

Marek Śliwowski*
NDTEST Warszawa

Dyfrakcyjna ultradźwiękowa technika TOFD – nowe spojrzenie i wdrożenia

Diffraction ultrasonic TOFD technique – new look and applications

STRESZCZENIE

Historycznie rozwój klasycznej ultradźwiękowej techniki TOFD koncentrował się na wykrywaniu i określaniu rozmiarów wad w spoinach. Wykorzystywała ona dwie głowice umieszczone przeciwobnie po obu stronach spoiny – jedna działała jako nadajnik, a druga jako odbiornik. Taka konfiguracja miała na celu uniknięcie sygnałów o wysokiej amplitudzie często związanych z silnymi odbiciami, a zamiast tego preferuje rejestrację sygnałów dyfrakcyjnych pod warunkiem zapewnienia aparatury o odpowiedniej rozdzielczości. To rozwiązanie znalazło szerokie zastosowania ze względu na prostotę, szybkość skanowania i możliwości uzyskiwania fizycznych rozmiarów wad. Z drugiej strony poważne ograniczenia stanowiło istnienie tzw. „stref martwych” w obszarach przypowierzchniowych, gdzie obrazy wskazań bywają przysłonięte na znaczące głębokości i w wielu przypadkach identyfikacja oraz wymiarowanie wad jest niemożliwe.

W pracy Ginzela i Volfa [1] z roku 2021 zaprezentowano nowe spojrzenie na możliwości wykorzystania techniki TOFD, rozszerzając rejestrację sygnałów dyfrakcyjnych układem głowic nadawczo-odbiorczych, skonfigurowanych skośnie względem siebie i nazwano ten sposób skanowania techniką TOFD jednej strony albo TOFD delta. Takie podejście pozwala na wyeliminowanie na skanie sygnałów „stref martwych” fali podpowierzchniowej i echa dna, które funkcjonują zawsze w klasycznej wersji TOFD.

W artykule przedstawiono wyniki skanowania układem TOFD jednej strony, pokazując możliwości lokalizacji i wymiarowania wad położonych blisko lub wręcz na powierzchni zewnętrznej, w klasycznych złączach spawanych a także w złączach rur z tworzyw sztucznych.

Bazując na nowo wydanej książce autora [2] podjęto również próbę analizy szacowania głębokości wskazań wykrytych techniką TOFD jednej strony.

Słowa kluczowe: technika TOFD klasyczna, technika TOFD jednej strony (układ delta)

1. Wstęp

Coraz bardziej popularna technika TOFD jest przypisywana pracy Silka i Lidingtona z 1975 roku [3] i innych. Klasyczna technika TOFD wykorzystuje dwie głowice umieszczone po obu stronach spoiny – jedna działała jako nadajnik, a druga jako odbiornik. Taka konfiguracja, oparta na detekcji fal dyfrakcyjnych rozpraszanych do przodu, polega na utrzymaniu przekrojów zawierających osie wiązek w jednej płaszczyźnie i schematycznie przedstawiono ją na Rys. 1.

ABSTRACT

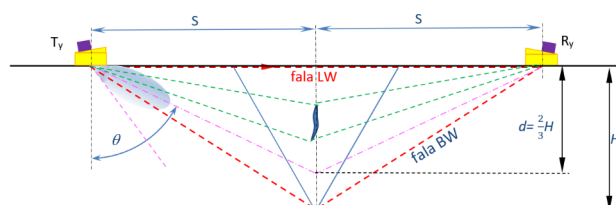
Historically, the development of the conventional ultrasonic TOFD technique focused on the detection and sizing of weld defects. It employed a pair of probes placed oppositely on both sides of the weld—one acting as a transmitter and the other as a receiver. This configuration was intended to avoid high-amplitude signals typically associated with strong reflections (pulsar echo), favouring instead the detection of diffracted signals, provided that equipment with adequate resolution was used. This approach gained wide application due to its simplicity, fast scanning capabilities, and ability to provide physical sizing of flaws.

In a 2021 study by Ginzle and Volf [1], a new perspective on the capabilities of the TOFD technique was presented. They extended the acquisition of diffracted signals using a probe arrangement with angled transmitter and receiver placed on the same side of the weld. This configuration, referred to as single-sided TOFD or delta TOFD, enables the elimination of near-surface "dead zone" signals and backwall echoes that are always present in the conventional TOFD setup.

This paper presents the results of scanning using the single-sided TOFD arrangement, demonstrating the potential for detecting and sizing flaws located near or directly on the outer surfaces—in conventional welded joints as well as in plastic pipe joints.

Based on the author's recently published book [2], an attempt was also made to analyse depth estimation of indications detected using the single-sided TOFD technique.

Keywords: classical TOFD technique, single-sided TOFD (delta configuration) technique



Rys. 1 Podstawowy układ dla przebiegu fal podłużnych L przy symetrycznym skanowaniu złącza spawanego klasyczną techniką TOFD. Zobrazowanie wyników zawiera zawsze referencyjne sygnały przejścia: fali podpowierzchniowej LW oraz fali echa dna BW. Zielonymi liniami zaznaczono sygnały dyfrakcyjne, generowane na krawędziach wady.

Fig. 1 The fundamental configuration for longitudinal wave (L) propagation in symmetrical scanning of welded joint using the conventional TOFD technique. The result image consistently includes reference transmission signals: the lateral wave (LW) and the backwall echo (BW). Diffraction signals originating from defect edges are indicated with the green lines.

*Autor korespondencyjny.

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

Ze względu na prostotę, szybkość skanowania i możliwości uzyskiwania fizycznych rozmiarów wad a także dzięki komputerowemu sterowaniu cyfrowych sygnałów to rozwiązanie znalazło szerokie zastosowania w badaniach nieniszczących połączeń spawanych w obiektach przemysłowych. Widoczne na Rys. 1 sygnały fali podpowierzchniowej LW oraz echa dna BW są z jednej strony zaletą, gdyż występują zawsze i stanowią odniesienie referencyjne dla badanej objętości złącza. Jednocześnie z drugiej strony sygnały te powodują poważne ograniczenia poprzez generowanie tzw. „stref martwych” w obszarach przypowierzchniowych.

