
**XXII Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 16-18 marca 2016**

**OCENA WYNIKÓW BADAŃ ZŁĄCZY SPAWANYCH
TECHNIKĄ TOFD wg EN ISO 15626**

Sławomir MACKIEWICZ
IPPT PAN, Warszawa
smackiew@ippt.gov.pl

1. WSTĘP

Technika TOFD została opracowana i wprowadzona do badań nieniszczących w latach 90-tych ubiegłego wieku w Wielkiej Brytanii [1]. Podstawowe założenia oraz zasady stosowania tej nowej techniki ultradźwiękowej przedstawiono na Seminarium Badań Nieniszczących w Zakopanem już w 1997 r [2]. Należy też podkreślić, że Polska była jednym z pierwszych krajów, po Wielkiej Brytanii i Holandii, w których wdrożono technikę TOFD do badań złączy spawanych na dużych inwestycjach rurociągowych [3]. Autorem tych wdrożeń była firma NDTEST Sp. z o.o. z Warszawy, która stopniowo udoskonalała swoje systemy badawcze oraz poszerzała zakres zastosowań tej metody [4],[5].

Z perspektywy czasu widać, że technika TOFD nie zastąpiła i nie wyparła konwencjonalnych badań ultradźwiękowych jednak znalazła obszar zastosowań w zautomatyzowanych badaniach złączy spawanych rurociągów oraz w badaniach spoin grubościennych. Z uwagi na swoje ograniczenia (strefy martwe przy powierzchni materiału) jest ona zazwyczaj stosowana w połączeniu z klasyczną techniką echa, lub z techniką Phased Array (PA). Należy tutaj podkreślić, że w badaniach złączy spawanych technika Phased Array nie zastępuje techniki TOFD lecz stanowi jej komplementarne uzupełnienie. Dopiero łączne zastosowanie obu tych technik pozwala na pełne wykorzystanie potencjału metody ultradźwiękowej w badaniach spoin. Technika PA posiada takie same ograniczenia fizyczne jak konwencjonalna technika echa. Jest to słaba wykrywalność wad zorientowanych ukośnie do osi wiązki, niska dokładność określania wysokości wad oraz problemy interpretacyjne związane z echami kształtu. Technika TOFD kompensuje te braki zapewniając skuteczne wykrywanie nieciągłości niezależnie od ich orientacji a także umożliwiając dokładne określanie wysokości oraz głębokości zalegania wad. Dodatkowo, zastosowanie techniki TOFD znacząco ułatwia rozpoznawanie ech kształtu przyczyniając się do ograniczenia problemu fałszywych wskazań (*false positives*). Z kolei problem stref martwych techniki TOFD jest skutecznie rozwiązywany przez wiązki ultradźwiękowe systemu PA generowane pod różnymi kątami, które penetrują obszary spoiny w pobliżu lica oraz grani. Wykorzystując efekt odbicia od naroża umożliwiają one wykrycie nawet niewielkich pęknięć i przyklejeń wychodzących od powierzchni materiału.

Przez szereg lat istotną barierą utrudniającą wdrażanie techniki TOFD był brak odpowiednich norm określających zasady jej stosowania do badań określonych konstrukcji czy wyrobów. Dotyczy to w szczególności badań złączy spawanych, które są jednym z najważniejszych obszarów jej zastosowań. Już w 2002 r. wprowadzona została norma ENV 583-6 określająca ogólne zasady badań techniką TOFD, jednak dopiero w 2011 pojawiła się norma EN ISO 10863 [7] opisująca szczegółowe zasady badań złączy spawanych. Do tego

czasu badania spoin techniką TOFD prowadzone były w oparciu o dokument techniczny CEN [6] nie mający rangi normy oraz kryteria akceptacji opracowywane indywidualnie dla konkretnego projektu. Norma PN-EN ISO 10863 nie była dotychczas omawiana na Seminariach Badań Nieniszczących jednak w 2010 prezentowany był obszerny referat [4] szczegółowo omawiający wymagania dokumentu CEN/TS 14751, który stanowił prototyp przedmiotowej normy.

Problem unormowania kryteriów akceptacji złączy spawanych na podstawie badań TOFD został rozwiązany dopiero w 2014 r wraz z pojawieniem się normy EN ISO 15626. Norma ta określa poziomy akceptacji złączy spawanych na podstawie badań TOFD w analogiczny sposób jak czyni to norma EN ISO 11666 w odniesieniu do badań konwencjonalnych. Uwzględnia ona jednak specyfikę techniki TOFD oraz jej odmienne możliwości w zakresie charakteryzowania wskazań wad.

