

Marek Śliwowski*
NDTEST Warszawa

Zautomatyzowane badania systemami PA+TOFD - wdrażanie i zastosowania

PA+TOFD testing by automated UT systems - implementation and applications

STRESZCZENIE

Celem referatu jest prezentacja prac wdrożeniowych automatycznych systemów ultradźwiękowych PA+TOFD, dedykowanych do badania doczołowych złączy spawanych o zakresie grubości od 6 do 40 mm na obiektach ze stali węglowych - płaskich oraz na rurociągach w zakresie średnic DN od 500 do 1400 mm. Implementacja kombinowanych technik cyfrowych PA (Phased-Array - zastosowanie głowic wieloprzetwornikowych dających informację z całej objętości złącza) oraz TOFD (dyfrakcyjna technika czasu przejścia - komplementarne przeszukiwanie objętości spoiny) pozwala na cyfrowe zobrazowanie oraz cyfrowy zapis pełnych wyników badania w całej długości i objętości złącza spawanego i została znormalizowana, w zakresie badania wyrobów spawanych, oddzielnie w dokumencie PN-EN ISO 13588 dla techniki PA oraz w PN-EN ISO 10863 - dla techniki TOFD. Cyfrowe techniki badawcze pozwalają na łatwe automatyzowanie procesu, z wykorzystaniem skanera prowadzącego głowice, z możliwością ręcznego (badanie pół-automatyczne) lub zmechanizowanego (badanie automatyczne) prowadzenia wzdłuż badanego złącza. Przywołane normy umożliwiają charakteryzowanie i klasyfikację wskazań ech odbitych i/lub dyfrakcyjnych oraz obwiedni echa uzyskiwanych głowicami PA oraz TOFD dla uzgodnionego poziomu badania (A, B lub C). Skutkuje to w każdym przypadku koniecznością przygotowania pisemnej procedury badania, odpowiednich próbek odniesienia określonych tymi normami oraz przeprowadzenia badań kwalifikacyjnych, a także wykonania badań pilotowych/porównawczych na próbkach o znanych rozmiarach wad i lokalizacji. W referacie przedstawiono doświadczenia z procesu wdrażania systemu PA+TOFD oraz badań dla złączy spawanych z pełnym przetopem.

Słowa kluczowe: systemy phased-array, technika TOFD, badania zautomatyzowane i półautomatyczne, zmechanizowane badania złączy spawanych.

ABSTRACT

The paper presents implementation works of automated ultrasonic systems using PA+TOFD technique and dedicated to ultrasonic inspection of butt flat as well as girth welds on pipelines in the range of diameter DN 500 1400 mm and thickness from 6 to 40 mm. Implementation of combined digital techniques PA (Phased-Array technique - applies multitransducer probes scanning full weld volume) and TOFD (Time Of Flight Diffraction technique - complementary scanning of weld volume applying diffracted signals) allows for digital display and recording of full digital inspection results along weld length and cross-section. Both techniques are standardised in weld sector in separate documents EN ISO 13588 for PA technique [2] and EN ISO 10863 - for TOFD technique. Digital testing techniques can easily be subjected to automation process and using mechanical scanner guided manually - the semi-automated testing or by mechanised scanner - the full automated inspection can be realised. The above-mentioned standards allow for characterisation and classification of reflected and diffracted echoes and its envelopes for PA and TOFD probes preserving agreed testing level (A, B or C). It results in each case of testing the necessity of written procedure/instruction preparation, the special reference blocks and qualification procedure under agreed testing level performance. To confirm the reliability of implemented testing PA+TOFD technique the validation tests on special specimens with known localisation and flaw sizes have been done.

Keywords: phased-array technique, TOFD technique, semi- and automated testing, mechanized weld testing.

1. Wstęp

Celem referatu jest prezentacja prac przy wdrażaniu ultradźwiękowego systemu PA+TOFD do badania doczołowych złączy spawanych o zakresie grubości od 6 do 40 mm na obiektach płaskich oraz na rurociągach w zakresie średnic DN 500 - 1400 mm, wykonanych ze stali węglowych.

Technika TOFD (Time-Of-Flight Diffraction) polega na wykorzystaniu zjawiska dyfrakcji fal ultradźwiękowych do wykrywania i oceny wad materiałów. Od wielu lat znane są zastosowania tej techniki do wymiarowania wad, a w szczególności do wyznaczania głębokości pęknięć [1, 2]. W końcu lat 90-tych i na początku lat 2000, dzięki wprowadzeniu nowoczesnych mobilnych komputerów, technika TOFD uzyskała znacznie szersze możliwości

zastosowań w badaniach nieniszczących. Obecnie jest powszechnie stosowana jako podstawowa metoda badań nieniszczących spoin w warunkach przemysłowych. Obszerne materiały dotyczące podstaw i nowoczesnych zastosowań TOFD można znaleźć w monografii [3].

Technika TOFD stanowi jedną z zaawansowanych cyfrowych technik badań ultradźwiękowych, zaliczana do technik wysokiego poziomu tzw. hi-tech. Dzieje się tak z powodu wysokiej wykrywalności nieciągłości płaskich, możliwości określania fizycznych rozmiarów wad, dużej szybkości badania, możliwości pełnej archiwizacji wyników badań oraz prostej graficznej ich prezentacji pozwalającej na ułatwioną analizę wskazań, a także wysoki współczynnik wydajności badania do kosztów.

Z drugiej strony pomimo wymienionych zalet TOFD, równie istotne są jej ograniczenia. Do najistotniejszych należy zaliczyć ograniczenia w wykrywalności nieciągłości

*Autor korespondencyjny.

E-mail: m.sliwowski@ndtest.com.pl

występujących blisko powierzchni elementu oraz niemożność oszacowania ich rozmiarów w tych obszarach. Jako drugie należy wymienić bardzo wysoką czułość wykrywania wskazań dyfrakcyjnych nawet o małych rozmiarach (od ułamków mm do 2 mm) przy jednoczesnym braku możliwości wiarygodnego określenia rzeczywistego rozmiaru i może stanowić istotny problem w aspekcie oceny uzyskanych wyników badań.

Szerokie stosowanie ultradźwiękowych technik phased-array PA (Phased-Array – zastosowanie głowic wieloprzetwornikowych dających informację z całej objętości badanego obiektu) jako standardowej technologii w zaawansowanych badaniach nastąpiło dopiero na początku lat 2000. Wiązało się to również z burzliwym rozwojem mobilnych technik komputerowych jak też z zaangażowaniem wielu światowych firm w wytwarzanie coraz bardziej zaawansowanej mobilnej aparatury phased-array oraz głowic PA, dedykowanych do specyficznych zastosowań w badaniu nieniszczącym wielu wyrobów w różnych sektorach przemysłowych. Solidne podstawy i przykłady nowoczesnych zastosowań technologii phased-array można znaleźć w nowym wydaniu monografii E. Ginzela [4] a także w obszernym opracowaniu autora tego artykułu [6], jedynym w języku polskim na naszym rynku badań nieniszczących.

Zaawansowana technologia phased-array jest drugą cyfrową techniką badań ultradźwiękowych, zaliczaną do technik wysokiego poziomu. Jako istotne zalety należy wymienić wysoką wykrywalność wad (zwiększanie SNR na skutek ogniskowania klasycznego lub zaawansowanego TFM wiązki, zwiększanie prawdopodobieństwa wyrzycia POD, dzięki dużemu zakresowi sterowania kątem wiązki), dużej szybkości badania (skanowanie elektroniczne), możliwości sterowania wiązką przy złożonych inspekcjach, pełną archiwizację surowych wyników badań oraz graficzną prezentację przy pomocy algorytmów zobrazowań dla interpretacji, analizy i wymiarowania wskazań.

Technologia phased-array, niezależnie od wymienionych powyżej wielu zalet, ma też specyficzne cechy, które mogą ograniczać szeroką skalę wdrażania technik PA. Należy tu wymienić w pierwszej kolejności wciąż wysokie koszty aparatury i głowic PA, co powoduje wysoki stosunek kosztów w porównaniu z konwencjonalnymi UT, szczególnie przy małych zakresach badania. Do obsługi systemów PA wymagani są bardzo dobrze wykwalifikowani operatorzy o zaawansowanej wiedzy ultradźwiękowej (certyfikaty PA). Analiza i wizualizacja danych jest czasochłonna (redundancja/powtarzanie wyników dla wad czyni ich interpretację i analizę czasochłonną). Duża liczba sygnałów związana z wieloma A-scanami wymaga przyzwyczajenia się i przyjęcia sposobu analizy i umiejętnego stosowania algorytmów wymiarowania.

Z powodu ograniczeń omawianych technik naturalnym był proces budowy optymalnych systemów badawczych, które kompensowałyby wzajemnie wymienione braki każdego z osobna. Takimi przedsięwzięciami było zastosowanie skanerów z głowicami TOFD uzupełnionych

klasycznymi głowicami pracującym w modzie - PE (Pulse Echo), penetrującymi strefy przypowierzchniowe złączy spawanych - technika TOFD+PE [7]. Dalszym naturalnym krokiem w unowocześnieniu procesu skanowania było zastąpienie kilku głowic klasycznych – dwoma głowicami phased-array PA i pełna automatyzacja procesu badania już systemami PA+TOFD. Obszerne opisy przygotowania i wdrożenia do badań takich systemów przedstawiono w monografii [5] oraz 6 w polskim opracowaniu. W świetle wymienionych należy brać pod uwagę fakt, że budowa omawianych automatyzowanych systemów badawczych ma sens ekonomiczny w przypadku dużych projektów badawczych jakimi są np. rurociągi przesyłowe.

