

---

**XVI Seminarium**  
**NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW**  
**Zakopane, 9-12 marca 2010**

---

**Marek Śliwowski**  
**NDTEST Warszawa**

## **Badanie złączy spawanych o różnej grubości techniką TOFD**

### **1. Wstęp**

Technika TOFD (Time-Of-Flight Diffraction) wykorzystuje zjawisko dyfrakcji fal ultradźwiękowych do wykrywania i wymiarowania nieciągłości materiału. Od 10 lat jest ona używana w firmie NDTEST i zakres jej stosowania jest systematycznie rozszerzany na badanie złączy spawanych o różnej grubości poprzez coraz nowsze rozwiązania techniczne i powstałe w międzyczasie dokumenty normatywne.

W niniejszym referacie przedstawiono pewne rozwiązania aplikacyjne techniki TOFD, w szczególności zwrócono uwagę na specyfikę doboru nastaw systemu przy badaniu zarówno cienkich oraz grubych spoin. Przedstawiono weryfikację nastaw (zakres i czułość badania) na próbkach odniesienia. Podano podstawowe zasady interpretacji i obróbki cyfrowej wyników badania oraz pokazano przykładowe wskazania od typowych wad spoin. Przedstawiono weryfikację wyników uzyskiwanych techniką TOFD z wynikami badania radiograficznego. Zwrócono uwagę na szereg zalet wynikających z cyfrowego zapisu wyników badania przedstawiając jednocześnie ograniczenia techniki i sposoby radzenia sobie z nimi.

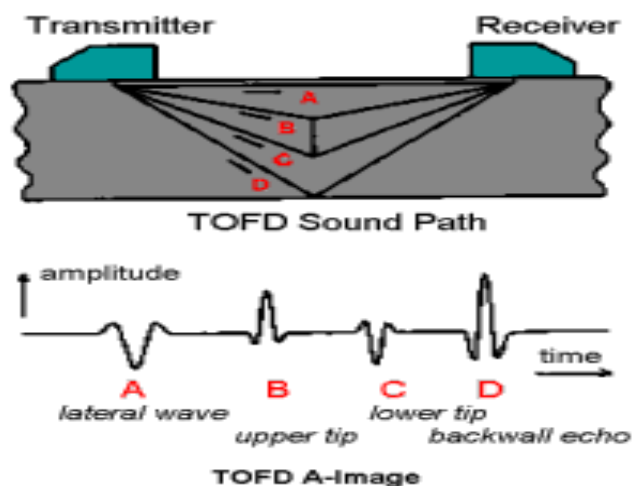
### **2. Podstawy techniki dyfrakcyjnej TOFD dla złącza spawanego**

Generalne zasady techniki TOFD zostały przedstawione w normie **PN-EN 583-6**. Możliwości tej techniki były wcześniej szeroko prezentowane na Seminarium Badań Nieniszczących [1].

W odróżnieniu od standardowych badań ultradźwiękowych spoin techniką echa, w której czas przejścia i amplituda impulsu echa ultradźwiękowego stanowią podstawę do oceny położenia i rozmiarów wykrytej wady, technika TOFD opiera się na precyzyjnym pomiarze czasu przejścia rejestrowanych impulsów, natomiast amplituda impulsu nie ma istotnego znaczenia dla oceny rozmiaru wady, musi być tylko rejestrowalna powyżej poziomu szumów.

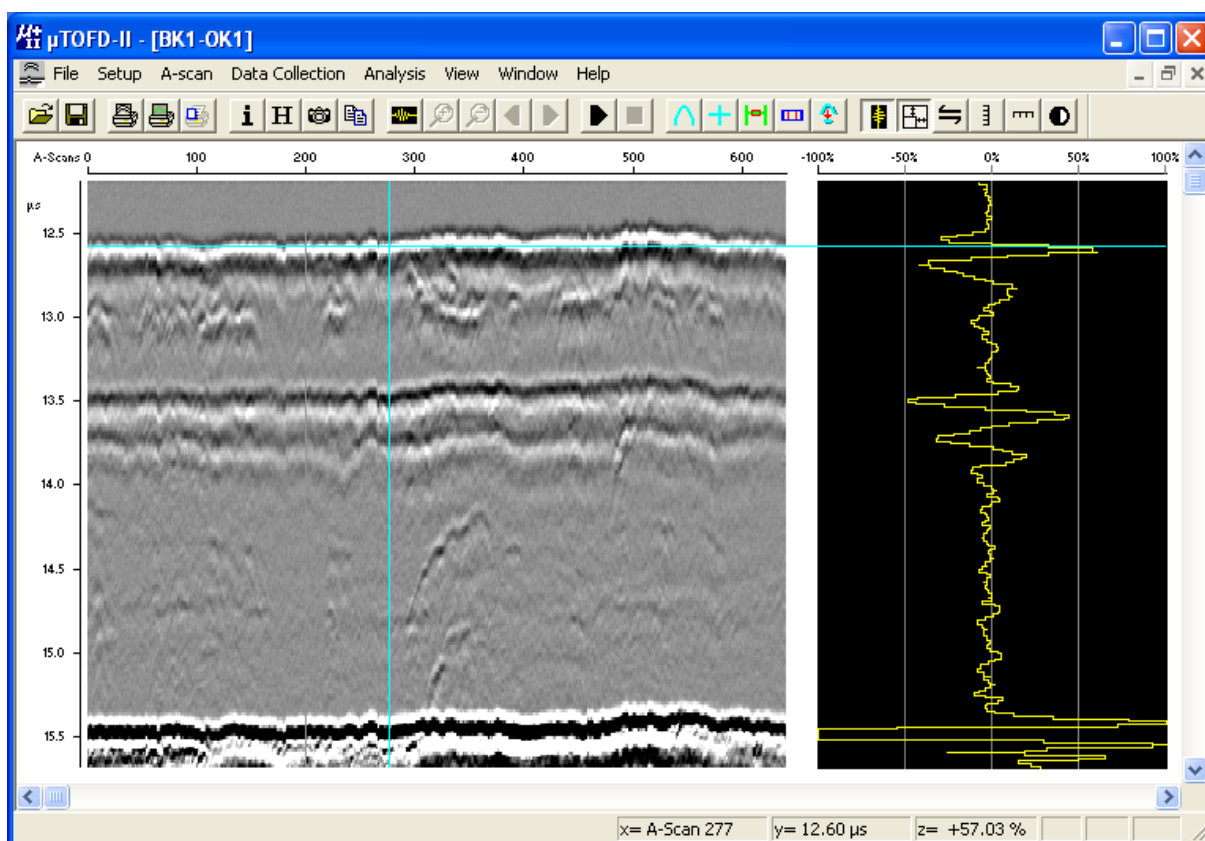
Technika TOFD wykorzystuje oprócz zjawiska odbicia dyfrakcję fal ultradźwiękowych. W czasie badania rejestrowane są impulsy fal ultradźwiękowych ugięte na krawędziach wady. Jest to jedna z zalet tej techniki, gdyż pozwala rejestrować i wymiarować nieciągłości ustawione niekorzystnie do propagacji fali ultradźwiękowej. Schemat pomiarowy dla typowego zestawu TOFD podano na *rys. 1*.

Zestaw pomiarowy składa się z dwóch głowic kątowych na fale podłużnych, ustawionych naprzeciw siebie i pracujących w trybie przepuszczenia. Dla celów techniki TOFD głowice wymagają specjalnego wytlumienia, tak aby długość impulsów odbieranych była możliwie najkrótsza. Głowica nadawcza wytwarza wiązkę fal ultradźwiękowych, która dzięki wymaganej, wysokiej klasie systemu nadawczo-odbiorczego jest odbierana w szerokim zakresie kąta rozbieżności wiązki oraz amplitudy fali. Fale ultradźwiękowe docierają do głowicy odbiorczej po różnych torach i w sekwencji czasowej, oznaczonej na *rys. 1*



Rys.1. Zestaw głowic TOFD i sekwencja przebiegu czasowego impulsów odbieranych

Typowe zobrazowanie TOFD, po cyfrowej obróbce sygnałów, jest złożeniem kolejno rejestrowanych sekwencji obrazowań typu A-bez detekcji wzdłuż kierunku przesuwu głowic. Stosowany komputerowy system ultradźwiękowy, przy obecnych możliwościach zapisu, pozwala na rejestrowanie przebiegów z częstotliwością nawet ułamków części mm badanego złącza.