Fala LW jest generowana jako brzegowa fala wiązki głowicy szerokopasmowej i z powodu szerokiego widma częstotliwości fali podpowierzchniowych LW jest niższa od centralnej częstotliwości głowicy i ograniczenie strefy martwej sprowadza się do minimalizacji czasu trwania impulsu i jest trudne do opanowania, nawet przy zastosowaniu dobrze wytłumionych głowic szerokopasmowych.

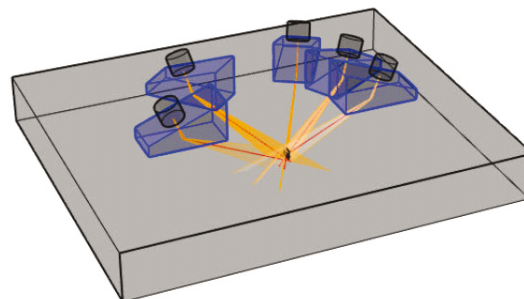
Jest to przyczyna znacznie większej szerokości czasowej sygnału LW niż wynikałoby to z częstotliwości nominalnej głowicy, a co za tym idzie zwiększonej strefy martwej (nawet rzędu kilku mm). Może ona zakrywać sygnały wad w pobliżu powierzchni skanowania, gdzie rozdzielczość podlega znaczącej kompresji głębokości w klasycznej technice TOFD, ze względu na nieliniową zależność od czasu przejścia po drodze typu V.

Sygnały wad w pobliżu powierzchni dna BW (naprzeciwległej do powierzchni skanowania) mogą być również przykryte przez strefę martwą, gdzie należy wziąć pod uwagę błąd oceny właściwego impulsu sygnału fali echa dna BW bądź interferencji sygnału wady bi echa BW. Błędy oceny przypowierzchniowej strefy martwej dna są mniejsze z powodu dużo większej rozdzielczości szacowania głębokości. Dla zainteresowanych tymi problemami odsyłam do obszernej monografii autora [2].

Wracając do nowego spojrzenia na techniki dyfrakcyjne już Charlesworth i Temple [4] zauważyli, że jeśli w technice echa, wykorzystującej pojedynczą głowicę dokonuje pomiaru czasu przejścia i amplitudy sygnału opiera się głównie na energii fal dyfrakcyjnych, a nie na echu odbitym, ich zdaniem nie ma powodu, aby nie zaliczać tego do techniki TOFD (odpowiada to przypadkowi opisanej wcześniej tzw. „dyfrakcji wstecznej” i można ją zaobserwować w określonych sytuacjach przy stosowaniu techniki echa dla głowic jednoprzetwornikowych). W tym kontekście pojęcie klasycznej techniki TOFD jedynie do układu dwugłowicowego, opartej na detekcji fal dyfrakcyjnych poprzez rozpraszanie w przód, może być rozszerzone.

W pracy Ginzela i Volfa [1] z roku 2021 zaprezentowano nową wersję wykorzystania techniki TOFD, rozszerzając rejestrację sygnałów dyfrakcyjnych układem głowic nadawczo - odbiorczych, skonfigurowanych skośnie względem siebie. Dopóki energia dyfrakcyjna jest odbierana z tej samej powierzchni, na której została wygenerowana, można to uznać za technikę dyfrakcyjną TOFD.

Pomijając znane wcześniej podejście z pojedynczą głowicą (tzw. „backscattering”), możemy uznać, że rozszerzenie techniki TOFD obejmuje wykrywanie rozproszonej energii dyfrakcyjnej niezależnie od wzajemnej orientacji głowic. Rys. 2 przedstawia ilustrację takiej sytuacji badawczej.



Rys. 2 Nadawanie i odbiór sygnałów dyfrakcyjnych TOFD może się odbywać po skośnej trajektorii w zakresie kąta między głowicami 0° do 180°. Wykorzystano rysunek z pozycji [1]

Fig. 2 The transmission and reception of TOFD diffraction signals may be detected on the oblique trajectory within the probe angle range of 0° to 180°. The figure is reproduced from reference [1]

Pomijając znane wcześniej podejście z pojedynczą głowicą (tzw. „backscattering”), możemy uznać, że rozszerzenie techniki TOFD obejmuje wykrywanie rozproszonej energii dyfrakcyjnej niezależnie od wzajemnej orientacji głowic. Rys. 2 przedstawia ilustrację takiej sytuacji badawczej.

Poddawanie inspekcji układami nadawczo - odbiorczymi po tej samej stronie spoiny nie jest nową koncepcją. Głowice podwójne TRL (normalne i kątowe) były od dawna stosowane do badania materiałów o gruboziarnistej strukturze, ale wykorzystywano je głównie do wykrywania reflektorów przy pomocy sygnału odbitego.

Zastosowania techniki TOFD z głowicami po tej samej stronie nie są znacząco rozpowszechnione w Ameryce Północnej i większości krajów Europy Zachodniej, znalazły natomiast wdrożenia w Rosji przy badaniu spoin, jako tzw. technika „quasi-tandem”. Pomimo licznych rosyjskich publikacji opisujących ten proces (których nie cytuję się tu ze względu na brak dostępu), autorzy omawianej publikacji [1] stwierdzają, że żadna z nich nie przedstawiła rzeczywistych danych pomiarowych ani sposobu ich analizy. W dalszej części będziemy używać skróconej nazwy technika TOFD z jednej strony lub TOFD delta, w zależności od aplikacji.

W artykule przedstawiono wyniki skanowania układem TOFD jednej strony, zaczerpnięte z pracy [1], pokazując możliwości lokalizacji i wymiarowania wad w złączach rur z tworzyw sztucznych w a także klasycznych metalowych złączach spawanych.