Implementacja kombinowanych technik cyfrowych PA oraz TOFD pozwala na cyfrowe zobrazowanie oraz cyfrowy zapis pełnych wyników badania w całej długości i przekroju złącza spawanego z komplementarnymi informacjami z każdego przeszukiwania. Podstawowym rezultatem zastosowanej kombinacji jest zwiększona wiarygodność badania.

Techniki badania zostały znormalizowane, w zakresie badania wyrobów spawanych, oddzielnie w dokumencie PN EN ISO 13588:2019-04:2011 – dla techniki PA [8] oraz w PN-EN ISO 10863: 2011 - dla techniki TOFD [9]. Zatem zadaniem wdrażającego jest uzgodnienie zapisów obydwu dokumentów.

Cyfrowe techniki badawcze pozwalają na łatwe automatyzowanie procesu, dlatego badanie odbywa się przy użyciu skanera prowadzącego głowice i odczytującego ich położenie, z możliwością ręcznego (badanie pół-automatyczne) lub zmechanizowanego (badanie automatyczne) prowadzenia wzdłuż badanego złącza. Badaniom PA+TOFD będą podlegać złącza spawane z pełnym przetopem w rurociągach, zbiornikach o różnym kształcie oraz w płaskich konstrukcjach stalowych (metalowych) w procesach ich wytwarzania lub eksploatacji.

Norma PN-EN ISO 13588 umożliwia charakteryzowanie i klasyfikację wskazań ech odbitych lub dyfrakcyjnych oraz obwiedni echa uzyskiwanych głowicami PA dla podstawowych poziomów badania A, B i C. Podobnie norma PN-EN ISO 10863, za pomocą uzgodnionych wzajemnie poziomów badania A, B i C, pozwala prowadzić charakteryzowanie i klasyfikację wskazań w oparciu o techniki echa i dyfrakcyjne dla głowic TOFD. Skutkuje to w każdym przypadku koniecznością przygotowania pisemnej procedury badania, odpowiednich próbek odniesienia określonych tymi normami oraz przeprowadzenia badań kwalifikacyjnych, a także wykonania badań pilotowych/porównawczych na próbkach o znanych lokalizacji i rozmiarach wad.

Kryteria akceptacji, umożliwiające ocenę zgodności z wymaganiami należy formułować w oparciu o uzgodnienia z zamawiającym badanie, przy czym priorytet mają wymagania projektowe i odbiorcze lub istniejące dokumenty normatywne, tu np. PN-EN ISO 19285:2017-11 [10] oraz PN-EN ISO 15626:2014-01 [11].

2. Istotna terminologia

Dla jednoznacznego operowania techniką PA+TOFD podane są niektóre terminy i definicje:

- TOFD - (ang. Time of Flight Diffraction) ultradźwiękowa technika polegająca na rejestracji i cyfrowej wizualizacji impulsów ultradźwiękowych ugiętych dyfrakcyjnie na krawędziach wad, w której podstawą do wyznaczania położenia i rozmiarów wad jest dokładny pomiar czasu przejścia impulsów ultradźwiękowych;
- PA - (ang. Phased Array) ultradźwiękowa technika polegająca na rejestracji i wizualizacji impulsów ultradźwiękowych odbitych od wady (również dyfrakcyjnych), w której podstawą do wyznaczania położenia jest pomiar czasu przejścia a dla rozmiarów wad – amplituda impulsów ultradźwiękowych;
- (PA+TOFD) setup – ustawienie głowic o odpowiednio dobranych parametrach (częstotliwość, wielkość przetwornika, rodzaj fali, separacja PCS) do grubości badanego złącza i odpowiedniego planu skanowania (tzw. „scan plan”);
- Zobrazowanie typu A - standardowe zobrazowanie impulsów ultradźwiękowych na ekranie defektoskopu, w którym oś pozioma odpowiada czasowi przejścia (odległości) zaś oś pionowa amplitudzie rejestrowanych impulsów ultradźwiękowych
- Zobrazowanie typu B - zobrazowanie uzyskiwane dla obróbki cyfrowej wyników, w którym uzyskuje się przekrój badanego materiału w kierunku grubości. Oś pionowa przedstawia drogę lub czas przejścia fali ultradźwiękowej w płaszczyźnie wiązki ultradźwiękowej, oś pozioma może przedstawiać drogę skanowania mechanicznego lub elektronicznego w zależności od kierunku przemieszczania skanera;
- Zobrazowanie typu D - zobrazowanie uzyskiwane w wyniku obróbki cyfrowej jako szczególny przypadek B-scanu, w którym uzyskuje się pionowy przekrój badanego materiału wzdłuż osi skanowania mechanicznego, oś pozioma przedstawia położenie skanera natomiast oś pionowa – czas przejścia fali ultradźwiękowej lub głębokość w płaszczyźnie wiązki ultradźwiękowej. Jest to powszechnie używane zobrazowanie typu B-TOFD.
- Zobrazowanie typu S - zobrazowanie uzyskiwane w wyniku obróbki cyfrowej również jako szczególny przypadek B-scanu, w którym uzyskuje się pionowy przekrój badanego materiału w płaszczyźnie rozchodzenia się wiązki ultradźwiękowej. Oś pozioma odpowiada rzutowi poziomemu (szerokości obiektu badanego) z punktu wprowadzenia wiązki fali, natomiast oś pionowa odpowiada głębokości;
- Zobrazowanie typu C - zobrazowanie uzyskiwane w wyniku obróbki cyfrowej skanowania ultradźwiękowego typu B, prezentowane jako widok z góry lub rzut poziomy badanego elementu. Dla systemów ultradźwiękowych obydwa kierunki są kontrolowane, przy skanowaniu głowicą PA liniową jedna oś jest sterowana mechanicznie, druga – elektronicznie. Położenie wyświetlanych danych jest związane z pozycją enkodera podczas akwizycji. Dla każdego piksela zobrazowania C-scan jest wyświetlana

tylko maksymalna amplituda dla danej pozycji skanowania;

- Skanowanie nierównoległe (podłużne) – skanowanie, w którym układ skanera (głowice patrzą w kierunku prostopadłym do osi spoiny) przemieszczany jest w kierunku równoległym do osi spoiny;
- Skanowanie równoległe (poprzeczne) – skanowanie, w którym układ skanera (głowice patrzą w kierunku prostopadłym do osi spoiny) przemieszczany jest w kierunku prostopadłym do osi spoiny;
- Skanowanie offsetowe (ang. offset scan) – skanowanie wzdłuż osi spoiny, w którym skaner lub wady położone są niesymetrycznie względem osi złącza.

3. Wyposażenie do badań

3.1 Aparatura i przyrządy pomocnicze

Do badania złączy spawanych techniką PA+TOFD mogą być zastosowane systemy ultradźwiękowe oparte na technice cyfrowej i umożliwiające sterowanie procesem skanowania oraz zapisem wyników badania w czasie rzeczywistym. Systemy te powinny być wielokanałowe i mieć możliwość współpracy z komputerem w celu analizy i obróbki cyfrowej wyników badania w czasie rzeczywistym lub zbliżonym.

W obecnej chwili, ze względu na profesjonalne i pewne oprogramowanie i serwis, najczęściej stosowane są mobilne systemy ultradźwiękowe firmy Olympus: FocusPX, OmniscanMX2 oraz OmniscanX3.

3.2 Głowice ultradźwiękowe

Do badania złączy spawanych techniką PA należy stosować głowice o parametrach nominalnych zgodnych z PN-EN ISO 18563-2:2017-11. Do badania złączy spawanych techniką TOFD należy stosować głowice o parametrach nominalnych zgodnych z PN-EN 12668-2: 2010.

Głowice stosowane do badań powinny posiadać atest producenta potwierdzający ich rzeczywiste parametry i wynik kontroli technicznej. Ponadto, przed każdym badaniem, głowice podlegają kontroli bieżącej polegającej na sprawdzeniu kąta głowicy, środka głowicy oraz zapasu wzmocnienia, zgodnie z zaleceniami norm: PN - EN 12668 - 3:2014-02/PN-EN ISO 18563-3:2016-02.

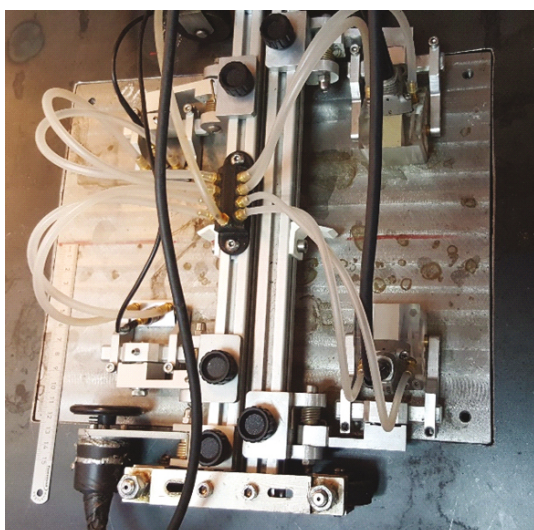
3.4 Skaner

Przy badaniu złączy techniką PA+TOFD głowice ultradźwiękowe są zabudowane w skanerze i prowadzone tak aby były równoległe do spoiny w ustalonej odległości od siebie oraz środka spoiny. System ultradźwiękowy jest przygotowany do prowadzenia badania zmechanizowanego skanera poruszanego silnikiem na taśmie stalowej zamontowanej wokół spoiny obwodowej na rurze. Takie rozwiązanie umożliwia powtarzalne i stabilne prowadzenie skanowania i zapewnia wysoką jakość i wydajność badania (rys. 1). W warunkach budowy dopuszcza się prowadzenie skanera konfigurującego głowice – w sposób ręczny.