Rys.2. Przykładowe zobrazowanie TOFD oraz A-scan dla złącza spawanego o grubości ścianki 10/12mm, uzyskany za pomocą urządzenia Microplus firmy NDETEST

Zobrazowanie TOFD, przedstawione na rys. 2, polega na zamianie przebiegu czasowego typu A na stopnie szarości w funkcji czasu przejścia dla amplitudy sygnału (kolor biały poprzez wzrastającą szarość dla malejących ujemnych składowych impulsu do wzrastającego zaczernienia dla rosnących dodatnich składowych impulsu y A-scanu). Zatem występujące po sobie na przemian czarne i białe linie odpowiadają przebiegowi czasowemu kolejnych

impulsów. Z obserwacji przebiegu czasowego impulsów na *rys. 1* widać, że zawsze na zobrazowaniu typu A będą widoczne impuls fali podpowierzchniowej oraz impuls echa dna, jako swego rodzaju sygnały referencyjne. W przypadku gdy w badanej głębokości złącza pojawi się nieciągłość, wówczas na jej wierzchołkach powstają sygnały dyfrakcyjne, które zobrazują się w postaci sekwencji białych-czarnych linii między impulsami referencyjnymi.

Jak widać na *rys. 2* zobrazowanie TOFD, zwane w dalszej części sonogramem, jest liniowe względem osi czasu (pionowej) i przesuwu głowicy. Jednak przedstawienie sonogramu w jednostkach drogi (głębokości złącza) ultradźwiękowej będzie nieliniowe z powodu geometrii przebiegu wiązki ultradźwiękowej typu V dla trybu przepuszczenia.

Reasumując powyższe technika ultradźwiękowa, przy odpowiednim skonstruowaniu zestawu TOFD skanera wyposażonego w cyfrowy enkoder położenia, pozwala na powtarzalne i odtwarzalne wykonywanie cyfrowego zapisu badania objętości złącza spawanego na całej długości badania, a otrzymywany zapis cyfrowy nazywa się zobrazowaniem typu B, będącym obrazem spoiny w przekroju podłużnym. Podobnie jak w radiografii (gdzie zapis na błonie jest zobrazowaniem typu C złącza) interpretacja sonogramu może być wykonywana tylko przez wykwalifikowanego i doświadczonego specjalistę.

### 3. Technika TOFD dla ultradźwiękowego badania złączy spawanych

#### 3.1 Poziom techniki badania

Wzorem normy wyrobu **PN-EN 1714** dla ręcznych badań ultradźwiękowych złączy spawanych, w specyfikacji technicznej **CEN/TS 14751**, określono poziomy badania złączy spawanych dla techniki TOFD. Podobnie specyfikuje się cztery poziomy badania (A, B, C oraz D), natomiast 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. Wymagania dla poziomów badania przedstawiono w *tabeli 1*.

*Tabela 1 Poziomy badania dla techniki TOFD*

Poziom badania	Zestaw TOFD-skaner	Próbka odniesienia do weryfikacji ustawień zestawu TOFD-skaner	Próbka odniesienia do weryf. nastawy czułości badania	Skany niesymetryczne	Pisemna procedura/instrukcja badania
A	wg tab. 2	nie wymagana	nie wymagana	nie	<i>CEN/TS 14751</i>
B	wg tab. 2	nie wymagana	wymagana	nie	<i>CEN/TS 14751</i>
C	wg tab. 2	wymagana	wymagana	1)	tak
D	zgodnie z pisemną instrukcją	wymagana	wymagana	1)	tak

1) konieczność, liczbę i położenie skanów należy określić w pisemnej procedurze/instrukcji badania

Wymaga to doboru parametrów badania 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 (por. *rys. 3*), dobranej do grubości badanego złącza, wykonanej zgodnie z zaleceniami **CEN/TS 14751**, 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 jednej trzeciej grubości ścianki.

### 3.2 Nastawianie parametrów systemu

#### Dobór zestawu TOFD-skanera do badanej grubości złącza

Główce powinny być tak ustawione, aby zapewnić właściwe pokrycie badanego obszaru i optymalne wykrycie sygnałów dyfrakcyjnych od ewentualnych nieciągłości.

Dla złączy doczołowych o prostej geometrii, o niezbyt „wypchniętym” licu i przetopie, można wykorzystywać skanowanie przy pomocy jednego lub kilku zestawów skanera, w zależności od badanej grubości. W tabeli 2 podane są zalecenia doboru parametrów zestawu (liczba zestawów, podział na podobszary i odpowiadające im częstotliwości, kąty i wielkości przetwornika oraz punkt optymalnego przecięcia osi wiązki).

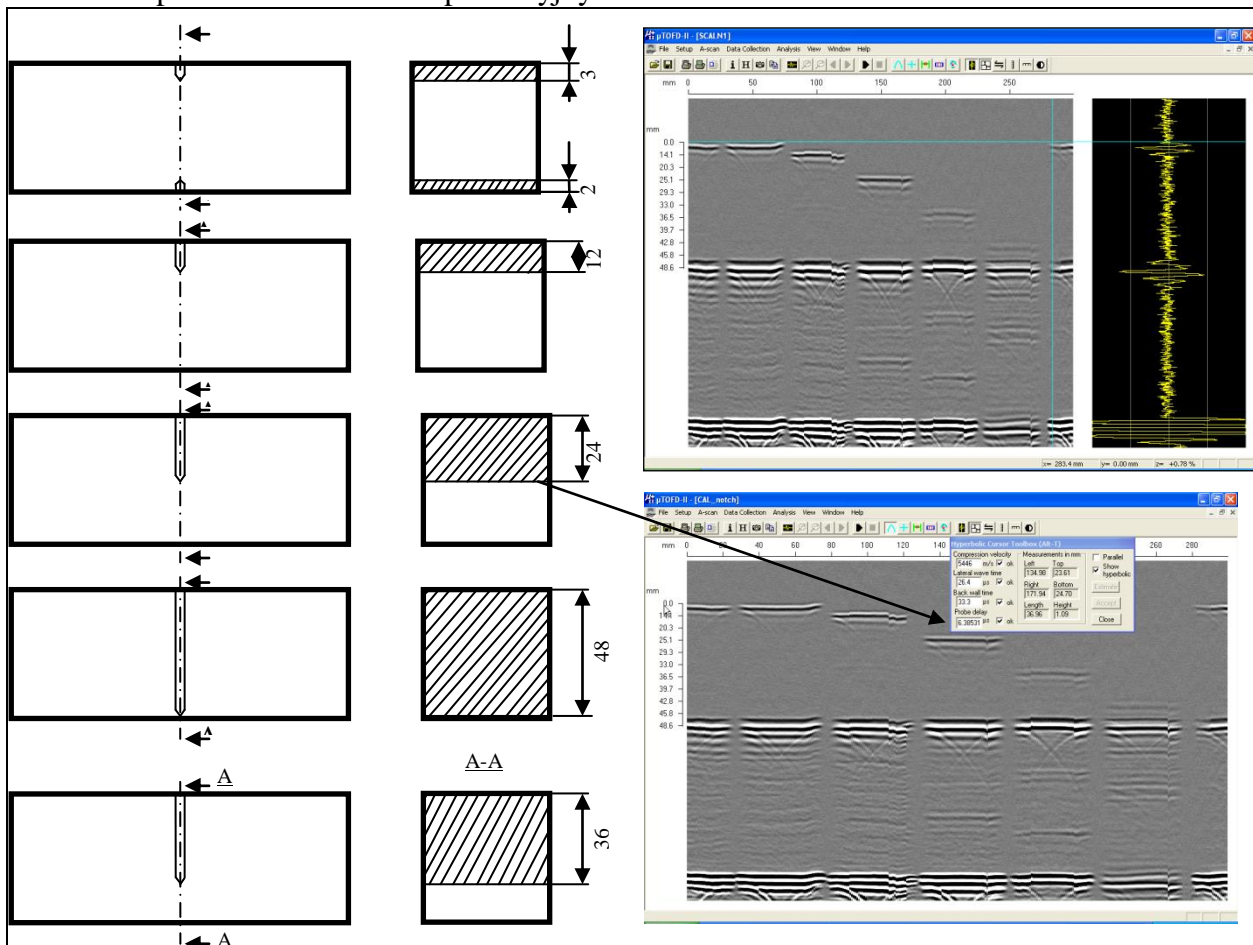
W przypadku badania złączy o bardziej złożonej geometrii (np. przygotowanie rowka w kształcie X, różna/zmienna grubość łączonych elementów) tabela 2 powinna być używana jako swego rodzaju przewodnik do sporządzenia pisemnej instrukcji badania, przy czym efektywność i pokrycie badanego fragmentu obszaru powinna być sprawdzona dla każdego zestawu skanera na odpowiednio przygotowanych próbkach odniesienia.