2. Przygotowanie badania z wykorzystaniem techniki TOFD z jednej strony

2.1 Ograniczenia dla skośnego skanowania

Dla wad płaskich, które leżą w płaszczyźnie przechodzącej przez osie wiązek głowicy nadawczej i odbiorczej, ale ich konfiguracja nie jest korzystna (prostokąta do osi wiązek) dla powstawania ech odbitych, badanie ultradźwiękowe

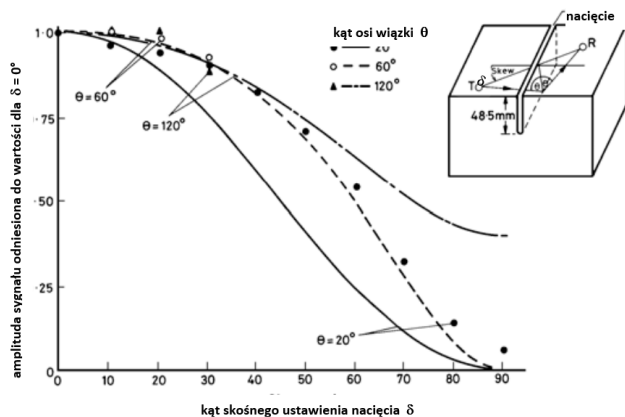
w tym przypadku jest utrudnione lub niemożliwe.

W tej sytuacji jedynym skutecznym sposobem wykrywania i wymiarowania wad okazała się klasyczna technika TOFD, oparta na rejestracji ech dyfrakcyjnych, generowanych na konturach wad.

Obliczenia w pracy [4] zostały przeprowadzone dla sztucznego dyfraktora w postaci nacięcia (Rys.3), który pozostaje cały czas w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni skanowania dla głowic TOFD, pracujących w klasycznym układzie nadawczo-odbiorczym do przodu. Natomiast poziom sygnału dyfrakcyjnego jest obliczany dla różnych kątów wprowadzenia osi wiązki w zakresie $\theta = 20^\circ \div 65^\circ$, przy zmieniającym się kącie skośnego ustawienia płaszczyzny głowic względem normalnej do płaszczyzny nacięcia w zakresie $\delta = 0^\circ \div 90^\circ$ (skew angle – por. Rys.3).

Eksperymentalne potwierdzenie przeprowadzono na nacięciu wykonanym na głębokość 48,5 mm w bloku stalowym i pokazano w postaci punktów pomiarowych na Rys. 3. Szerokość nacięcia $b = 0,4$ mm, zakończone na półokrągło, czyli spełnia warunki dyfraktora $b \leq \lambda_{L,Fe}$ (długość fali $\lambda_{L,Fe} = 5,92$ mmMHz/5MHz = 1,2 mm). Kąt obrotu nacięcia do wartości $\delta = 60^\circ$ ma stosunkowo niewielki wpływ na amplitudę sygnału TOFD, dopiero przy kącie $\delta = 90^\circ$ sygnał spada do zera.

Wyniki doświadczalne potwierdzają, że zauważalny spadek sygnału zaczyna się od skośnego ustawienia nacięcia $\delta = 30^\circ$. Stąd też wypływa oczywisty wniosek, że technika TOFD delta może być z powodzeniem stosowana w zakresie kąta skosu do $2\delta = 60^\circ$ (por. Rys. 4) oraz kątów wprowadzenia wiązki w zakresie $\theta = 20^\circ \div 75^\circ$.



Rys. 3 Zależność amplitudy sygnału dyfrakcyjnego TOFD kąta δ obrotu nacięcia, wychodzącego z powierzchni skanowania na głębokość 48,5 mm. Punkty są wartościami doświadczalnymi, linie wynikami obliczeń w oparciu o teorię GTD (Geometrical Theory of Diffraction) - wykorzystano rysunek z pozycji [4] z pewnymi modyfikacjami autora w pracy [2].

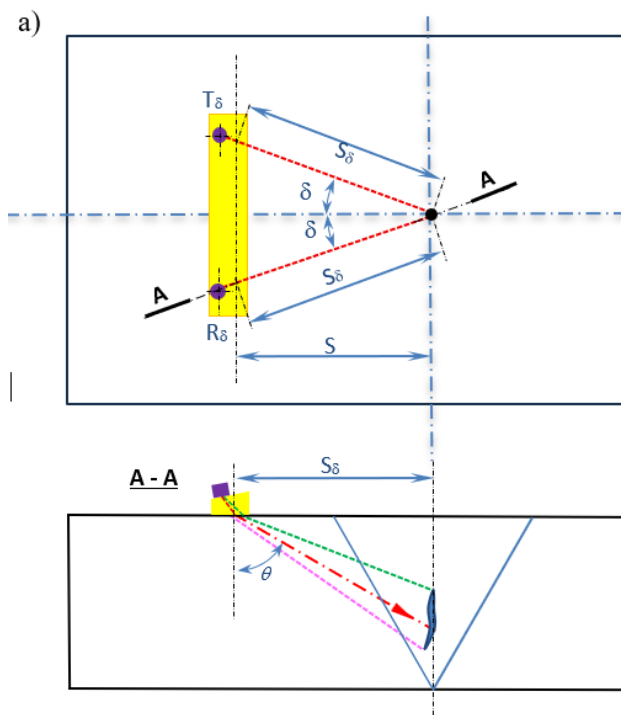
Fig. 3 Dependence of the TOFD diffraction signal amplitude on the tilt angle δ of a notch originating from the scanning surface to a depth of 48.5 mm. The points represent experimental values, while the lines correspond to calculations based on the Geometrical Theory of Diffraction (GTD). The figure has been adapted from reference [4] with certain author's modification in reference [2].