Z uwagi na praktyczne znaczenie tego dokumentu dla dalszego upowszechnienia techniki TOFD w badaniach złączy spawanych w niniejszym referacie podjęto próbę przybliżenia wymagań normy EN ISO 15626 szerszemu gronu specjalistów badań ultradźwiękowych. Omawiane zagadnienia dotyczące analizy i interpretacji wskazań TOFD zilustrowano wynikami badań przeprowadzonych na złączach spawanych z naturalnymi, dokładnie znanymi wadami.

2. PODSTAWOWE DEFINICJE I ZAŁOŻENIA

Norma EN ISO 15626 określa poziomy akceptacji dla badań techniką TOFD złączy spawanych z pełnym przetopem wykonanych ze stali ferrytycznych o grubości nominalnej od 6 do 300 mm. Zdefiniowane w normie poziomy akceptacji (1, 2, 3) odpowiadają poziomom jakości złączy spawanych (B, C, D) określonym w normie spawalniczej EN ISO 5817. Mają one zastosowanie do oceny wskazań zarejestrowanych podczas badań TOFD wykonywanych zgodnie z wymaganiami normy EN ISO 10863.

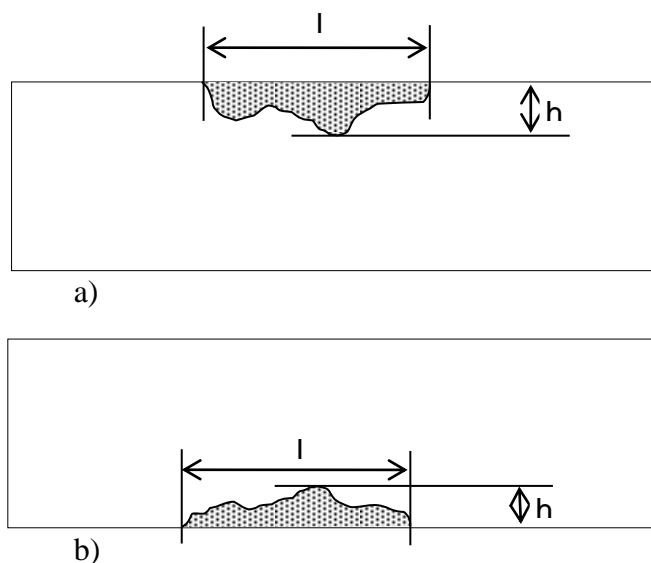
Relacja pomiędzy poziomami jakości spoin wg EN ISO 5817, poziomami badania TOFD wg. EN ISO 10863 oraz poziomami akceptacji wskazań TOFD wg EN ISO 15626 jest określona w poniższej tabeli.

| Poziom jakości wg EN ISO 5817 | Poziom badania TOFD wg EN ISO 10863 | Poziom akceptacji TOFD wg EN ISO 15626 |
|-------------------------------|-------------------------------------|--|
| B | C | 1 |
| C | co najmniej B | 2 |
| D | co najmniej A | 3 |

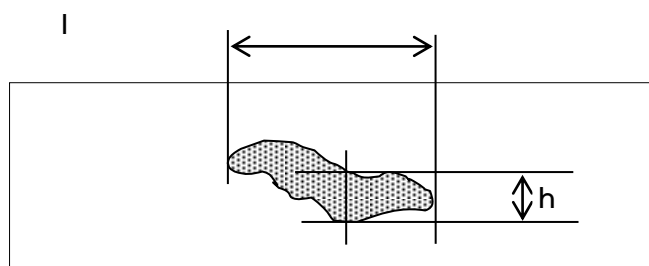
Tab. 1. Relacja pomiędzy poziomami jakości złączy spawanych, poziomami badań TOFD oraz poziomami akceptacji TOFD.

Biorąc pod uwagę możliwości charakteryzowania wskazań za pomocą metody TOFD norma rozróżnia trzy rodzaje nieciągłości materiałowych, które oceniane są w odmienny sposób: nieciągłości wychodzące na powierzchnię (*surface breaking discontinuities*), nieciągłości wewnętrzne (*embedded discontinuities*) oraz nieciągłości (wskazania) punktowe. W dwóch pierwszych przypadkach podstawą do oceny wskazania są dwa parametry mierzalne techniką TOFD: długość wskazania – l oraz wysokość wskazania – h . Należy zauważyć, że nie bierze się pod uwagę amplitudy wskazań (poziomów echa) jak to ma miejsce w innych rodzajach badań ultradźwiękowych.