Rys. 1. Nowe rozwiązanie zmechanizowanego systemu PA+TOFD w wersji skanera zintegrowanego z aparatem Focus PX.

Fig. 1. New solution of mechanized PA+TOFD system - scanner integrated with Focus PX.



Rys. 2. Wygląd skanera PA+TOFD w wersji ręcznej.

Fig. 2. View of PA+TOFD scanner in manual option.

Skaner w wersji manualnej może być zrealizowany tak jak poprzednio na taśmie przy prowadzeniu ręcznym skanera na rurze lub poprzez zamontowanie do ramy kółek prowadzących dających sprzężenie magnetyczne do rury lub obiektu płaskiego (rys. 2).

Skaner ręczny nie zapewnia stabilnego przemieszczania, wymaga zwiększonej kontroli jego prowadzenia względem osi złącza i może być wykorzystany w sytuacjach, gdy stosowanie systemu zmechanizowanego jest niemożliwe lub niecelowe (np. spoiny płaskie, poprawki, pojedyncze spoiny o różnych średnicach, skany równoległe – w poprzek spoiny, itp.).

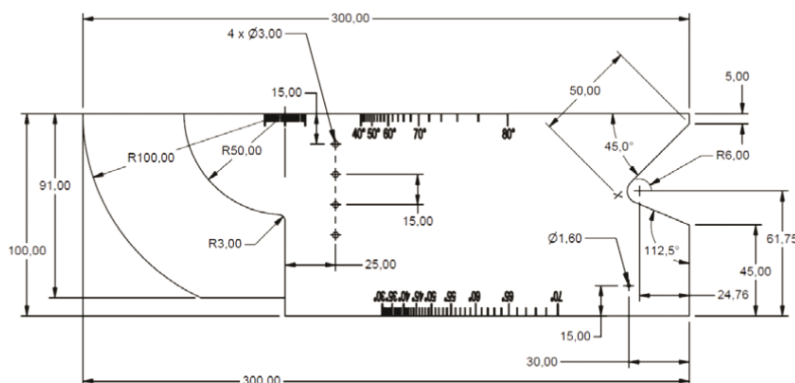
3.5 Układ akustycznego sprzężenia dla badań zmechanizowanych

W celu zapewnienia stabilnego sprzężenia akustycznego między głowicami ultradźwiękowymi, a powierzchnią badanego elementu stosowany jest film wodny. Woda doprowadzana jest pod głowice w sposób ciągły przez układ zasilający, w skład którego wchodzi zbiornik na wodę, pompa oraz elastyczne przewody połączeniowe.

3.6 Wzorce kalibracyjne i próbki odniesienia

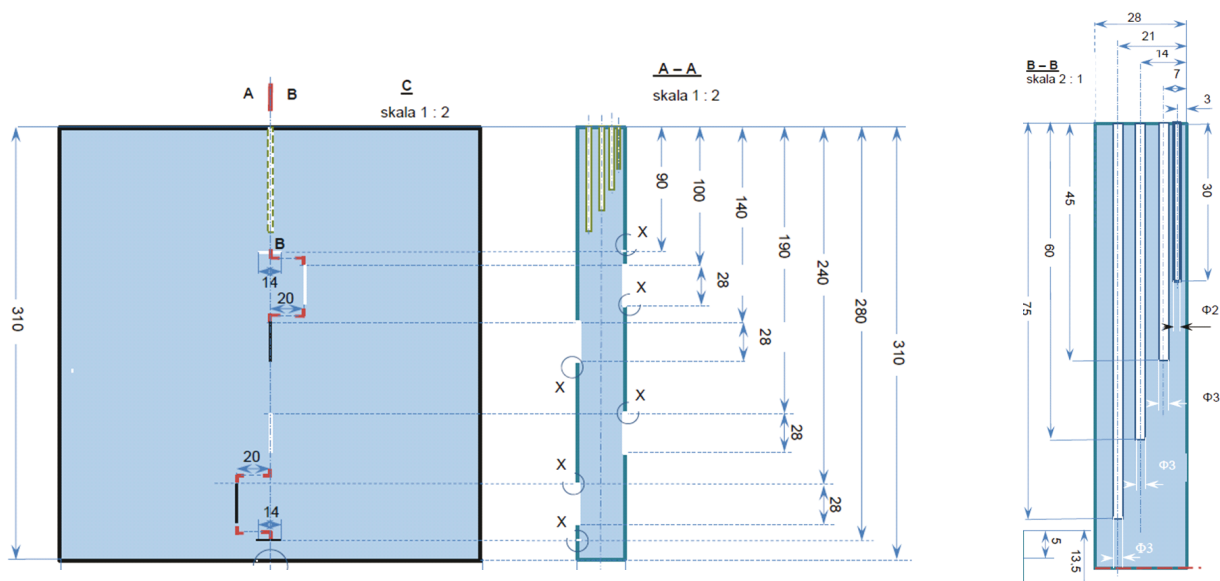
W badaniu PA do realizacji nastaw wykorzystuje się wzorzec kalibracyjny PA wg ISO 19675:2017 (rys. 3). Zawiera on reflektory R50 oraz R100 do nastawy zakresu obserwacji (dla potrzeb tej procedury wystarczający będzie zasięg – 250 mm dla fali poprzecznej w stali) oraz korekcji opóźnień klinie dla stosowanych zakresów kątowych wiązki ultradźwiękowej. Dla przeprowadzenia nastaw czułości badania dla głowic PA wykorzystane mogą być 4 reflektory $D_{SDH} = 3$ mm, rozmieszczone odpowiednio na głębokości (tzw. skalowanie „true depth”) $h_{j1} = 15$ mm; $h_{j2} = 30$ mm; $h_{j3} = 45$ mm; $h_{j4} = 60$ mm. Dla wygody nastawa czułości PA wykorzystywać będzie algorytm korekcji nastaw wzmocnienia TCG dla stosowanych zakresów kątowych i zasięgowych wiązki ultradźwiękowej.

Do weryfikacji parametrów rozstawienia głowic (PA+TOFD setup) oraz nastaw czułości systemu, wykorzystywana będzie płaska próbka odniesienia RB_{flat} (PA+TOFD), zaprojektowana zgodnie z zaleceniami norm wyrobu PN-EN ISO 13588/ PN-EN ISO 10863 dla wybranego poziomu badania oraz badanego zakresu grubości.



Rys. 3. Wzorzec kalibracyjny PA wg ISO 19675:2017.

Fig. 3. PA calibration block according to ISO 19675:2017.



Rys. 4. Próbką odniesienia dla poziomu C, do weryfikacji nastaw systemu ultradźwiękowego PA+TOFD

Fig. 4. Reference block for testing level C recommended for UT settings verification of PA+TOFD system.



Rys. 5. Próbką referencyjną #15 do weryfikacji nastaw systemu ultradźwiękowego PA+TOFD.

Fig. 5. Reference block #15 for UT settings verification of PA+TOFD system.



Rys. 6. Próbką referencyjną #28 do weryfikacji nastaw systemu ultradźwiękowego PA+TOFD

Fig. 6. Reference block #28 for UT settings verification of PA+TOFD system

Próbki te, zgodnie z zapisami norm PN-EN ISO 13588/ PN-EN ISO 10863 mogą być wykorzystywane do weryfikacji połączeń płaskich jak też rurowych, od średnicy DN 300. Ponadto zostały one wykorzystane jako podstawowe próbki referencyjne w procesie kwalifikacji procedury PA+TOFD.

4. Wykonanie badania

4.1 Poziom techniki badania

Wymagania jakościowe stawiane złączom spawanym związane są przede wszystkim z materiałem, procesem spawania i warunkami eksploatacji. Poziom badania ultradźwiękowego spoin może być przedmiotem uzgodnienia z zamawiającym badanie, na ogół wynika jednak z narzuconego w zamówieniu poziomu jakości złącza. Wzorem normy wyrobu PN-EN ISO 17640 dla ręcznych badań ultradźwiękowych złączy spawanych, normy PN-EN ISO 13588/PN-EN ISO 10863 przewidują 4 poziomy badania

(A, B, C i D) złączy spawanych dla technik PA oraz TOFD, odpowiednio. Jeżeli zastosuje się PN-EN ISO 17635, wówczas zalecane są klasy (poziomy) badania jak w tabeli 1.

Implementacja określonego poziomu badania wymaga zasadniczo większych przygotowań niż w przypadku klasycznych badań ręcznych. Generalnie przechodzenie od podstawowego poziomu badania A do coraz wyższego aż do D wymaga zapewnienia wzrastającej wiarygodności wyniku. Z tabeli widać ponadto, że w procedurach badania obiektu połączoną techniką PA+TOFD należy wyspecyfikować i uzgodnić wspólne elementy poziomu badania.