2.2 Konfiguracja przebiegu sygnałów i przygotowanie skanera w układzie TOFD delta

Na Rys. 4a) przedstawiono konfigurację przebiegu linii osi głównej wiązki ultradźwiękowej głowic nadajnika oraz odbiornika zamontowanych w klinie w taki sposób, aby w rzucie z góry tworzyły kąt skosu 2δ , a jednocześnie kąt wprowadzenia osi wiązki do materiału badanego, mierzonej w płaszczyźnie prostopadłej do badanego materiału i nachylonej pod kątem δ do osi złącza wynosił θ , zarówno dla nadajnika jak i odbiornika (por. przekrój A-A na Rys. 4a).

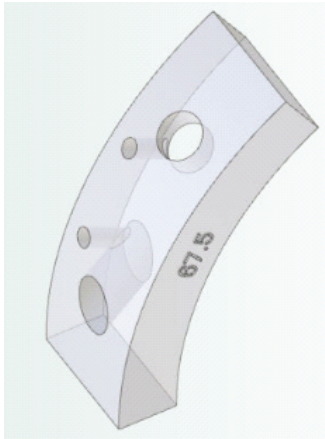
Należy zwrócić uwagę, że separacja głowic S scharakteryzowana jest płaszczyznach centralnych osi wiązek – nachylonych względem siebie pod kątem 2δ i dotyczy to przypadku lokalizacji dyfraktora na osi symetrii.

Taki układ kontroli wiązki nadawczo-odbiorczej w układzie TOFD delta zapewnia się na ogół przez odpowiednie zaprojektowanie klina z plexi (rexolitu) i jego praktyczną realizację pokazano na Rys. 4b), gdzie dodatkowo zastosowano dopasowanie do krzywizny badanej rury i doprowadzenie zasilania wodnego pod klin.



Rys. 4a) Trajektoria przebiegu osi wiązki w układzie TOFD delta w widoku z góry i w przekroju pionowym centralnej osi wiązki. Nadawanie - odbiór sygnałów dyfrakcyjnych z górnego (zielona linia) oraz dolnego (różowa linia) wierzchołka wady zachodzi również w układzie delta.

Fig. 4a) Beam axis trajectory in the TOFD delta configuration, shown in top view and vertical cross-section along central beam axis. The transmission and reception of diffraction signals from the upper (green line) and lower (pink line) crack tips also occur in the delta arrangement.



Rys. 4b) Klin z rexolitu do układu TOFD delta z zasilaniem wodnym i dopasowaniem do rury wg [1].

Fig. 4b) Rexolite wedge for the TOFD delta configuration with water feeding and pipe diameter adaptation according to [1].

W projektowaniu niektórych aplikacji ustawień skanerów wykorzystano oprogramowanie symulacyjne stosowane w badaniach nieniszczących CIVA - w celu optymalizacji kąta skosu wiązki w układzie delta, odległości separacji głowic PCS = S oraz kątów wprowadzenia wiązki do obiektu. Próby te potwierdziły zdolność techniki TOFD delta do zapewnienia lepszej rozdzielczości w pobliżu powierzchni zewnętrznych badanych obiektów.

3. Zastosowanie techniki TOFD delta do badania złącza doczołowego HDPE

3.1 Próbką referencyjną - dobór skanera i walidacja CIVA

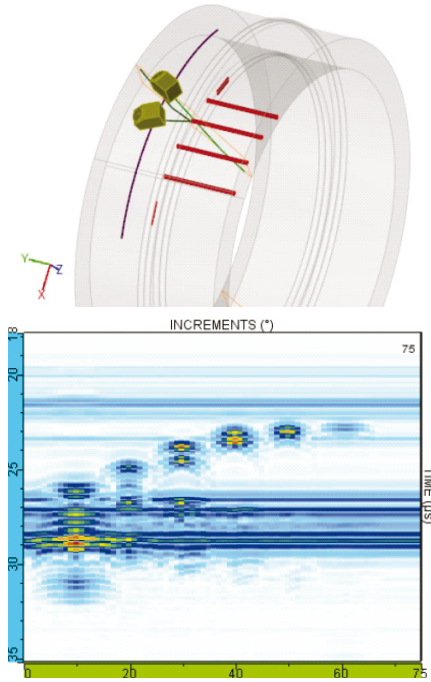
Parametry użyte do zaprojektowania parametrów ustawienia głowic w klinie skanera TOFD delta zostały określone za pomocą symulacji CIVA.

Rys.5a przedstawia projekt rozmieszczenia układu głowic na bloku kalibracyjnym (który stanowi fragment złącza zgrzewanego HDPE), z zasymulowanymi reflektorami w postaci otworów typu FBH (reflektory tarczowe $D_{DSR} = 2$ mm, wykonane na różnych głębokościach złącza w osi spoiny) i nacięć o wysokości $h_{notch} = 1$ mm na powierzchniach zewnętrznych rury.

Przy walidacji CIVA dobrano konfigurację wiązki wprowadzanej do obiektu pod kątem $\theta = 67,5^\circ$ i kątem skosu głowic wynoszącym $2\delta = 50^\circ$ w układzie symetrycznym, tak aby osie wiązek w układzie delta przecinały się na osi symetrii złącza (patrz konfigurację wiązki na Rys. 5a).

Na Rys. 5b) pokazano wykonaną przez CIVA symulację B-scanu dla omówionej konfiguracji skanera TOFD delta i wykrycie reflektorów referencyjnych, które będą zaimplementowane w rzeczywistej próbce referencyjnej.

Na podstawie badań symulacyjnych wykonano klin o właściwej geometrii, w którym zamontowane były przetworniki okrągłe wprowadzające fale o kącie skosu $2\delta = 50^\circ$ oraz kącie wprowadzenia wiązki $\theta = 67,5^\circ$. Klin zapewniał sprzężenie wodne i dopasowanie do powierzchni zewnętrznej rury o średnicy nominalnej 6 cali (por. Rys. 4b).