Tabela 2 Zalecane zestawy TOFD-skanera dla złączy doczołowych o prostej geometrii i różnej grubości

Grubość badana $t$ [mm]	Liczba zestawów TOFD-skanera	Zakres badanej grubości $\Delta t$ [mm]	Częstotliwość środkowa głowic $f$ [MHz]	Kąt wiązki fal podłużnych $\alpha$ [°]	Wymiar przetwornika $d$ [mm]	Punkt przecięcia osi wiązki
6 ÷ 10	1	0 ÷ $t$	15	70	2 ÷ 3	$2/3 t$
10 ÷ 15	1	0 ÷ $t$	15 ÷ 10	70	2 ÷ 3	$2/3 t$
15 ÷ 35	1	0 ÷ $t$	10 ÷ 5	70 ÷ 60	2 ÷ 6	$2/3 t$
35 ÷ 50	1	0 ÷ $t$	5 ÷ 3	70 ÷ 60	3 ÷ 6	$2/3 t$
50 ÷ 100	2	0 ÷ $t/2$	5 ÷ 3	70 ÷ 60	3 ÷ 6	$1/3 t$
		$t/2$ ÷ $t$	5 ÷ 3	60 ÷ 45	6 ÷ 12	$5/6 t$ lub $t$ dla $\alpha \leq 45^\circ$
100 ÷ 200	3	0 ÷ $t/3$	5 ÷ 3	70 ÷ 60	3 ÷ 6	$2/9 t$
		$t/3$ ÷ $2t/3$	5 ÷ 3	60 ÷ 45	6 ÷ 12	$5/9 t$
		$2t/3$ ÷ $t$	5 ÷ 2	60 ÷ 45	6 ÷ 20	$5/6 t$ lub $t$ dla $\alpha \leq 45^\circ$
200 ÷ 300	4	0 ÷ $t/4$	5 ÷ 3	70 ÷ 60	3 ÷ 6	$1/12 t$
		$t/4$ ÷ $t/2$	5 ÷ 3	60 ÷ 45	6 ÷ 12	$5/12 t$
		$t/2$ ÷ $3t/4$	5 ÷ 2	60 ÷ 45	6 ÷ 20	$8/12 t$
		$3t/4$ ÷ $t$	3 ÷ 1	50 ÷ 40	10 ÷ 20	$11/12 t$ lub $t$ dla $\alpha \leq 45^\circ$

Jeśli stosuje się odstępstwa w rekomendowanych tabelą nastawach należy wówczas sprawdzić „pokrycie” objętości badanej przy pomocy próbki odniesienia (por. przykładowy dobór próbki odniesienia dla grubości ścianki badanej do 50 mm, rys. 3)

W przypadku poziomów badania C oraz D wszystkie parametry podane w tabeli podlegają sprawdzeniu i optymalizacji na próbkach odniesienia a w przypadku badania eksploatacyjnego należy dodatkowo zoptymalizować ustawienie geometrii wiązki w obszarach poszukiwania wad eksploatacyjnych.



Rys.3. Przykładowa próbka odniesienia przy doboru parametrów nastaw czułości układu TOFD-skanera (nacięcia 3, 12, 24, 36 i 48 mm – prawe górne zobrażowanie; zwymiarowanie obrazu nacięcia 24 mm na obrazie TOFD – prawe dolne wymiarowanie = odczyt 23.61 mm)

### Parametry badania

Podstawowe parametry badania ultradźwiękowego techniką TOFD przy założeniu, że głowice ultradźwiękowe zostały dobrane zgodnie z wymaganiami tabeli 2 są następujące:

- odległość pomiędzy środkami głowic  $S$  – tzw. parametr PCS (probe center separation)
- początek i długość bramki próbkowania
- wzmacnienie badania

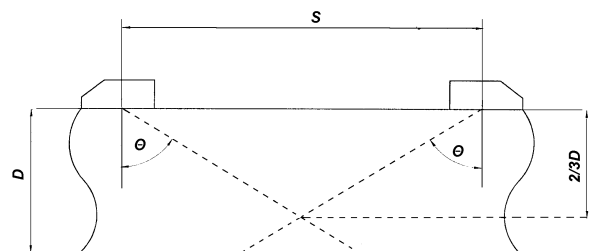
Odległość pomiędzy środkami głowic ustawia się, w zależności od grubości badanej spoiny, tak aby osie akustyczne głowicy nadawczej i odbiorczej przecinały się na głębokości równej  $2/3$  grubości badanego materiału (por. rys 4) . Odległość tę oblicza się ze wzoru:

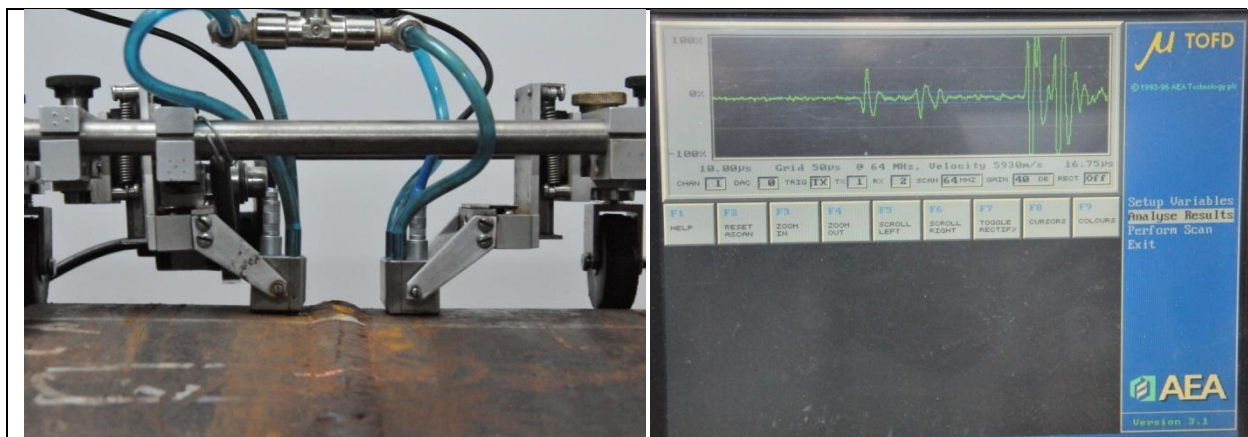
$$S = (4/3) t \tan \theta$$

gdzie:

- $S$  - odległość między środkami głowic - PCS;
- $t$  - nominalna grubość materiału rodzimego spoiny
- $\theta$  - kąt załamania głowicy

Rys.4. Zasada doboru zakresu badanej objętości – dobór parametru PCS





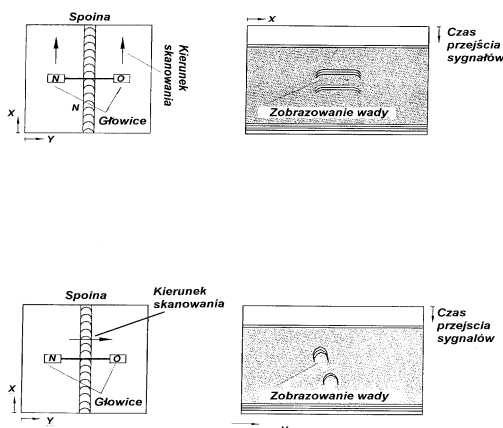
Rys.5. Widok zestawu TOFD-skanera (lewe zdjęcie) oraz dobór parametrów bramki próbkowania i czułości badania dla systemu Microplus 1-TOFD (prawy obraz)

Do ustawienia czułości badania wykorzystuje się obiekt badany. Amplituda fali podpowierzchniowej powinna się zawierać w granicach 40÷80 % FSH (pełnej wysokości ekranu). Jeśli sygnał fali podpowierzchniowej nie może być użyty można ustawić wzmocnienie tak by amplituda echa dna wynosiła 18÷30 dB powyżej 100% FSH. Jeśli obydwa powyższe przypadki nie mają zastosowania to wzmocnienie badania należy ustawić tak aby poziom szumów strukturalnych obserwowanych po przyłożeniu układu głowic do badanego materiału wynosił ok. 5÷10% FSH (por. rys. 5).