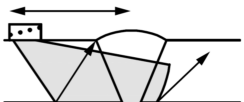
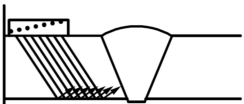
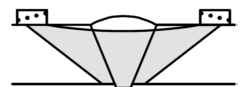
Wymagania dla wybranych modułów i poziomów badania PA wyspecyfikowano na podstawie normy PN-EN ISO 13588 i przedstawiono w tabeli 2 i należy je uwzględnić w pisemnej procedurze/instrukcji badania.

Minimalne wymagania przewidują zawsze przygotowanie pisemnej procedury/instrukcji badania z wykorzystaniem bloków referencyjnych dla wszystkich poziomów.

Tab. 1. Zalecane poziomy badania.

Poziom jakości złączy spawanych wg PN-EN ISO 5817	Poziom badania PA wg PN-EN ISO 13588	Poziom badania TOFD wg PN-EN ISO 10863
D	A – co najmniej	A – co najmniej
C	A – co najmniej	B – co najmniej
B	B	C
uzgodnienia – wyższy niż B	C	C – co najmniej
zastosowania specjalne	D	D

Tab. 2. Szczegóły wyboru poziomów badania dla techniki PA

MODUŁ BADANIA	POZIOMY BADANIA			SZKIC UKŁADU BADANIA
	A	B	C	
	Wzorzec referencyjny (zał. A)			
	wzorzec A	wzorzec B	wzorzec C	
Zestaw badania (setup)				
S-scan w ustalonej pozycji do spoiny (skan liniowy) ^{a)}	Z jednej strony	Z dwóch stron lub dwie pozycje głowicy z jednej strony	Z dwóch stron lub dwie pozycje głowicy z jednej strony	
S-scan raster – zmiana pozycji głowicy względem spoiny (skan liniowy złożony – compound scan) ^{a)}	Nie zalecane dla tych poziomów		Z jednej strony	
E-scan w ustalonej pozycji do spoiny (skan liniowy) ^{a)}	Z jednej strony	Z dwóch stron i dla dwóch kątów wiązki głowicy (co najmniej 10° różnicy)	Z dwóch stron lub dwie pozycje głowicy z jednej strony	
TOFD generowany przez głowicę PA ^a	Nie zalecane dla tych poziomów		Pojedynczy moduł zestawu TOFD	
a) Dla poziomego badania C należy zastosować co najmniej dwa różne zestawy modułów, przy czym jeden z nich powinien być typu S-scan lub TOFD				

Tab. 3. Szczegóły wyboru poziomów badania dla techniki PA

Poziom badania	Zestaw TOFD-skaner	Próbka odniesienia - weryfikacja ustawień zestawu TOFD-skaner	Próbka odniesienia – weryfikacja. Nastawy czułości badania	Skany niesymetryczne (offset-scan)	Pisemna instrukcja badania
A	wg tab. 3	nie wymagana	nie wymagana	nie	PN-EN ISO 10863
B	wg tab. 3	nie wymagana	wymagana	nie	PN-EN ISO 10863
C	wg tab. 3	wymagana	wymagana	1)	wymagana
D	pisemna instrukcja	wymagana	wymagana	1)	wymagana
1) konieczność, liczbę i położenie skanów należy określić w pisemnej instrukcji badania					

W przypadku badania z jednej strony należy badać i zapisywać wyniki z połowy i z pełnego skoku, podczas gdy przy badaniu z obydwu stron wystarczy ograniczyć je do połowy skoku.

Wymagania dla poziomów badania TOFD wyspecyfikowano wg normy PN-EN ISO 10863 i przedstawiono w tabeli 3.

Wymaga to doboru parametrów badania TOFD zgodnie z zaleceniami tej tabeli. Ustawienie parametrów zestawu badawczego odbywa się bezpośrednio na obiekcie badanym lub na próbkach odniesienia, natomiast ustawienie czułości badania odbywa się bezpośrednio na obiekcie badanym, ale dla poziomu wyższego niż B jest weryfikowane na specjalnej próbce odniesienia (rys. 4), dobranej do grubości badanego złącza, wykonanej zgodnie z zaleceniami PN-EN ISO 10863, zał. A.

Poziom badania A dopuszczany jest tylko dla obiektów do grubości 50 mm. Przy badaniach odbiorczych mają zastosowanie wszystkie poziomy badania, podczas gdy w badaniach eksploatacyjnych zalecany jest poziom badania D, ze szczególnym uwzględnieniem optymalizacji parametrów systemu na strefy przypowierzchniowe, znajdujące się w pobliżu jednej trzeciej grubości ścianki.

Ostateczne nastawa i weryfikacja parametrów systemu badawczego PA+TOFD odbywa się bezpośrednio na specjalnej próbce odniesienia uzgodnionej z normami PN-EN ISO 13588/PN-EN ISO 10863, zał. A, wykonanej z materiału badanego i przygotowanej każdorazowo dla wymiarów geometrycznych złącza. Jako zasadę wymaganą normą należy zapewnić stosunek SNR > 12dB na wszystkich zobrazeniach A-scan reflektorów referencyjnych.



Rys. 7. Przykładowy „scan-plan” dla spoiny o grubości #22,2 mm dla głowic PA – 5L32-A31, realizujących S-scan typu compound dla fal poprzecznych w stali.

Fig. 7. Exemplary „scan-plan” for weld thickness #22,2 mm tested with probes PA – 5L32-A31, realizing S-scan -compound type for transversal waves in steel.

Zgodnie z wymaganiami przyjętego poziomu badania dla wybranych modułów techniki badania należy przedstawić plany skanowania (ang. „scan plan”) dla zestawów głowic (PA oraz TOFD) wyspecyfikowanych dla przewidzianych geometrii badanych złączy. Skan plany powinny przedstawiać pokrycie obszarów badania wiązką dla danej grubości i geometrii złącza oraz zapewniać optymalne kąty wiązki na granicy wtopienia spoiny (rys. 7- „scan plan” dla głowicy PA).

4.2 Nastawy aparatury

Nastawianie aparatury powinno być prowadzone w porównywalnych warunkach do tych, z jakimi będzie się miało do czynienia w czasie pomiarów na obiekcie. Przed rozpoczęciem badania PA+TOFD należy określić i ustawić parametry badania odpowiednie dla danej spoiny, zgodnie z zasadami opisanymi w instrukcjach pracy. Są to w szczególności: typ oraz rozstaw głowic ultradźwiękowych – zakres badania (parametr PCS), początek i długość bramki próbkowania oraz wzmocnienie – czułość badania.

4.2.1 Nastawianie zakresu obserwacji

Dobór zakresu obserwacji limitowany jest warunkami zadania badawczego i przygotowanego wcześniej „scan planu”. Nastawianie zakresu badawczego polega na ustaleniu pozycji głowic w zestawie skanera (PCS) oraz zasięgu wiązki. Nastawy zakresu obserwacji należy skontrolować i ewentualnie skorygować (prędkość fali ultradźwiękowej) bezpośrednio na obiekcie badanym (próbce referencyjnej), w miejscu o znanym wymiarze.

4.2.2 Nastawianie poziomów badania

Dla przyjętych klas badania normy ustalają wszystkie poziomy badania względem poziomu referencyjnego.

Poziom referencyjny RL (Reference Level)

Dla głowic kątowych fal poprzecznych pracujących w modzie pomiarowym PA, czułość badania powinna ustalona względem poziomu referencyjnego („reference level”), przewidzianego w normie PN-EN ISO 19285 dla wybranego reflektora referencyjnego (tu przyjęto $D_{SDH} = 3$ mm) oraz badanej grubości złącza. Dla zachowania

jednolitej oceny zastosowane są algorytmy korekcji wzmocnienia TCG w pełnym zakresie kątowym i zasięgowym wiązek wyspecyfikowanych w „scan planach”.

$$RL_PA: V_j = TCG(D_{SDH,r}=3) = 80\% \text{ FSH}$$

Jak wiadomo w przypadku techniki TOFD klasyfikacja wskazań oparta jest nie na amplitudzie sygnałów lecz na ich wzajemnych relacjach czasowych. Tym niemniej dla pewnej detekcji wskazań od wad ich amplituda powinna spełniać ogólnie przyjęte relacje stosunku sygnału do szumu $SNR > 6$ dB. W przypadku głowic pracujących w modzie TOFD (echa odbite reflektorów i dyfrakcyjne) poziom referencyjny jak podano poniżej:

$$RL_TOFD: RL_TOFD = \text{poziom szumów} + 6 \text{ dB} \quad 5 \div 10 \% \text{ FSH}$$

Należy oceniać wszystkie wskazania, które osiągają lub przekraczają podane niżej wysokości:

$$EL_PA (80\% \text{ FSH}) \quad V_e = V_j + 14 \text{ dB} = TCG(D_{SDH,r}=3) + 14 \text{ dB} (16\% \text{ FSH});$$

$$EL_TOFD = RL_TOFD \quad \text{poziom szumów} + 6 \text{ dB} (5 \div 10 \% \text{ FSH})$$

Poziom badania (przeszukiwania) SL (Scanning Level)

Ostatecznie czułość (wzmocnienie) badania V_r aparatury ultradźwiękowej należy ustawić na podstawie zależności:

$$SL_PA (80\% \text{ FSH}) \quad V_r = V_j + \Delta V_t + \Delta V_s = TCG(D_{SDH,r}=3) + \Delta V_t + 10 \text{ dB}$$