Rys. 5a) Symulacja doboru parametrów i przebiegu wiązek w skanerze TOFD delta

5b) Walidacja wskazań reflektorów na próbce kalibracyjnej złącza rury HDPE-wg pozycji [1].

Rys. 5a) Simulation of parameter selection and beam trajectory in TOFD delta scanner.

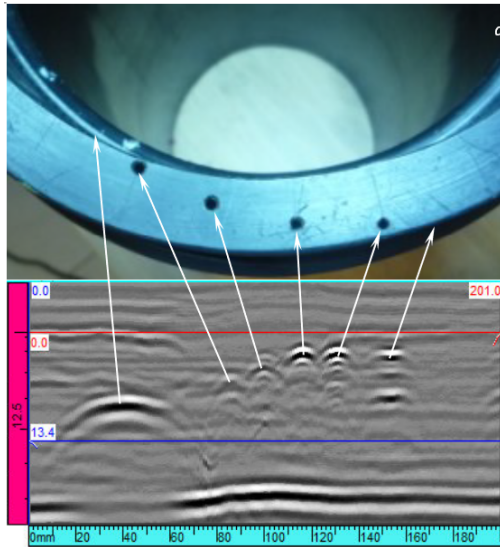
5b) Validation of reflector indications on the calibration block of HDPE joint pipe – acc. to [1].

W celu przeprowadzenia poprawnych nastaw dla badania złączy zgrzewanych HDPE przygotowano specjalny blok kalibracyjny (por. Rys. 6a) z reflektorami w postaci otworów typu FBH (reflektory $D_{DSR} = 2$ mm, wykonane na różnych głębokościach w osi złącza zgrzewanego HDPE) i nacięć o wysokości $h_{notch} = 1$ mm na powierzchniach zewnętrznych rury.

Poniżej na Rys. 6b) przedstawiono wynik skanowania wzorca kalibracyjnego na obrazowaniu B-scan TOFD delta, na którym potwierdzono wykrycie wszystkich zaimplementowanych reflektorów kalibracyjnych. Należy podkreślić, że wykryto bez problemu wskazania podpowierzchniowe, ponieważ w technice TOFD delta nie generują się referencyjne echa fali LW oraz echa dna BW.

Z kolei na Rys. 7 zamieszczono wyniki skanowania złącza doczołowego HDPE o średnicy nominalnej 6 cali (150 mm), wykonane techniką TOFD delta z każdej strony połączenia. Zobrazowania typu B-scan podłużny zawierają wyniki dla pełnego obwodu złącza.

Oprócz znanej wady w postaci wtrącenia w środkowej strefie złącza wykryto również znaczną nieakceptowaną nieciągłość przyklejenia warstw o długości około 90 mm. Wyniki potwierdzono w skanach z obydwu stron, ale ich obrazy nie są identyczne, co sugeruje konieczność przeszukiwania z obydwu stron połączenia jako zasadę.

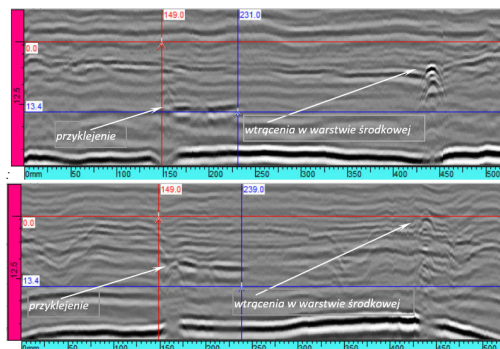


Rys. 6a) Blok kalibracyjny dla złącza zgrzewanego HDPE rura - 6 cali - reflektory $D_{DSR} = 2$ mm wewnętrzne i nacięcia $h_{notch} = 1$ mm na powierzchniach zewnętrznych.

Fig. 6a) Reference blok of HDPE joint, pipe - 6 inch. Reflectors FBH $= D_{DSR} = 2$ mm and notches $h_{notch} = 1$ mm on the in-/outside surfaces

Rys. 6b) Blok kalibracyjny dla złącza zgrzewanego HDPE - obrazowanie B-scan-TOFD ze wskazaniem wszystkich reflektorów referencyjnych. - wg [1]

Fig. 6b) Reference block of HDPE joint pipe 6 inch. B-scan-TOFD images with all reference reflectors – according to [1].



Rys. 7. Wynik badania obwodowego złącza doczołowego w rurze HDPE. Zobrazowanie B-scan górne skanowanie TOFD delta z lewej strony, dolne zobrazowanie B-scan skanowanie TOFD delta z prawej strony. Można zaobserwować różne charakterystyki wad dla skanowania układem delta z przeciwnych stron. Sugeruje to, że jeśli to możliwe, należy przeprowadzać badanie z obu stron złącza. Wykorzystano rysunek z pozycji [1].

Fig. 7. Result of the circumferential butt weld inspection in an HDPE pipe. The upper B-scan represents TOFD-delta scanning from the left hand side of joint, while the lower B-scan corresponds to TOFD-delta scanning from the right hand side of joint. Different defect characteristics can be observed depending on the scanning side, which suggests that, whenever possible, the inspection should be performed from both sides of the joint. The figure is adapted from reference [1].

4. Zastosowanie techniki TOFD delta do badania płyty stalowej spawanej

4.1 Próbką demonstracyjną płyty spawanej – dobór parametrów i walidacja CIVA

Typowa wadliwa próbka spawana z blach stalowych, używana do szkolenia, została wykorzystana do demonstracji wykrywalności techniki TOFD delta na doczołowym złączu spawanym. Płyta miała grubość 16 mm i zawierała pojedynczą spoinę czołową typu V z trzema zaimplementowanymi wadami wewnętrznymi.

Charakterystyka trzech wad została opisana w Tab. 1.