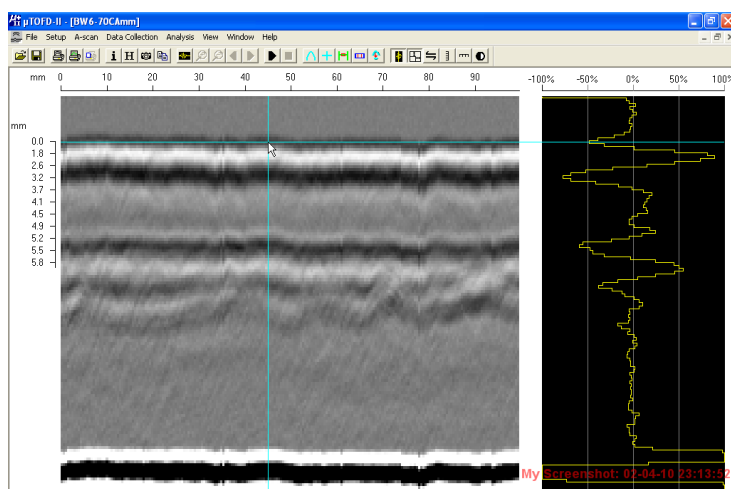
Oprócz omówionych powyżej podstawowych parametrów badania system ultradźwiękowy *Microplus 1-TOFD* wymaga wprowadzenia szeregu dodatkowych parametrów sterujących pracą nadajnika i odbiornika impulsów ultradźwiękowych oraz sposobem próbkowania i obróbki cyfrowej rejestrowanych przebiegów. Wiele z tych parametrów wymaga zmiany jedynie w przypadku zmiany przyłączonego zestawu głowic ultradźwiękowych zaś niektóre mogą być ustalone jednorazowo dla całego zakresu badań złączy.

#### 4. Podstawowe badania złączy

##### Skan typu B - nierównoległy

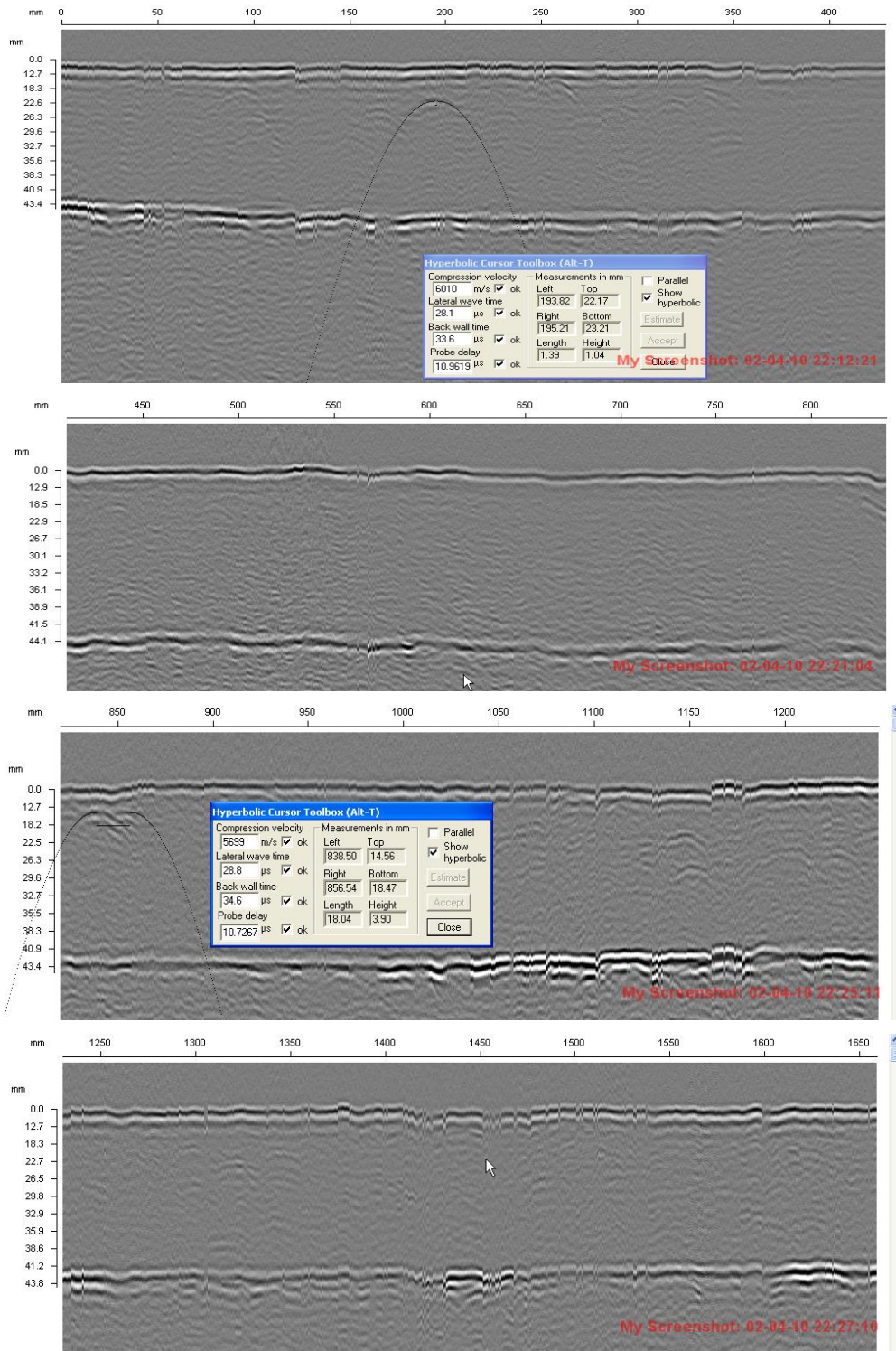


Rys.6. Skan typu B - nierównoległy (góra) i równoległy (dolny rysunek)



Rys.7. Sonogram skanu nierównoległego dla złącza o grubości 6 mm

Podstawowym skanowaniem jakie wykonuje się przy badaniu złączy spawanych techniką TOFD jest skanowanie typu nierównoległego, w którym głowice, ustawione są symetrycznie po obu stronach spoiny i przesuwane równoległe do osi spoiny (por. rys.6). Podczas przesuwu skanera impulsy ultradźwiękowe przechodzące między głowicami (zobrazowania typu A) są systematycznie próbkowane i zapisywane w pamięci komputera. Przebiegi te są następnie przekształcane w zobrazowanie typu B – nierównoległe, będące obrazem spoiny w przekroju podłużnym. Zobrazowanie to pozwala na lokalizację wad na obwodzie spoiny oraz na określenie długości, wysokości oraz głębokości zalegania wad (patrz rys.7 i 8).



Rys.8. Ultradźwiękowy sonogram złącza spawanego  $\Phi 508 \times 44$  mm za pomocą skanera ręcznego

W przypadku badania złączy obwodowych o większych średnicach ze względu na wygodę operowania skanerem ręcznym wykonuje się skany częściowe. Przesuw skanera należy zakończyć w zaplanowanym i oznakowanym miejscu na obwodzie spoiny, np. w pozycji godz. 3 lub godz. 6 i zapisać przeprowadzony skan na twardym dysku komputera.