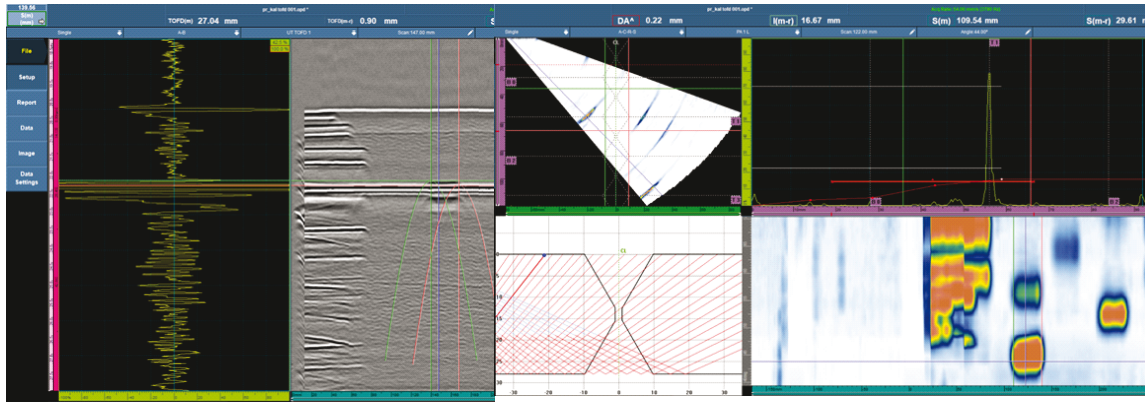
gdzie:

V_j jest wzmocnieniem referencyjnym;

V_t jest poprawką na straty przeniesienia (pomiędzy badanym obiektem i próbkami referencyjnymi DAC/TCG_PA ($D_{SDH} = 3$ mm), które należy określić;

V_s jest poprawką na rozdzielczość przeszukiwania (przyjmuje się $V_s = 0 \div 10$ dB – ze względu na możliwość powrotu do obrazu wskazań przy wzmocnieniu referencyjnym);

Po ustawieniu wszystkich wymaganych parametrów (a w szczególności – czułości badania należy wykonać skan kontrolny PA+TOFD na specjalnej próbce referencyjnej o grubości i geometrii przewidzianego do badania złącza).



Rys. 8. Próbką referencyjną #28 do weryfikacji nastaw systemu ultradźwiękowego PA+TOFD.

Fig. 8. Reference block #28 for UT settings verification of PA+TOFD system.

Dla par głowic pracujących w module pomiarowym TOFD czułość badania powinna być ustalana indywidualnie dla każdej grubości ścianki, którą przeszukuje dana para głowic. Nastawianie czułości badania odbywa się bezpośrednio na obiekcie, a sprawdzanie na reflektorach odniesienia przewidzianych dla każdej strefy, których echa powinny wynosić co najmniej 40÷80 %FSH (pełnej wysokości ekranu) a osiągnięty poziom szumów nie powinien przekraczać 5% FSH. Wszystkie wskazania od reflektorów powinny być uwidocznione na uzyskanym obrazowaniu typu B i C (amplitudy wskazań powinny być nie mniejsze niż 50% FSH). W przypadku gdy wskazania te nie występują lub są słabo widoczne (na obrazowaniu typu A nie osiągają 50% FSH) należy sprawdzić i skorygować parametry lub technikę badania.

5. Kwalifikacja procedury PA+TOFD – przykład skanowania próbki referencyjnej #28 mm

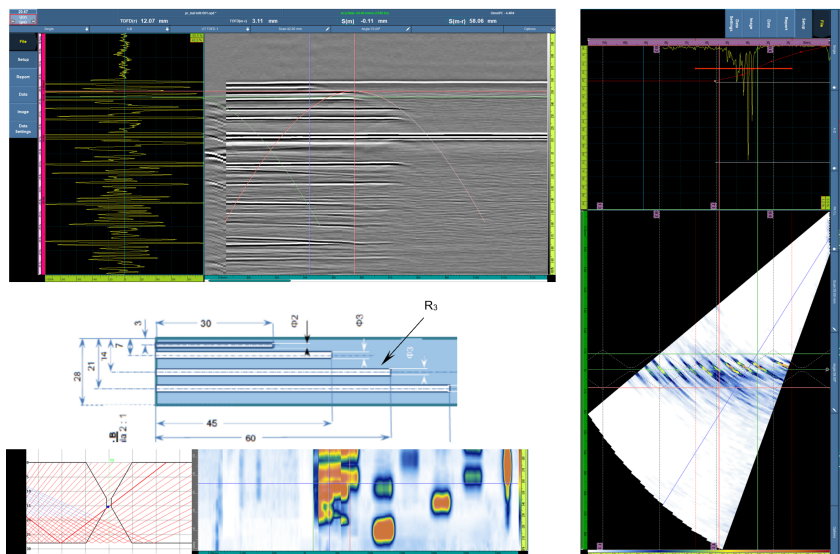
Kwalifikacja procedury PA+TOFD wymagana jest dla poziomów badania B, C, oraz D. Testy powinny przeprowadzane na próbkach referencyjnych przygotowanych odpowiednio do wybranego poziomu

badania. Właściwie wykonana procedura kwalifikacji powinna wykazać w sposób zadowalający:

- wykrycie wszystkich wymaganych reflektorów;
- możliwość wymiarowania w zakresie wymaganym przez normy (specyfikacje);
- zapewnienie przeszukiwania objętości badania (zarówno w kierunku głębokości jak i szerokości obszaru);

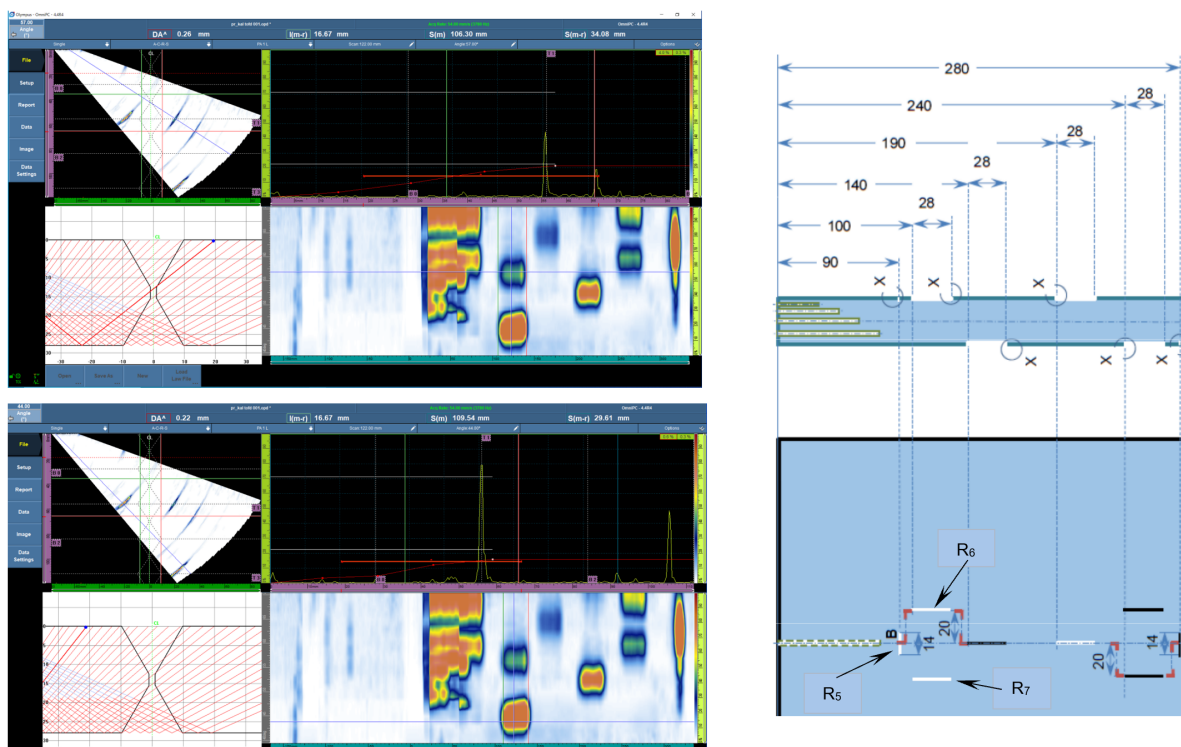
Poniżej zaprezentowano przykładowo procedurę kwalifikacji dla poziomu badania C na płaskiej próbce referencyjnej o grubości 28 mm (rys. 4), która zgodnie z zaleceniami norm pokrywa zakres grubości badanych spoin od 22.4 do 42 mm i może być wykorzystywana do weryfikacji złączy płaskich jak też obwodowych rurowych od DN300 mm.

Na kolejnych rysunkach, (rys.9 - 15), zostały zaprezentowane obrazowania cyfrowe, uzyskiwane techniką PA+TOFD, na których przedstawiono krytycznie wykrywalność i sposób wymiarowania poszczególnych reflektorów, implementowanych w próbce referencyjnej. Warto zwrócić uwagę na wzajemną komplementarność techniki TOFD i phase-array, która stanowi o podwyższonej wiarygodności połączonych technik.