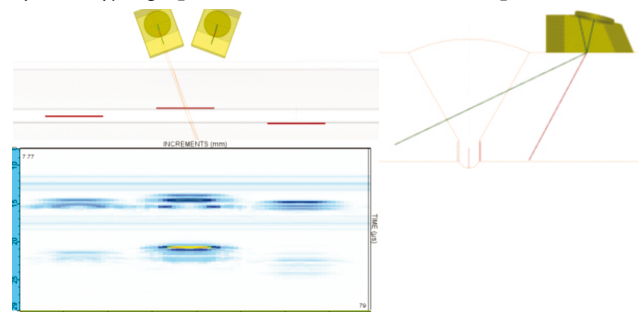
Tab. 1. Charakterystyka wad.

Tab. 1. Flaws characteristics

Wada	Rodzaj wady	Długość [mm]	Wysokość [mm]	Offset wzgl. osi spoiny [mm]	Położenie względem brzegu złącza [mm]	Głębokość [mm]
1	Przylejenie	13	4	1,5	86	12
2	Pęknięcie w przetopie	18	5	-1,5	173	11
3	Brak przetopu	23	4	0	226	12

Parametry skanowanie stalowej płyty, użytej do demonstracji możliwości wykrywania przez technikę TOFD delta dedykowanych wad w złączu spawanym (por. tabela powyżej), zostały również dobrane w programie symulacyjnym CIVA.

Zasymulowane przetworniki miały średnicę $D = 6$ mm i częstotliwość $f = 5$ MHz. Kąt skosu między głowicami wynosił $2\delta = 40^\circ$, a wiązka fali podłużnej L , wprowadzona pod kątem $\theta = 66^\circ$ do płyty stalowej, została użyta do symulacyjnego potwierdzenia obrazu wad w spoinie.



Rys. 8 Symulacja CIVA dla skanowania TOFD delta w stalowej próbce demonstracyjnej o grubości 16 mm z wadami w spoinie o kształcie V. Wykorzystano rysunek z pozycji [1].

Rys. 8 CIVA simulation for the TOFD-delta scanning in a 16 mm thick steel demonstration sample with V-shaped weld defects. The figure is adapted from reference [1].

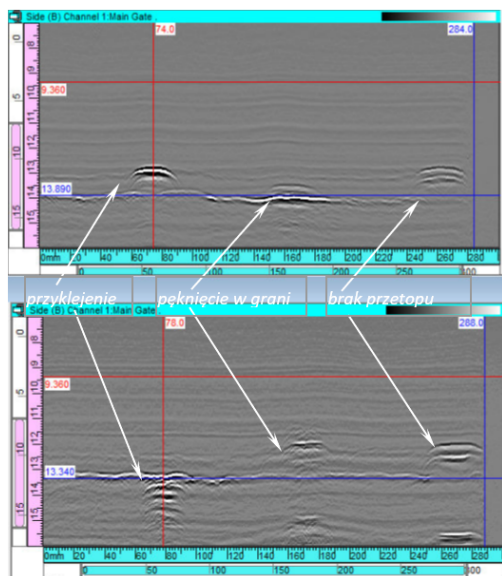
Na wykonanej przez CIVA symulacji B-scanu dla omówionej konfiguracji skanera TOFD delta (por. Rys. 8) potwierdzono dobre wykrywanie układem TOFD delta wad zaimplementowanych w próbce demonstracyjnej z niewielkimi odstępstwami wykrytych wskazań od rzeczywistych położenia czasowych wad. Symulacja potwierdza również echa tych wad po ich konwersji na fale poprzeczne, szczególnie silne dla pęknięcia w grani spoiny.

4.2 Zastosowanie techniki TOFD delta do badania płyty stalowej spawanej

W przeciwieństwie do złączy polietylenowych rur HDPE wykonanych metodą zgrzewania doczołowego tworzących spoinę w postaci pierścienia obwodowego o szerokości $2 \div 3$ mm, gdzie większość wad występuje w pobliżu osi po obu stronach osi spoiny, w stalowym złączy typu V mogą występować przyklejenia na linii wtopienia (lub wady w strefie wpływu ciepła HAZ) w znaczącej odległości od osi spoiny.

Dlatego, chociaż wystarczające jest skanowanie tylko z jednej strony spoiny, istnieje niepewność co do precyzji głębokości wskazania. Dlatego też na Rys. 9 przedstawiono wyniki skanowania TOFD delta z obydwu stron spoiny: górny B-scan z lewej strony osi i dolny B-scan – z prawej strony osi.

Parametry użyte do zaprojektowania ustawienia głowic w klinie skanera TOFD delta zostały określone za pomocą symulacji CIVA (por. p. 4.1).



Rys. 9 Próbkę spawaną z blach stalowych o grubości 16 mm zawierającą dedykowane wady wewnętrzne. Zobrazowania B-scan TOFD delta głowicami o częstotliwości 5 MHz potwierdzają wykrycie wszystkich wad zarówno z lewej strony – skan powyżej, jak też z prawej strony – skan poniżej. Wykorzystano rysunek z pozycji [1].

Fig. 9 Welded sample made of 16 mm thick steel plates containing artificial internal defects. B-scan TOFD-delta images obtained with 5 MHz probes confirm the detection of all defects, both from the left side (upper scan) and from the right side (lower scan). The figure is adapted from reference [1].

Czerwony kursor na 9,36 μ s znajduje się w przybliżeniu na poziomie powierzchni skanowania materiału badanego (fali podpowierzchniowej LW w klasycznym TOFD) dla obydwu zestawów głowic z lewej i prawej strony.

Widać natomiast wyraźne różnice w odczycie głębokości wady przyklejenia oraz pęknięcia w grani na każdym ze skanów. Autorzy [1] nie podjęli się interpretacji tych różnic.