Opisaną powyżej sekwencję czynności należy powtórzyć na kolejnych odcinkach długości (obwodu) spoiny pamiętając o zmianie pozycji początkowej skanu z 0 na nową pozycję startową. Kolejne skany wykonuje się tak aby zapewnić pokrycie dla pełnej długości spoiny i możliwe było ich późniejsza identyfikacja i interpretacja, podobnie jak ekspozycje częściowe w radiografii.

Na *rys. 8* pokazano przykład wykonywania skanów częściowych dla grubościennego złącza obwodowego oraz sposób wymiarowania ujawnianych wad z użyciem cyfrowego kursora parabolicznego, który zostanie omówiony później przy klasyfikacji wskazań.

Szybkość przesuwu ręcznego TOFD-skanera może być dowolna, pod warunkiem, że nie przekroczy wartości, przy której system nie nadaża z akwizycją danych. Objawia się to na ekranie obecnością czarnych, idealnie pionowych odcinków zobrazowania (widocznych na *rys. 8 skan nr 3-godz. 6÷9*). Dla usunięcia tego rodzaju efektów lub też innych zakłóceń uzyskiwanego obrazu należy, nie odrywając koła enkodera od powierzchni badanej, cofnąć skaner tam i z powrotem aż do uzyskania prawidłowego obrazu. Najczęstszą przyczyną zaniku lub zniekształceń rejestrowanych przebiegów ultradźwiękowych są problemy ze sprzężeniem akustycznym powodowane nierównościami powierzchni skanowania lub też niewłaściwym przesuwaniem skanera przez operatora.

### **Skan typu B – równoległy (uzupełniający)**

W niektórych przypadkach, dla pełnej i prawidłowej interpretacji wskazań uzyskanych w wyniku podstawowego skanowania nierównoległego, konieczne jest wykonanie skanowania uzupełniającego, obrazującego wykryte wady na przekroju poprzecznym spoiny.

Jest to również zobrazowanie typu B, nazywane skanowaniem równoległym, polega na przesuwaniu skanera z głowicami w kierunku prostym do osi spoiny i rejestrowaniu, z określoną częstotliwością, przebiegów ultradźwiękowych między głowicami. Przebiegi te zamieniane są następnie na sonogram typu B, na którym oś pozioma odpowiada kierunkowi szerokości spoiny zaś oś pionowa jest osią czasu i odpowiada grubości spoiny (por. *rys.6*).

Skanowanie równoległe wykonuje się na ogół dla złączy grubościennych, w miejscach gdzie przy skanowaniu podstawowym stwierdzono występowanie wad niedopuszczalnych i pożądana jest informacja o rozmiarach wady w kierunku poprzecznym. Przed rozpoczęciem skanowania typu równoległego należy zmienić o  $90^{\circ}$  zamocowanie enkodera w skanerze, tak aby mógł on odmierzać przesuw skanera w poprzek spoiny.

Oprócz możliwości określenia położenia wad względem środka spoiny sonoogramy typu równoległego pozwalają np. na rozróżnienie czy wskazania zarejestrowane na podstawowym sonogramie typu nierównoległego pochodzą z różnych punktów jednej dużej wady czy też od kilku wad liniowych usytuowanych w różnych miejscach przekroju spoiny.

### **Badania uzupełniające**

W niektórych przypadkach badania techniką TOFD, np. braku dostępu dla skanera lub dla usunięcia wątpliwości w interpretacji wad w strefie przypowierzchniowej (do  $2\div 6$  mm od powierzchni zewnętrznej w zależności od badanej grubości i zastosowanego zestawu TOFD-skanera) może być konieczne wykonanie dodatkowych badań nieniszczących.

Dla grubościennych złączy spawanych zalecane jest użycie w zestawie TOFD-skanera dodatkowych głowic ultradźwiękowych, pracujących w trybie echa i zbierających informacje z obszarów lica oraz przetopu złącza. Dla cienkościennych złączy spawanych ( $10\div 12$  mm) na ogół wystarcza dodatkowe badanie magnetyczno-proszkowe z powierzchni lica.

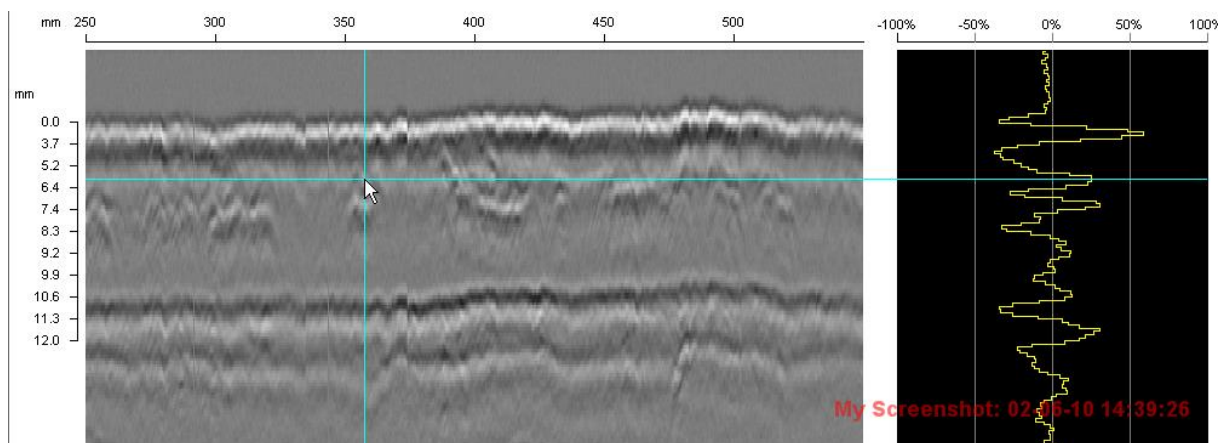


## 5. Klasyfikacja wskazań

### Charakteryzowanie nieciągłości i ich klasyfikacja

Przy analizie zapisów w postaci sonogramów TOFD pomocne jest czasem odwołanie się do pierwotnych zobrazowań typu A (por. rys. 9) uzyskanych w określonych punktach na długości spoiny, w miejscu ustawienia kursora. Przebiegi typu A pozwalają lepiej określić wzajemne zależności fazowe rejestrowanych impulsów ultradźwiękowych co ma istotne znaczenie przy ich interpretacji.

Na sonogramie typu nierównoległego oś pozioma odpowiada długości spoiny zaś oś pionowa jest osią czasu i odpowiada kierunkowi grubości spoiny. Należy tu jeszcze raz podkreślić, że czas przejścia impulsów dyfrakcyjnych nie jest prostą, liniową funkcją głębokości wady, w związku z czym obserwowane na zobrazowaniu relacje przestrzenne są zniekształcone (wady wydają się leżeć bliżej powierzchni skanowania niż ma to miejsce w rzeczywistości). Dla właściwego określenia głębokości wad konieczne jest korzystanie ze specjalnych kursorów ekranowych, które podają głębokość wad w milimetrach po odpowiednim przeliczeniu.



Rys.9. Sonogram złącza spawanego typu 1/2V o grubości 10/12 mm z A-skaniem wskazania dyfrakcyjnego (przyklejenie) na głębokości 6 mm (zmiana fazy na górnym wierzchołku wady)

W przypadku gdy w spoinie nie występują wady na sonogramie widoczne jest zobrazowanie impulsu fali podpowierzchniowej (zespół równoległych biało-czarnych linii leżących najwyżej) oraz zobrazowanie impulsu echa dna (liczniejszy i bardziej wyrazisty zespół linii leżących w dolnej części obrazu). Obszar sonogramu leżący pomiędzy tymi zespołami linii jest jednolicie szary z nieznacznym pofalowaniem szarego tła wywołanego rzez szumy strukturalne materiału złącza.