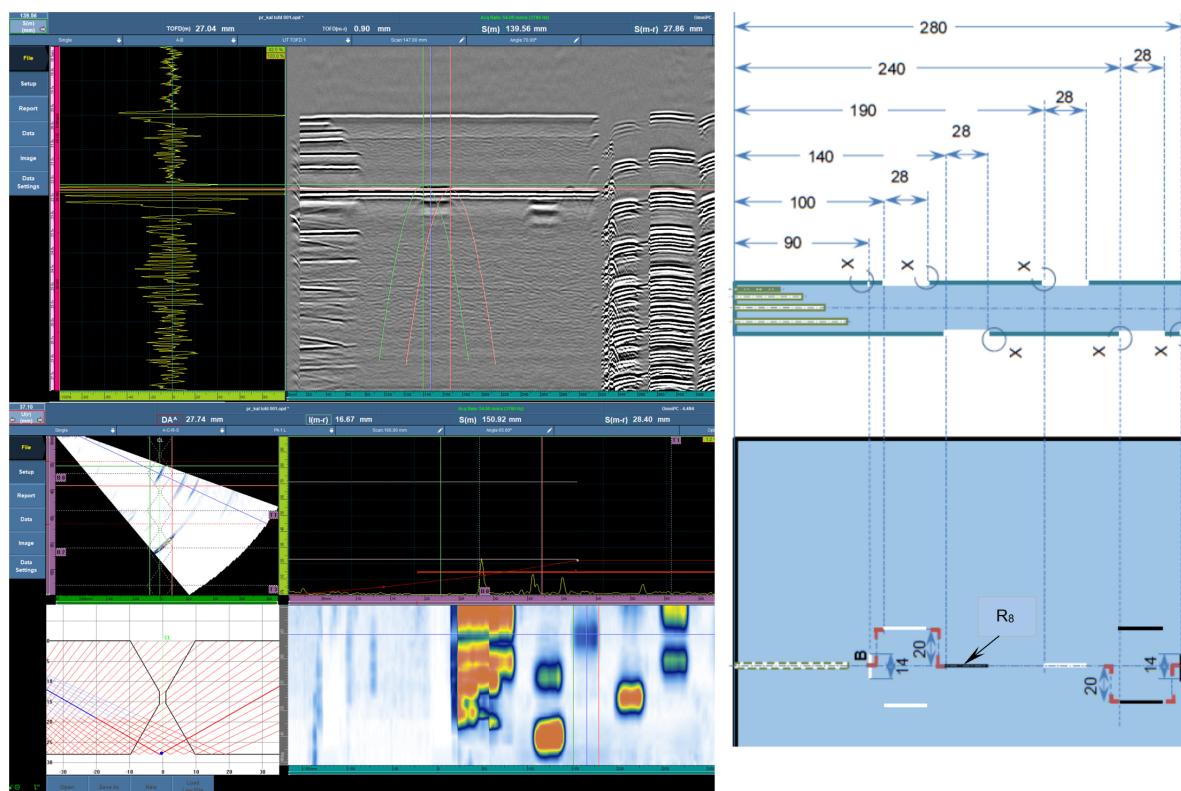
Rys. 9. Reflektor R_3 (SDH=3) $x_3 = (0+60)$ mm; $y_3 = 0$; $z_3 = (t + \varphi)_3 = (12,5+3)$ mm. Skany TOFD+PA(DS) próbki RB#28.

Fig. 9. Reflector R_3 (SDH=3) $x_3 = (0+60)$ mm; $y_3 = 0$; $z_3 = (t + \varphi)_3 = (12,5+3)$ mm. TOFD+PA(DS) scans of RB#28 reference block.



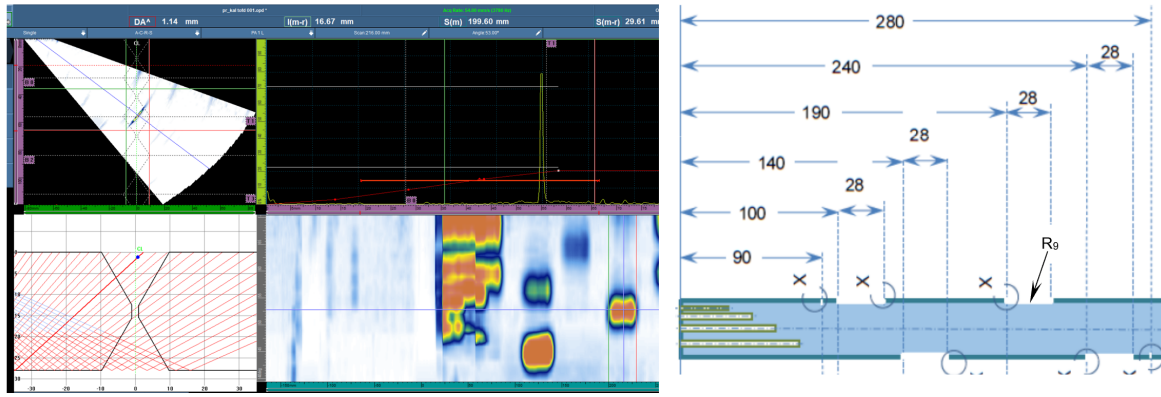
Rys. 10. Reflektory R_6 oraz R_7 – nacięcie w licu $x_{6,7}=(100+28)$ mm; $y_6=20$ mm; $(h \times w)_{6,7}=(1 \times 0,2)$ mm – skany PA(DS) dla próbki RB#28 od strony TOP. Skany TOFD „nie widzą” R_5 ; R_6 oraz R_7

Fig. 10. Reflectors R_6 and R_7 – notches in cap area $x_{6,7}=(100+28)$ mm; $y_6=20$ mm; $(h \times w)_{6,7}=(1 \times 0,2)$ mm PA(DS) – scans for RB#28 reference block from TOP side. On the TOFD scan the reflectors R_5 ; R_6 oraz R_7 are invisible



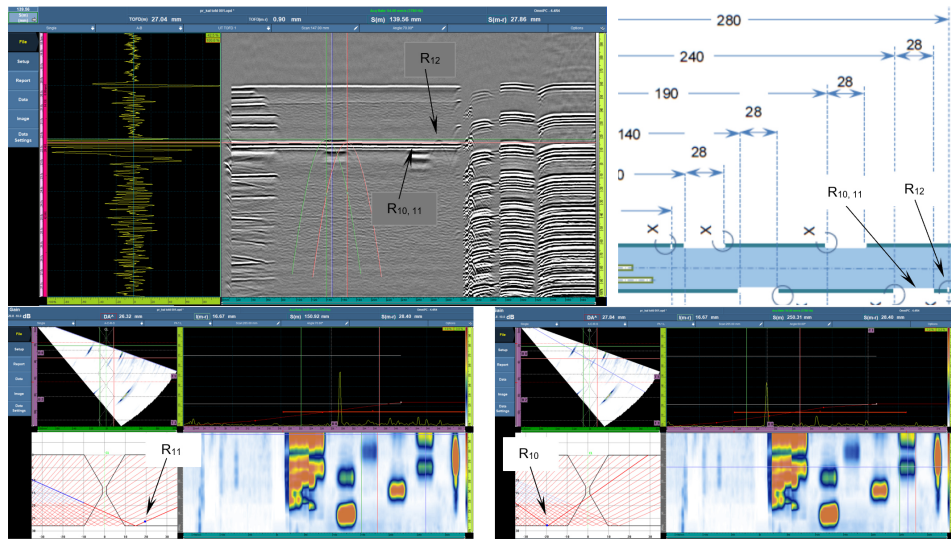
Rys. 11. Reflektor R_8 ($n_{\text{langs}}=1 \times 0,2$) nacięcie w przetopie $x_8=(140+28)$ mm; $y_8=0$ mm; $(h \times w)_8=(1 \times 0,2)$ mm. Skany TOFD+PA(DS) próbki RB#28 od strony TOP.

Fig. 11. Reflector R_8 ($n_{\text{langs}}=1 \times 0,2$) – notch in root area $x_8=(140+28)$ mm; $y_8=0$ mm; $(h \times w)_8=(1 \times 0,2)$ mm. TOFD+PA(DS) scans of RB#28 reference block from TOP side.



Rys. 12. Reflektor R_9 nacięcie w środku lica $x_9 = (190 + 28)$ mm; $y_9 = 0$ mm; $(h \times w)_9 = (1 \times 0,2)$ mm – wg skanu głowicą PA(DS) dla próbki RB#28 od strony TOP. Skany TOFD „nie widzą” R_9 .