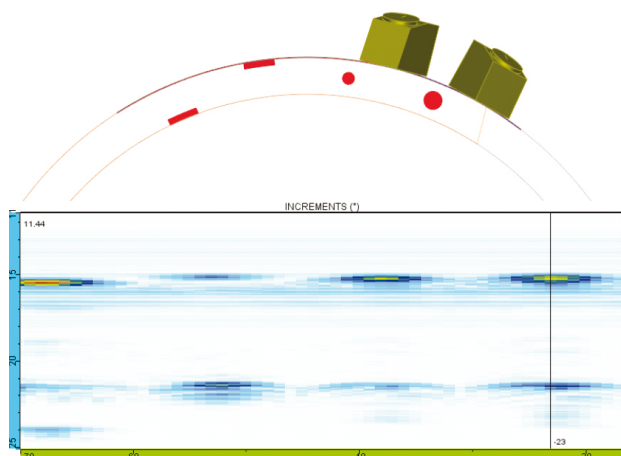
4.3 Badanie rury cienkościenniej techniką TOFD delta – symulacja CIVA

Symulację CIVA wykorzystano również do zaprojektowania parametrów badania cienkościenniej rury stalowej o średnicy ϕ 115 mm i grubości ścianki 6 mm skanerem TOFD delta.

W programie zaimplementowano blok kalibracyjny na wycinku rury ϕ 115 mm (por. dół Rys. 10) z reflektorami w postaci otworów typu FBH (reflektor tarczowy $D_{DSR} = 2$ mm oraz $D_{DSR} = 3$ mm, wykonane w połowie grubości ścianki i takiej długości aby tarcze reflektorów znajdowały się w strefie osi spoiny), a także nacię o wymiarach wysokość $\times$ długość $(h \times l)_{notch} = 1 \times 5$ mm na powierzchniach zewnętrznych, w strefach wpływu ciepła.

Zasymulowane przetworniki do skanera delta miały średnicę $D = 6$ mm i częstotliwość $f = 5$ MHz. Kąt skosu między głowicami wynosił $2\delta = 54^\circ$, a wiązka fali podłużnej L wprowadzona do rury z wirtualną spoiną pod kątem $\theta = 75^\circ$. Czas przejścia między echemi nacięcia wewnętrznego i zewnętrznego wynosi tylko około 0,25 μ s, pomimo tego cała objętość strefy spoiny może być oceniona bez obaw o wpływ strefy martwej.

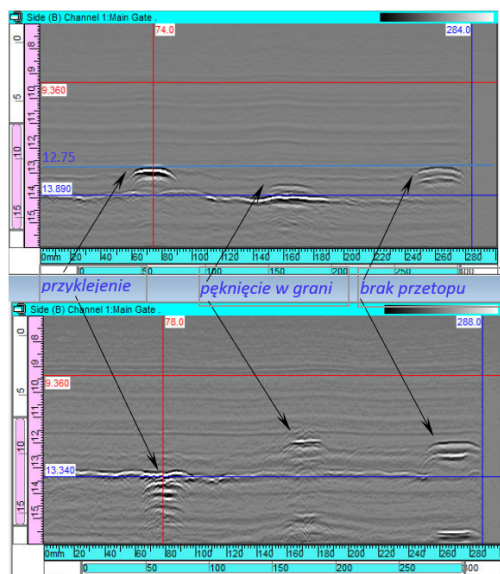
Używając konwencjonalnego zestawu techniki TOFD, nawet przy zastosowaniu głowic 10 MHz, strefa martwa fali podpowierzchniowej LW sięgałaby głębokości 3 mm, a strefa martwa na ścianie tylnej wynosiłaby około 0,9 mm.



Rys. 10 Symulacja CIVA dla skanera TOFD delta na próbce kalibracyjnej złączy w stalowej bloku kalibracyjnym o grubości 6 mm i o średnicy ϕ 115 mm. Walidacja CIVA potwierdziła możliwość detekcji zaimplementowanych reflektorów. Wykorzystano rysunek z pozycji [1]
Fig. 10 CIVA simulation for the TOFD-delta scanner on a calibration weld sample in only 6 mm thick steel calibration block with a diameter of ϕ 115 mm. The CIVA validation confirmed the detectability of the implemented reflectors. The figure is adapted from reference [1].

5. Ocena szacowania głębokości przy położeniu wad z offsetem w technice TOFD delta

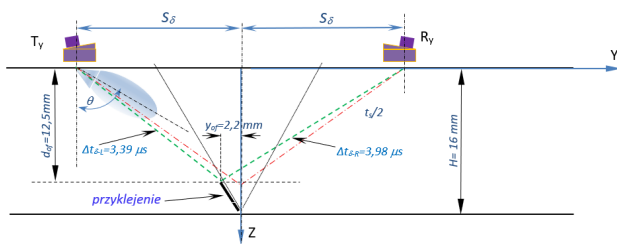
Do szacowania przyjęto położenia czasowe wady typu przyklejenie, dla którego mierzone innymi metodami położenie początku wady oceniono na $d_{LOF} = 12$ mm.



Rys. 11 Zobrazowania B-scan TOFD delta dla oceny głębokości przyklejenia widzianego z lewej strony (skan powyżej) oraz z prawej strony (skan poniżej). Wykorzystano rysunek z pozycji [1].

Fig. 11 B-scan TOFD-delta images for lack of fusion, viewed from the left side (upper scan) and from the right side (lower scan). The figure is adapted from reference [1].

Natomiast w wyniku skanowania TOFD delta zostały określone położenia czasowe wskazania typu przyklejenie z lewej strony $TOFD_{\delta-L} = 12,75$ s oraz położenia czasowe wskazania z lewej strony $TOFD_{\delta-R} = 13,34$ s (por. Rys. 11). Poziomym odniesieniem dla tych sygnałów jest położenie czerwonego kursora $TOFD_{\delta-ref} = 9,36$ μ s i znajduje się w przybliżeniu na poziomie powierzchni skanowania materiału badanego (fali podpowierzchniowej LW w klasycznym TOFD).



Rys. 12 B-scan podłużny niesymetrycznej wady typu przyklejenie – analiza błędów pomiaru głębokości przy położeniu wady z offsetem względem osi spoiny pozwoliła oszacować głębokość zalegania wierzchołka wady $d_{of} = 12,5$ mm oraz offset położenia $y_{off} = -2,2$ m.