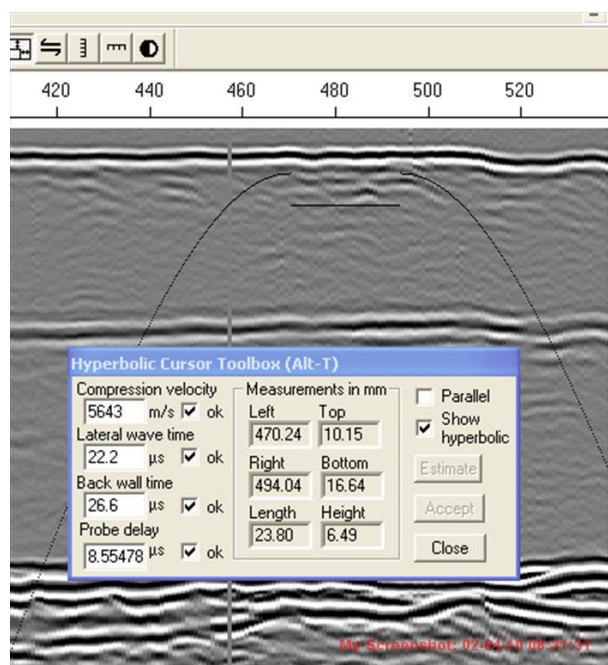
W większości przypadków w obszarze między wskazaniem fali podpowierzchniowej a wskazaniem echa dna ujawniają się liczne drobne wskazania o postaci krótkich, łukowato wygiętych ku dołowi zespołów linii. Wskazania te pochodzą od tzw. *wad punktowych* czyli porów, drobnych żużli oraz wtrąceń, których wymiary podłużne są mniejsze od średnicy przetwornika głowicy ultradźwiękowej. Dla upewnienia się, że dane wskazanie pochodzi od wady punktowej należy naprowadzić na nie kursor paraboliczny i porównać kształt kursora z łukiem wskazania (por. rys. 8 skan nr 1-godz. 0÷3). Dla wad punktowych kształt kursora i wskazania od wady są prawie jednakowe.

### Wyznaczane położenia i rozmiarów wad

Wskazania, które zinterpretowano jako wskazania od wad należy zwymiarować za pomocą parabolicznych kursorów ekranowych. Zobrazowanie typu nierównoległego umożliwia określenie położenia wady na obwodzie spoiny oraz pomiar jej długości, wysokości i

głębokości zalegania. Pomiar długości i wysokości nie dotyczy wad punktowych, dla których kryterium oceny jest liczba wskazań na określonym odcinku spoiny).

Głębokość zalegania oraz wysokość wady wyznacza się mierząc za pomocą kursora położenie wskazań dyfrakcyjnych od górnej i dolnej krawędzi wady W tym celu przeprowadza się kalibrację kursora parabolicznego wg określonej procedury, co pozwala wymiarować położenie i głębokość wskazań w mm. (por. rys. 10).



Pomiarów położenia i długości wad dokonuje się poprzez określenie kursorem początku oraz końca wady na sonogramie. Aby wyznaczyć początek wady lewą połówkę kursora parabolicznego należy naprowadzić na lewy kraniec wskazania wady tak aby uzyskać możliwie najlepsze dopasowanie do jego kształtu. Odczytana w tym położeniu współrzędna X kursora określa położenie początku wady na obwodzie spoiny.

W celu określenia końca wady postępuje się analogicznie naprowadzając prawą połówkę kursora parabolicznego na prawy kraniec wskazania wady. Długość wady jest obliczana jako różnica współrzędnych końca i początku wady.

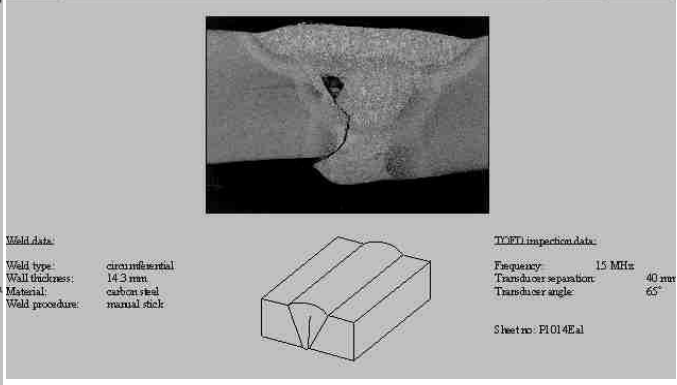
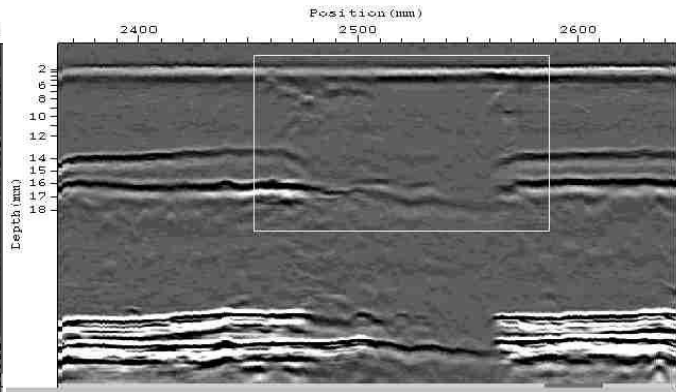
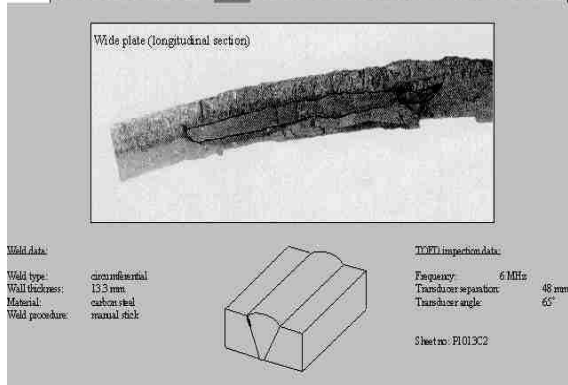
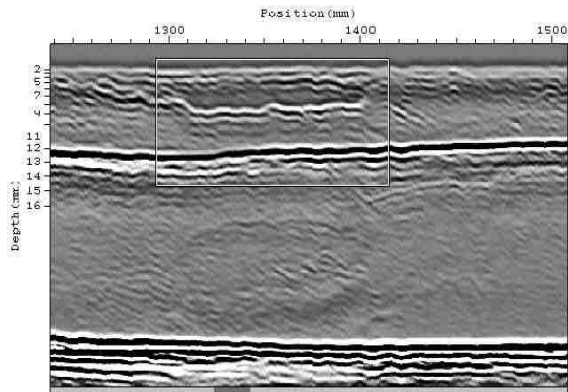
Rys.10. Sposób lokalizacji i wymiarowania wskazania liniowego przy pomocy kursora parabolicznego

### Atlas wad wykrywanych techniką TOFD

Poniżej podano (wykorzystując wyniki opracowane przez Firmę RTD z Holandii) cechy charakterystyczne wskazań niektórych typowych wad spoin wykrywanych techniką TOFD. Należy tutaj podkreślić, że amplituda rejestrowanych impulsów ultradźwiękowych, wyrażająca się na sonogramie kontrastowością czarno-białych linii, nie ma w technice TOFD decydującego znaczenia. Impulsy dyfrakcyjne pochodzące np. od krawędzi pęknięcia mają stosunkowo małą amplitudę a pomimo to stanowią wskazanie od poważnej wady. Podstawą oceny wskazań od wad jest ich kształt, usytuowanie w spoinie jak również towarzyszące zmiany wskazań fali podpowierzchniowej oraz echa dna