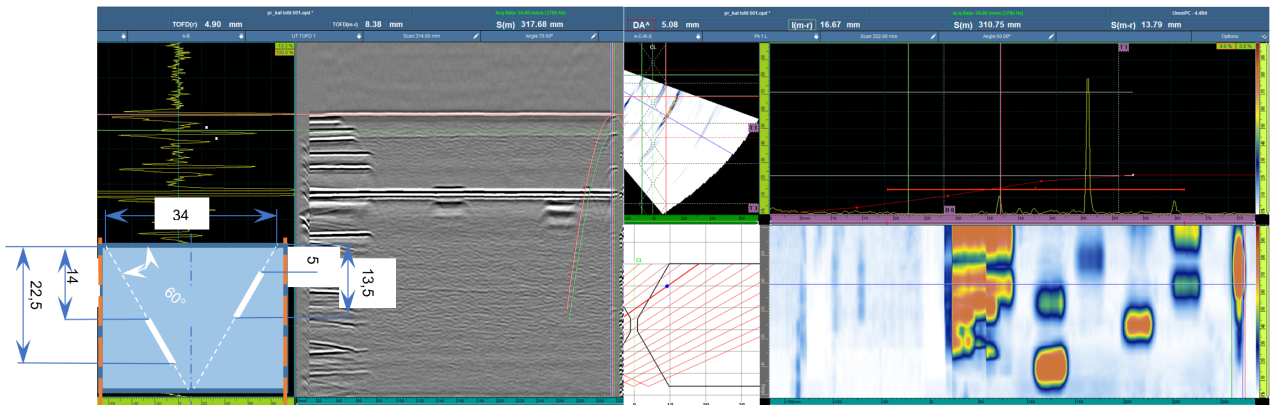
Fig. 12. Reflector R_9 – notch in the middle of cap $x_9 = (190 + 28)$ mm; $y_9 = 0$ mm; $(h \times w)_9 = (1 \times 0,2)$ mm PA(DS) – scan for RB#28 reference block from TOP side. On the TOFD scan the reflectors R_9 is invisible.



Rys. 13. Reflektory R_{10} , R_{11} oraz R_{12} – nacięcie w przetopie $x_{10,11} = (240 + 28)$ mm; $y_{10,11} = 20$ mm; $x_{12} = 280$ mm; $y_{12} = 0$ mm $(h \times w)_{10,11,12} = (1 \times 0,2)$ mm – skany TOFD+PA(DS).

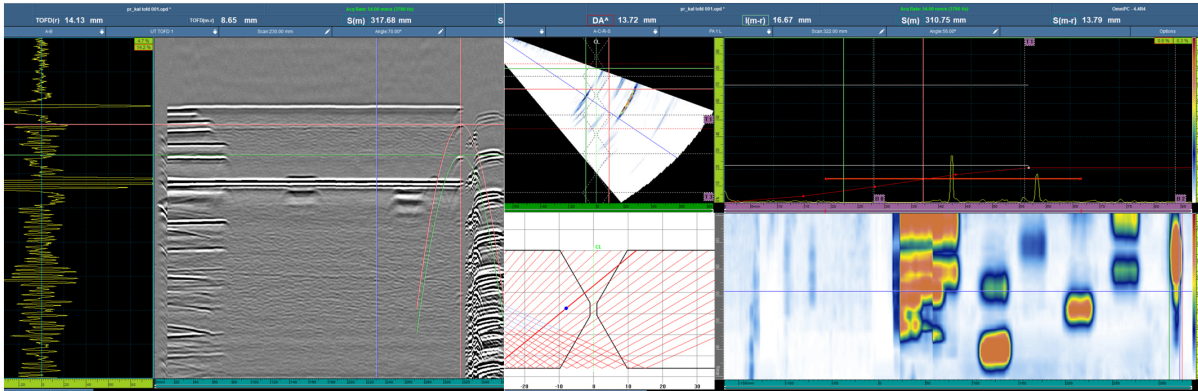
Skany TOFD „widzą” nacięcie poprzeczne R_{12} – w przetopie w odróżnieniu od PA

Fig. 13. Reflectors R_{10} , R_{11} oraz R_{12} – notch in root area $x_{10,11} = (240 + 28)$ mm; $y_{10,11} = 20$ mm; $x_{12} = 280$ mm; $y_{12} = 0$ mm $(h \times w)_{10,11,12} = (1 \times 0,2)$ mm. On TOFD scan R_{12} is visible, whereas on the PA image not remarkable.



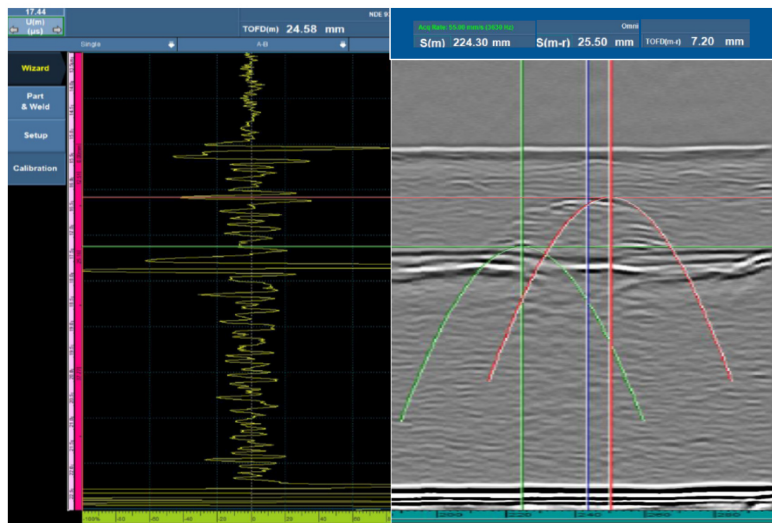
Rys. 14. Reflektor R_{13} – nacięcie na ukosowaniu spoiny $x_{13} = 310$ mm; $z_{13} = (5 + 8,5)$ mm; $(h \times w)_{13} = (2 \times 0,5)$ mm – TOFD+PA.

Fig. 14. Reflector R_{13} – notch on weld bevel $x_{13} = 310$ mm; $z_{13} = (5 + 8,5)$ mm; $(h \times w)_{13} = (2 \times 0,5)$ mm – TOFD+PA.



Rys. 15. Reflektor R_{14} - nacięcie na ukosowaniu spoiny $x_{14} = 310$ mm; $z_{14} = (14 + 8,5)$ mm; $(h \times w)_{14} = (2 \times 0,5)$ mm – skany TOFD+PA(DS).

Fig. 15. Reflector R_{14} – notch on weld bevel $x_{14} = 310$ mm; $z_{14} = (14 + 8,5)$ mm; $(h \times w)_{14} = (2 \times 0,5)$ mm –TOFD+PA(DS) scans.

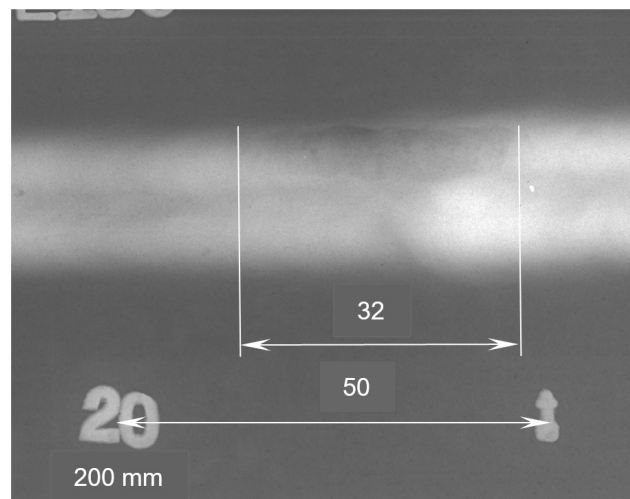


Rys. 16. Zobrazowanie B-TOFD jednej z wad ($x = 224,3 + 25,5$ mm; $h = 7,2$ mm) - próbka walidacyjna.

Fig. 16. B-TOFD image one of characteristic imperfection ($x = 224,3 + 25,5$ mm; $h = 7,2$ mm) - validation specimen.

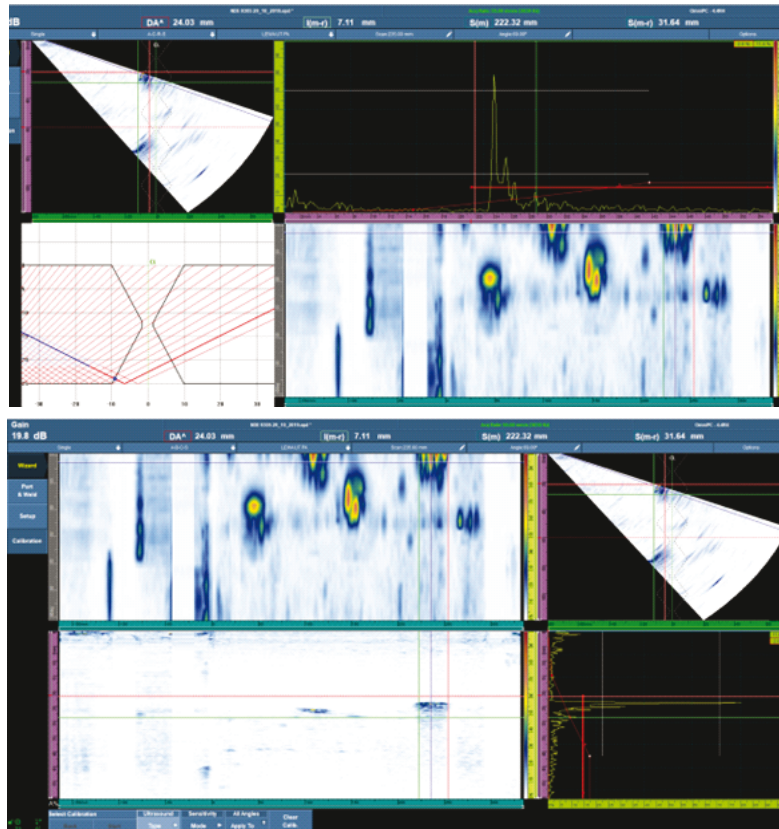
6. Badania walidacyjne techniki PA+TOFD

W publikacji będzie podanych kilka przykładów działań walidacyjnych i wdrożeniowych, które zawsze powinny towarzyszyć wprowadzaniu nowej techniki badawczej PA+TOFD na większych przedsięwzięciach technicznych. Temu celowi służy jednocześnie stosowanie kontroli NDT kilkoma metodami objętościowymi. Trzeba mieć przy tym na uwadze znane ograniczenia każdej metody/techniki badawczej i nie oczekiwać pokrywania wyników badania w każdym przypadku. Powyżej zamieszczono (rys.16÷19) przykład lokalizacji i wymiarowania wybranej wady w próbce walidacyjnej technikami ultradźwiękowymi TOFD oraz PA oraz radiograficzną. Należy jeszcze raz podkreślić wzajemne uzupełnianie danych o wadzie przez wspomniane techniki badawcze. Pokazane przykłady działań walidacyjnych potwierdzają wysoką wiarygodność zastosowanej techniki ultradźwiękowej PA+TOFD, 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 dodatkowe informacje ze stref przypowierzchniowych uzyskiwane głowicami pracującymi w modzie PA, które stanowią o poprawności interpretacji wyników badania.