Fig. 12 Longitudinal B-scan of an asymmetric lack-of-fusion defect – the analysis of depth measurement errors for a defect located with an offset relative to the weld axis allowed the estimation of the flaw tip depth at $d_{of} = 12.5$ mm and the lateral offset at $y_{off} = -2.2$ mm.

Na tej podstawie odczytano położenia czasowe z poziomu wejścia sygnałów $TOFD_{\delta}$ do materiału badanego $\Delta t_{\delta-L} = 3,39$ s oraz $\Delta t_{\delta-R} = 3,98$ s, odpowiednio z lewej i prawej strony i te zależności czasowe posłużyły do oszacowania rzeczywistej głębokości badanej wady.

Analiza oparta na wykorzystaniu zasady stałego czasu przejścia przy położeniu wady z offsetem względem osi spoiny

została wykonana jak w klasycznym skanowaniu TOFD leżącym w jednej płaszczyźnie. Wymagało to zastosowania zasady uzyskiwania podobnych wyników przy skośnym skanowaniu (por. Rys. 3) oraz dokonania pewnych założeń i uproszczeń wynikających ze skanowania układem TOFD delta dla wad położonych z pewnym offsetem.

Na Rys. 12 przedstawiono B-scan podłużny wykonany układem TOFD delta, w którym wykryto niesymetrycznie położone przyklejenie w demonstracyjnej próbce spawanej o grubości $H = 16$ mm. Tym niemniej pozwoliło to oszacować głębokość zalegania wierzchołka wady $d_{of} = 12,5$ mm oraz offset położenia $y_{off} = -2,2$ mm.

Porównując dane dla tej wady, oszacowane innymi metodami NDT (Tab. 2) należy stwierdzić, że wymiarowanie TOFD delta pozwala uzyskiwać zadowalające wyniki.

Tab. 2 Dane wady oszacowane innymi metodami NDT.

Tab. 2 Flaw data estimated by different NDT techniques.

Wada	Rodzaj wady	Długość [mm]	Wysokość [mm]	Offset wzgl. osi spoiny [mm]	Położenie względem brzozy złącza [mm]	Głębokość [mm]
1	Przyklejenie	13	4	1,5	86	12

6. Podsumowanie

Technika dyfrakcyjna TOFD delta (określana również jako TOFD z jednej strony) wykazała wysoką użyteczność w zakresie wykrywania wskazań. Przy optymalnym kącie skosu między elementami nadajnika a odbiornika można wyeliminować fale podpowierzchniową LW i echa dna BW, które występują w konwencjonalnym TOFD (kąt skosu 180°). Eliminacja fal LW oraz BW poprawia rozdzielczość wykrywania wad w pobliżu powierzchni obiektu badanego.

W artykule zaprezentowano technikę TOFD z jednej strony na ograniczonym zakresie grubości ścianki. Podobnie jak w konwencjonalnym TOFD, rozbieżność wiązki określa zakres grubości, który może pokryć pojedynczy zestaw głowic dla danego kąta osi wiązki. Dla większych grubości wymagane są zwielokrotnione zestawy głowic, podobnie jak w tradycyjnym TOFD. Było to podstawą do zaprojektowania przez firmę Eclipse podwójnego klinów dla techniki TOFD delta, a całość przygotowań była poprzedzona symulacją softwarową CIVA, pozwalającą optymalizować konfigurację wiązki, a badania walidacyjne potwierdziły możliwość detekcji zaimplementowanych reflektorów przy pomocy układów TOFD delta.

Testowanie cienkościennych połączeń przy użyciu dowolnej wersji TOFD może być ograniczone przez rozmiar łoża spoiny. W tradycyjnym TOFD konieczne jest stosowanie dużych kątów osi wiązki, aby zapewnić odpowiednią odległość między przednią ścianką klina a krawędzią łoża. Podobne ograniczenie występuje w przypadku techniki TOFD z jednej strony.

W przeciwieństwie do konwencjonalnego TOFD, gdzie do oszacowania głębokości i wysokości wady można uzyskać prostą zależność z twierdzenia Pitagorasa, parametry związane z techniką TOFD z jednej strony są liczne i nie pozwalają na prostą konwersję czasu przejścia na głębokość wskazania.

Choć dla spoin czołowych rur HDPE szacowanie głębokości wad w pobliżu osi symetrii spoiny może być trafne, to dla stalowych spoin (ukosowanych np. na V) różnica czasu przejścia pomiędzy wskazaniami pojawiającymi w strefie złącza (SWC) po obu stronach osi spoiny, może wprowadzać większe niepewności w ocenie głębokości wskazań.

W pracy podjęto próbę oszacowania położenia głębokości przyklejenia, wykrytego układem TOFD delta z obydwu stron spoiny. Z oceny czasów przejścia wynikało, że wierzchołek wady jest położony z pewnym offsetem po lewej stronie osi spoiny. Analiza oparta na wykorzystaniu zasady stałego czasu przejścia pozwoliła na określenie głębokości zalegania wierzchołka oraz niesymetrii wady o wartościach zbliżonych do rzeczywistych danych w badanej próbce demonstracyjnej.

7. Literatura

- [1] E.Ginzel, O. Volf Variation on Time of Flight Diffraction, Eclipse Scientific, International Ultrasonic Testing Conference, UT Online 2021
- [2] M. Śliwowski Podstawy cyfrowej techniki TOFD, Warszawa, 2025
- [3] 1) M.G. Silk, B.H.Lidington The potential of scattered or diffracted ultrasound in the determination of crack depth, Non-Destructive Testing, Volume 8, Issue 3, June 1975
- [4] J.P. Charlesworth, J.A.G. Temple Engineering Applications of Ultrasonic Time of Flight Diffraction, Second Edition, Hertfordshire UK, Research Series