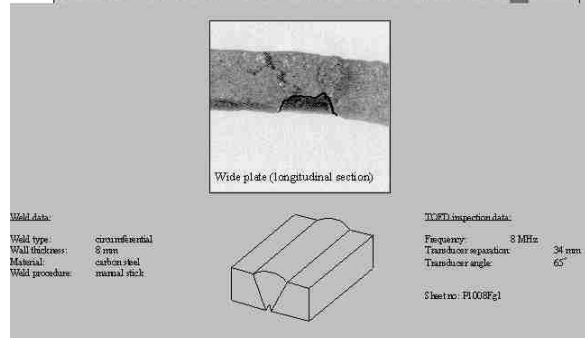
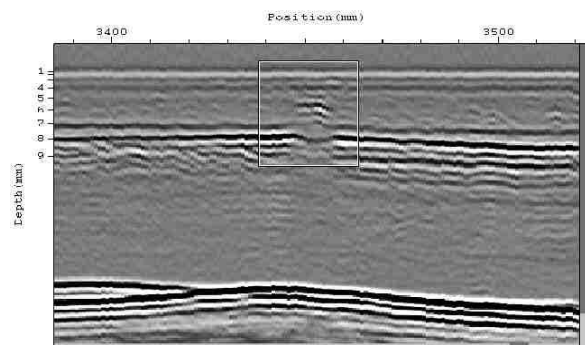
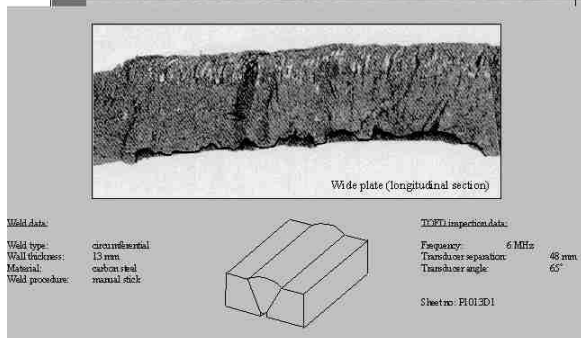
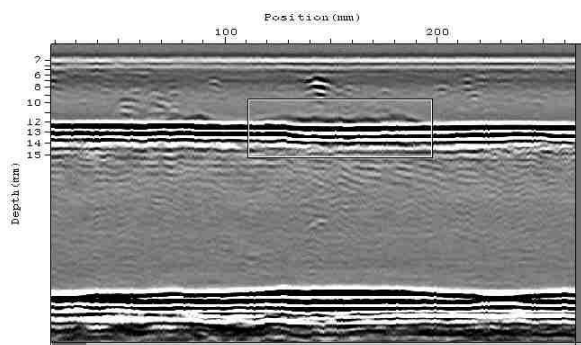
*Wady płaskie wychodzące od powierzchni zewnętrznej* (pęknięcia, przyklejenia do ścianki bocznej) ujawniają się na sonogramie w taki sposób, że w miejscu wystąpienia wady obserwuje się zanik impulsu fali podpowierzchniowej i jednocześnie pojawienie się (nieco poniżej) wskazania od impulsu ugiętego dyfrakcyjnie na dolnej krawędzi wady. Wygląda to na sonogramie jak pozorne obniżenie się linii wskazania fali podpowierzchniowej (por. rys. 11).

*Wady płaskie wychodzące od powierzchni wewnętrznej* spoiny (np. pęknięcia) ujawniają się na sonogramie jako zespoły linii leżące powyżej echa dna. Powstają one wskutek dyfrakcyjnego rozproszenia fali ultradźwiękowej na górnej krawędzi wady stąd też ich amplituda jest stosunkowo niewielka. W przypadku pęknięć o znacznej głębokości wskazaniu temu towarzyszy zanik bądź osłabienie i przesunięcie w dół wskazania echa dna (por. rys. 12).



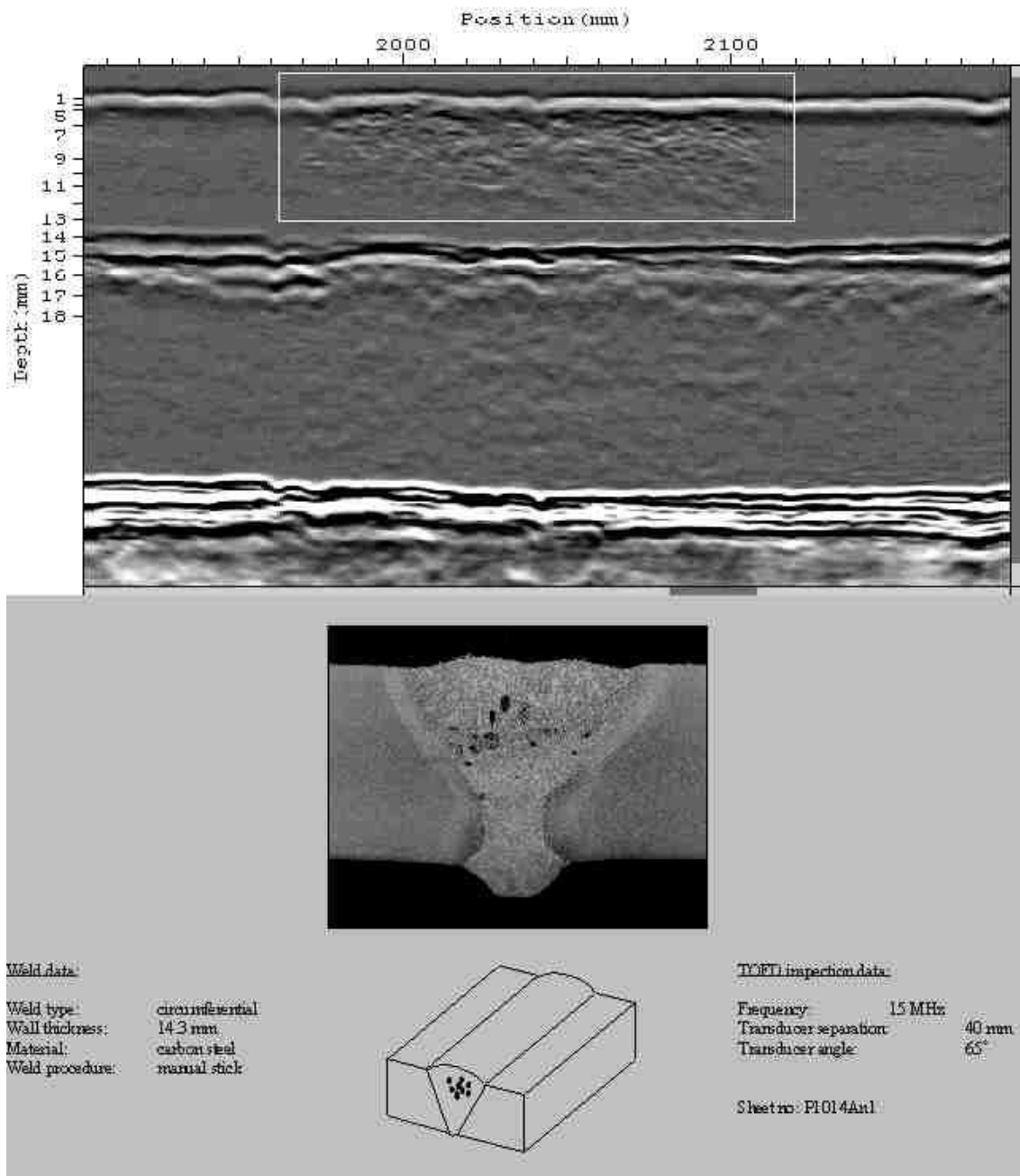
Rys.11. Przyklejenie do ścianki bocznej (obraz TOFD i makro) Rys.12. Pęknięcie podłużne w SWC w przetopie (obraz TOFD i makro)

Wady przetopu spoiny (brak przetopu, wklęsnięcie grani) ujawniają się na dyfraktogramie jako poszerzenie a następnie rozdwojenie wskazania echa dna. Obie gałęzie wskazania mają przy tym porównywalną i stosunkowo dużą amplitudę (por. rys. 13).



Rys.13. Brak przetopu - lewy i wklęsnięcie grani - prawy (obraz TOFD i makro)

*Wady płaskie wewnętrzne* (nie wychodzące na powierzchnię materiału) dają niezbyt silne wskazania dyfrakcyjne zarówno od górnej jak i dolnej krawędzi wady. Impulsy ultradźwiękowe ugięte na dolnej krawędzi wady mają przy tym fazę zgodną z impulsem fali podpowierzchniowej natomiast impulsy rozproszone na górnej krawędzi mają fazę odwróconą o  $180^{\circ}$ . Odróżnienie obu impulsów jest generalnie możliwe w przypadku gdy wysokość wady przekracza 2 mm. Dla wad mniejszych obserwuje się jedno poszerzone wskazanie (por. rys. 14).