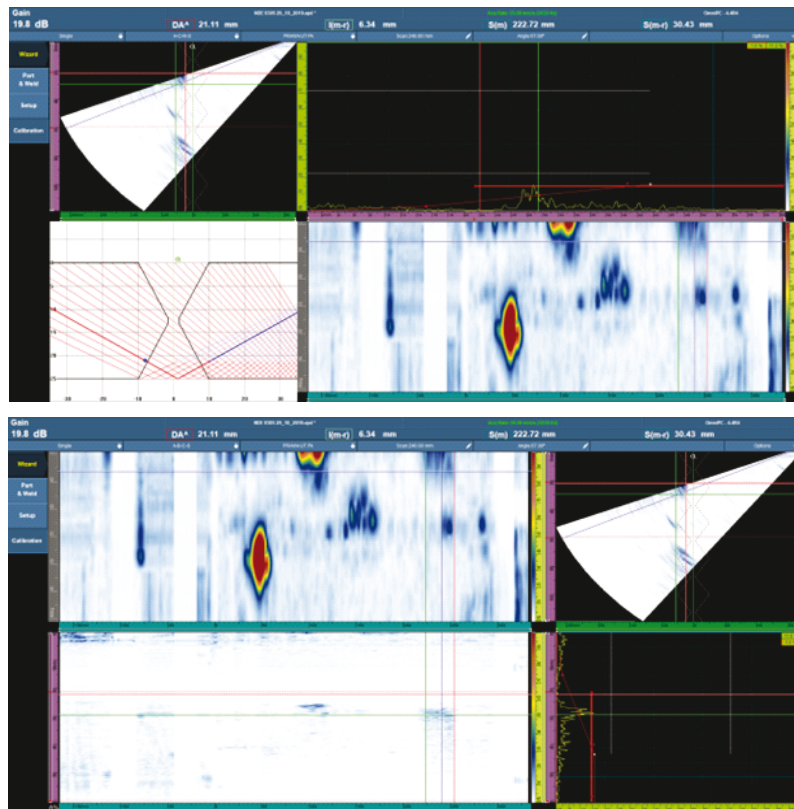
Rys. 17. Zobrazowanie cyfrowe radiogramu tej wady ($x = 216 + 32$ mm) - próbka walidacyjna.

Fig. 17. Digital radiograph with imperfection image ($x = 216 + 32$ mm) - validation specimen.



Rys. 18. Zobrazowania i wymiary tej wady ($x = 222,3 + 31,6$ mm; $z = 24$ mm) wg skanu próbki walidacyjnej głowicą PA(DS).

Fig. 18. Layout of PA(DS) scans on validation specimen – localization and dimensioning of flaw ($x = 222,3 + 31,6$ mm; $z = 24$ mm).



Rys. 19. Zobrazowania i wymiary tej wady ($x = 222,7 + 30,4$ mm; $z_3 = 21,1$ mm) wg skanu próbki walidacyjnej głowicą PA(US).

Fig. 19. Layout of PA(US) scans on validation specimen – localization and dimensioning of flaw ($x = 222,7 + 30,4$ mm; $z_3 = 21,1$ mm).

7. Podsumowanie końcowe

Doświadczenia nabyte przez firmę NDTEST podczas wdrażania techniki PA+TOFD dla badania złączy spawanych potwierdzają, że stanowi ona istotny krok naprzód w stosunku do klasycznych technik radiograficznych i ultradźwiękowych, jak również stosowanej dotychczas w badaniu rurociągów - zaawansowanej techniki wielogłowicowej (głowice klasyczne jednoprzetwornikowe) TOFD+PE [1].

Należy tu podkreślić, że wdrożenie techniki PA+TOFD do praktyki przemysłowej wymaga pokonania szeregu barier technicznych i merytorycznych, związanych zarówno z mechanizacją procesu badania w ciężkich warunkach terenowych, jak też umiejętnością analizy wzajemnie powiązanych obrazowań cyfrowych typu TOFD oraz PA.

Jako podstawowe elementy procesu wdrażania techniki PA+TOFD należy wymienić:

- kwalifikację procedury badania w oparciu o próbkę referencyjną zapewniającą wykrycie i wymiarowanie wszystkich wymaganych reflektorów w zakresie wyznaczonej objętości badania;
- walidację systemu badawczego na próbce o znanej lokalizacji i rozmiarach wad, z zapewnieniem elementów powtarzalności i odtwarzalności wyniku, co stawowi o wiarygodności systemu i uzyskiwanych wyników.

Uwzględniając wymagania dokumentów normatywnych dla wybranych poziomów techniki badania TOFD oraz PA a także doświadczenie firmy NDTEST weryfikację nastaw najlepiej opierać na przygotowanych wcześniej próbkach odniesienia, wykonanych z materiału obiektu badanego z zachowaniem wymiarów geometrycznych (grubości i krzywizny badanego złącza).

Jako podstawowe zalety cyfrowej i zmechanizowanej techniki skanowania PA+TOFD (rys. 1) należy wymienić:

- zmniejszona awaryjność systemu ze względu na integrację aparatu na skanerze (sygnał cyfrowy przesyłany kablem ethernetowym do jednostki sterującej);
- możliwość badania złączy dla różnych średnic (tu zakres od DN 500÷1400 mm) o grubościach od 6 do 40 mm, przy stosunkowo niewielkim wzroście nakładu środków i pracochłonności;
- duża wydajność badania, nieznacznie zależną od grubości złączy – do 50÷60 złączy w ciągu dnia roboczego;
- pełny zapis cyfrowy wyników badania z całej objętości złącza i ocena wyniku badania w czasie rzeczywistym online;
- analizę wyników (również zdalnie na odległość) z możliwością dokładnego pomiaru położenia, długości, oraz głębokości i wysokości wad przy pomocy specjalnego oprogramowania;

- możliwość oceny fizycznych (zblizonych do rzeczywistych) rozmiarów wskazań (wysokość i długość);
- obrazowanie 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.

Technika PA+TOFD z użyciem zintegrowanego zmechanizowanego skanera (rys. 1) została efektywnie wdrożona po raz pierwszy w Polsce przez NDTEST w roku 2019/20. Zintegrowany system PA+TOFD będzie stosowany dla badania obiektów rurociągowych o dużym zróżnicowaniu średnic i grubości, na różnego rodzaju instalacjach w przemyśle gazowniczym i petrochemicznym.

8. Literatura

- [1] M. G. Silk: Accurate crack depth measurements in welded assemblies, Eighth World Conference on Nondestructive Testing, September 1976;
- [2] Mackiewicz S., Górzny J., Kiersnowski M., Pawłowski Z., Ultrasonic detection and depth measurement of cracks in thick welds., XI World Conference on Non-Destructive Testing, Las Vegas 1985;
- [3] Ed Ginzel: Ultrasonic Time of Flight Diffraction Book – 1st Edition, 2012, Eclipse Scientific, 260 pages
- [4] Ed Ginzel: Phased Array Ultrasonic Technology - 2nd Edition 2019, Eclipse Scientific, 362 pages
- [5] Ed Ginzel: Automated Ultrasonic Testing of Pipeline Girth Welds - 2nd Edition 2020, Eclipse Scientific, 322 pages
- [6] M. Śliwowski: Podstawy zaawansowanej technologii phased-array. Podstawy i zastosowania, wydanie 1, Warszawa 2021 stron 473
- [7] M. Śliwowski: Zmechanizowane badanie ultradźwiękowe złączy spawanych techniką wielogłowicową (TOFD+PE), Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane 2013
- [8] PN-EN ISO 13588:2019-04:2011, Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe. Stosowanie zautomatyzowanej techniki głowicy mozaikowej
- [9] PN-EN ISO 10863:2011: Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania ultradźwiękowe – Zastosowanie techniki dyfrakcji fal ultradźwiękowych (TOFD)
- [10] PN-EN ISO 19285:2017-11, Badania nieniszczące spoin. Technika ultradźwiękowe techniką głowicy mozaikowej (PAUT). Kryteria akceptacji
- [11] PN-EN ISO 15626:2014-01, Badania nieniszczące spoin. Technika czasu przejścia wiązki dyfrakcyjnej (TOFD). Poziomy akceptacji