$[mm]; h~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 <u>ocena radiograficzna wymaga bardzo uważnego przeglądania radiogramu</u>.

Rys. 18 Obraz wskazań TOFD na zmienionej gruboziarnistej strukturze złącza hutniczego w strefie HAZ
Fig 18 The TOFD image on the coarse grained structure of longitudinal weld &HAZ

W ramach walidacji wiarygodności wyniku badania pojawił się problem interpretacji wskazań dyfrakcyjnych pojawiających w badaniach *TOFD* (por. *Rys.18*)

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.

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 informacje ze stref przypowierzchniowych uzyskiwane głowicami pracującymi w modzie *PE,* które stanowią o poprawności interpretacji wyników badania.

6. Badania walidacyjne złączy spawanych zbiornika grubościennego

6.1. Badanie podstawowe – klasyczna radiografia

Na *Rys.19* przedstawiono schemat ekspozycji radiograficznej obwodowych złączy spawanych w zbiorniku grubościennym o średnicy około 3 m i grubości ścianki ok. 120 mm, o kształcie ukosowania w postaci podwójnego U – o małych kątach nachylenia ścianek bocznych (por. *Rys. 19*) [8].

Rys. 19 Dobór parametrów ekspozycji centrycznej dla złącza spawanego zbiornika (D_o = 2990 mm; t = 120 mm; L = 100 mm): FFD = 1450 mm; błona axh = 19x480x100 mm,

Przy tak dużych grubościach ścianki, dla uzyskania radiogramów o odpowiedniej jakości i w rozsądnych czasach ekspozycji, należy dobrać źródło o dużej energii i aktywności/napięciu. Wybrano źródło gamma Co-60 o aktywności ok. 20 Ci i o wymiarach źródła 4 x 4 mm. Dobór techniki radiograficznej do wykonania prześwietlenia, podporządkowany był przede wszystkim warunkom obiektowym i kontraktowym. Ekspozycje radiograficzne mogły się odbywać tylko w nocy, w ograniczonym czasie.

Zatem warunki ekspozycji były tak dobrane, że wynik uzyskiwano w czasie około 8 godzin, przy czym dla pewności uzyskania odpowiedniej jakości obrazu radiograficznego zastosowano technikę ekspozycji dwóch błon o różnej czułości, a czasy naświetlania były tak dobrane, aby można było oceniać radiogramy pojedynczo, jak też obydwa jednocześnie. Takie podejście pozwalało uzyskiwać jednoznaczne wyniki, bez potrzeby powtarzania ekspozycji.

Dotrzymanie wszystkich wymagań przy badaniu złączy, tego zaawansowanego technicznie obiektu, jeśli chodzi o technologię wytwarzania, wymagało dopracowania techniki badania NDT w drobnych szczegółach, aby uzyskiwane wyniki były wiarygodne.

Techniczne warunki badania dla tego obiektu przewidywały 600% kontrolę różnymi metodami badań nieniszczących (1xRT, 3xUT, 2xMT) i miało to na celu utrzymanie permanentnej kontroli w procesie badania. W szczególności potrójna kontrola UT zastosowana była w fazie po spawaniu, następnie po obróbce cieplnej i po próbie ciśnieniowej.

Dla wiarygodnego wykrycia spodziewanych groźnych wad spawalniczych (pęknięcia, przyklejenia do ścianek bocznych i w strefie gorącej, braki przetopu) należało dobrać odpowiednie techniki przeszukiwania ultradźwiękowego adekwatne do do ukosowania. Na *Rys.20* przedstawiono plan skanowania ultradźwiękowego dla wad usytuowanych kierunku podłużnym spoiny o nietypowym kształcie przygotowania złącza.

Rys. 20 Dobór technik ultradźwiękowego przeszukiwania złącza typu podwójne U na wady kierunku podłużnym (strefy przypowierzchniowe nie podlegające badaniu tandem – 15 mm – badanie głowicami fal podpowierzchniowych i poprzecznych; strefy wewnętrzne - badanie układem tandem: strefa 1 – t_1=27mm, Δt_1=27mm; strefa 2 – t_2=63mm, Δt_2=35mm; strefa 3 – t_3=92mm, Δt_1=28mm)

W jednej ze spoin po badaniu radiograficznym stwierdzono znaczną ilość pęknięć poprzecznych, niezwykle groźnych dla tej konstrukcji, wynikających prawdopodobnie z niedotrzymania warunków technologii spawania. *Na Rys.21* przestawiono obraz radiograficzny pęknięć poprzecznych usytuowanych prostopadle do osi spoiny.

Rys. 21 Pęknięcia poprzeczne w obrazie badanego złącza

Rys. 22 Lokalizacja głębokości i wymiarowanie pęknięcia poprzecznego w złączu obwodowym przy pomocy poprzecznego skanowania ultradźwiękowego techniką tandem

Naprawa tak grubych złączy bez dokładnej lokalizacji głębokości i wymiarów wykrytych pęknięć stanowi poważny i kosztowny problem, ponieważ trzeba w takiej sytuacji „ po omacku” ciąć całą spoinę. Z pomocą przychodzi tu nam technika ultradźwiękowa, którą można wymiarować głębokość i rozmiary wskazań. Niestety, ze względu na bardzo niekorzystne usytuowanie omawianych pęknięć poprzecznych, prostopadłe do powierzchni badania, klasyczne techniki echa, zawodzą w tym przypadku zupełnie.

W ramach przygotowania technologii naprawy złącza należało posłużyć się ultradźwiękową techniką tandem, dostosowaną do pewnego zwymiarowania wad ułożonych poprzecznie w spoinie. Na *Rys.22* przedstawiono plan skanowania ultradźwiękowego dla wad usytuowanych kierunku poprzecznym i prostopadłym do osi spoiny. Jednocześnie technika tandem pozwala na precyzyjną lokalizację i wymiarowanie pęknięcia w przekroju złącza i stanowi to ważną technicznie informację w stosunku do wyniku badania radiograficznego.

7. 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. Czasami zadanie badawcze wymaga użycia technik NDT w szerokim zakresie, jak to pokazano w punkcie 6.

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 przykłada 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 wiarygodny element 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 stanowią komplementarną informację w badaniach objętościowych NDT tych obiektów.

8. LITERATURA

[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-EN ISO 5817:2014-06* – Spawanie. Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką), Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych.

[4] *PN-EN 14096-2:200*7 - Badania nieniszczące. Kwalifikacja systemów digitalizacji błony radiograficznej. Część 2: Wymagania minimalne.

[5] *PN-EN ISO 10863:2011*: Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe złączy spawanych. Zastosowanie techniki dyfrakcji fal ultradźwiękowych (TOFD)

[6] *PN-EN ISO 17636-1:2013-06* - Badania nieniszczące spoin. Badanie radiograficzne. Część 2: Techniki promieniowania X i gamma z błoną

[7] *PN-EN ISO 17636-2:2013-06* - Badania nieniszczące spoin. Badanie radiograficzne. Część 2: Techniki promieniowania X i gamma z detektorami cyfrowymi

[8] *M. Śliwowski*: Studia przypadków - sporządzanie ekspertyz i opinii technicznych w oparciu o badania nieniszczące, Krajowa Konferencja Badań Radiograficznych, Popów 2008.