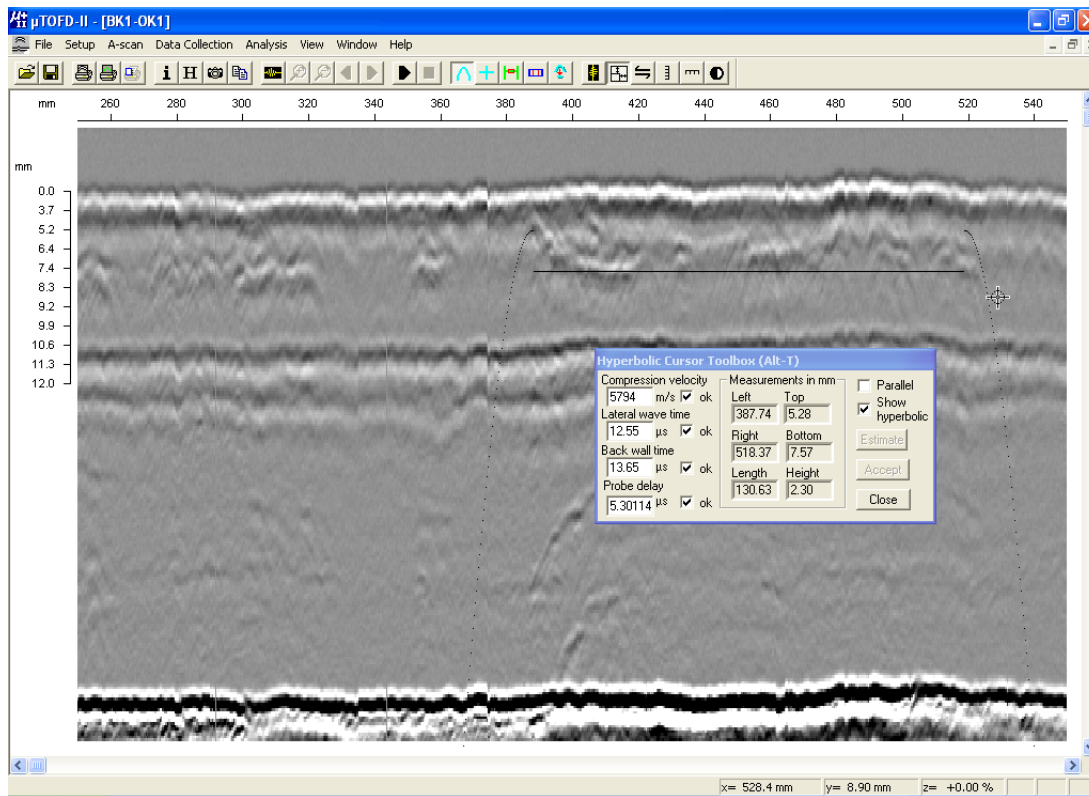


Rys.14. Porowatość – gniazdo pęcherzy (obraz TOFD i makro)

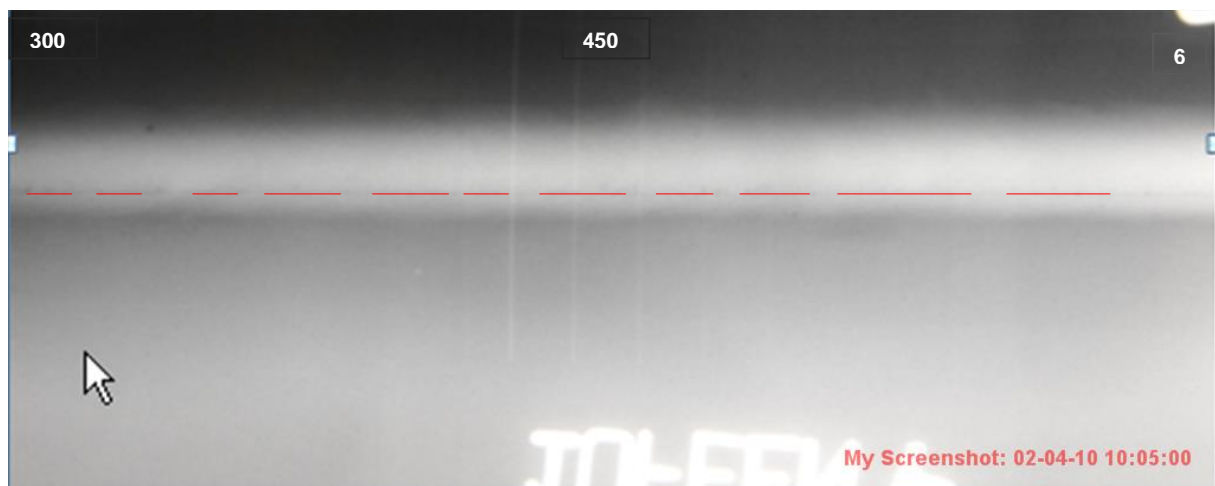
Przy klasyfikacji wad mogą czasem wystąpić niejednoznaczności w ocenie charakteru wady. Jednym z trudniejszych problemów może być np. rozróżnienie skupiska wad punktowych od jednej nieregularnej wady rozległej. W takich przypadkach należy przeprowadzić dodatkowe ręczne badanie ultradźwiękowe lub badanie radiograficzne. Ostatecznej oceny wątpliwych wskazań należy dokonać w oparciu o wyniki badań obiema metodami

## 6. Walidacja wyników badania

Dla oceny wiarygodności wyników badania ultradźwiękowego techniką TOFD skonfrontowano je z badaniami radiograficznymi przy pomocy lampy rentgenowskiej.



Rys.15. Sonogram złącza spawanego typu 1/2V o grubości 10/12 mm. Na skanowanym odcinku ujawnia się wskazanie dyfrakcyjne przyklejenia (o różnym nasileniu i z przerwami) na głębokości 5÷8 mm (na odcinku 387÷520 mm podano wymiarowanie wady)



Rys.16. Radiogram rentgenowski (180kV/2mA) złącza spawanego typu 1/2V o grubości 10/12 mm ze wskazaniami przyklejeń przerywanych z charakterystycznymi pęcherzykami odgazowania na brzegach (dla lepszego kontrastu zobrazowania komputerowo naniesiono odcinki przebiegu przyklejenia)

Technika ultradźwiękowa TOFD pewnie wykrywa wady przyklejenia, które radiograficznie są dobrze kontrastowo widoczne dopiero na radiogramach wykonanych lampą rentgenowską

## 7. Wnioski

Doświadczenia nabyte przez firmę NDTEST podczas stosowania techniki TOFD w badaniach złączy spawanych potwierdzają, że stanowi ona istotny krok naprzód w stosunku do klasycznych technik radiograficznych i ultradźwiękowych. Należy jednak podkreślić, że wdrożenie tej techniki do praktyki przemysłowej wymaga pokonania szeregu barier, niekoniecznie technicznych.

Uwzględniając wymagania dokumentów normatywnych dla poziomów techniki badania TOFD oraz doboru zestawów TOFD-skanera do grubości badanego złącza weryfikację nastaw należy opierać na przygotowanych wcześniej próbkach odniesienia.

Jako podstawowe zalety techniki TOFD należy wymienić:

- możliwość badania złączy o grubościach od 6 do 300 mm, przy stosunkowo niewielkim wzroście nakładu środków i pracochłonności;
- duża wydajność badania, nieznacznie zależna od grubości złączy;
- możliwość wykonywania badań podczas dnia roboczego, ze względu na nieszkodliwość ultradźwięków dla otoczenia;
- pełny zapis cyfrowy wyników badania z całej objętości złącza w czasie rzeczywistym;
- analizę wyników 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.

Zalety techniki TOFD z użyciem ręcznych skanerów są efektywnie wykorzystywane na obiektach o dużym zróżnicowaniu średnic i grubości, na różnego rodzaju instalacjach w przemyśle rafineryjnym, chemicznym oraz w energetyce

## 8. Literatura

1. Mackiewicz S: Metoda TOFD - nowe podejście do ultradźwiękowych badań spoin,, Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane 1996
2. **PN-EN 583-6:2009**: Badania nieniszczące -- Badania ultradźwiękowe -- Część 6: Dyfrakcyjna technika czasu przejścia jako sposób wykrywania i wymiarowania nieciągłości (oryg.)
3. **CEN/TS 14751:2004**: Welding. Use of Time-of-Flight Diffraction technique (TOFD) for examination of welds