Typy nieciągłości oraz ich podstawowe parametry: długość l i wysokość h zilustrowano graficznie na rys 1 i 2.



Rys. 1. Nieciągłości wychodzące na powierzchnię skanowania a) oraz powierzchnię przeciwną b).



Rys. 2. Nieciągłość wewnętrzna.

Należy zwrócić uwagę na niezbyt oczywistą definicję wysokości h w przypadku nieciągłości wewnętrznych. Wysokość nieciągłości jest tutaj zdefiniowana jako maksymalna różnica między sygnałami dyfrakcyjnymi pochodzącymi od górnej i dolnej krawędzi nieciągłości w pewnym określonym miejscu na jej długości. Nie jest to więc maksymalna rozpiętość nieciągłości na osi głębokości jak można byłoby przypuszczać.

W przypadku nieciągłości wychodzących na powierzchnię sposób zdefiniowania wysokości wskazań jest bardziej oczywisty. Wysokość nieciągłości wychodzącej na powierzchnię skanowania definiuje się jako maksymalną różnicę głębokości między impulsem dyfrakcyjnym ugiętym na dolnej krawędzi nieciągłości a impulsem fali podpowierzchniowej. W przypadku nieciągłości wychodzącej na powierzchnię przeciwną jest to maksymalna różnica głębokości między impulsem echa dna a impulsem dyfrakcyjnym pochodzącym od górnej krawędzi nieciągłości.

Oprócz nieciągłości wychodzących na powierzchnię oraz nieciągłości wewnętrznych w normie EN ISO 15626 pojawia się również pojęcie wskazań punktowych (*point-like indications*). Pojęcie to zostało dokładniej określone w przywoływanej normie EN ISO 10863 [7] i zgodnie z zawartą tam definicją oznacza wskazania o kształcie hiperbolicznym, które mogą znajdować się na dowolnej głębokości. Dla wskazań tych nie określa się długości ani wysokości zaś podstawą dla ich oceny jest maksymalna dopuszczalna liczba wskazań na określonym odcinku spoiny.

3. ZASADY OCENY WYNIKÓW BADANIA TOFD

Proces oceny wyników badania TOFD złącza spawanego składa się z kilku etapów, które opisano w obu normach dotyczących badań TOFD złączy spawanych tj. EN ISO 10863 oraz EN ISO 15626. Pierwsza z tych norm opisuje proces oceny w sposób bardziej ogólny i kompleksowy natomiast druga koncentruje się na zdefiniowaniu poziomów akceptacji. W praktyce proces oceny skanu TOFD jest pewną całością stąd też zostanie poniżej opisany z jednoczesnym uwzględnieniem wymagań obu norm.

Podstawowe etapy oceny wyników badania TOFD, po uprzednim wykonaniu operacji synchronizacji A-skanów oraz kalibracji osi głębokości, są następujące:

- Ocena jakości wykonanego skanu i uzyskanego zobrazowania
- Identyfikacja wskazań pochodzących od nieciągłości
- Klasyfikacja wskazań pochodzących od nieciągłości
- Wyznaczenie położenia oraz długości i wysokości wskazań
- Ocena wskazań według przyjętego poziomu akceptacji

Ocena jakości skanu TOFD

- sprawdzenie jakości sprzężenia akustycznego – jednoczesny spadek amplitudy fali podpowierzchniowej, echa dna oraz fali transformowanej o więcej niż 12 dB oznacza nieakceptowalny zanik sprzężenia i wymaga powtórzenia skanowania
- sprawdzenie kompletności zapisu danych – maksymalna liczba niezapisanych linii skanu (A-skanów) nie może przekroczyć 5% całkowitej liczby linii, przy czym niedopuszczalne są dwie przylegające niezapisane linie
- sprawdzenie czułości badania – poziom amplitudy fali podpowierzchniowej powinien zawierać się w granicach 40% - 80% FSH (w przypadku konfiguracji, w których fala podpowierzchniowa nie jest wykorzystywana poziom szumów strukturalnych powinien zawierać się w granicach 5% - 10% FSH)
- sprawdzenie zakresu próbkowania – w przypadku badania obejmującego całą grubość spoiny okno próbkowania sygnału powinno zaczynać się co najmniej 1 μ s przed impulsem fali podpowierzchniowej i kończyć za impulsem fali transformowanej, w przypadku badań spoin grubościennych z podziałem na strefy okna próbkowania kolejnych skanów TOFD powinny zapewniać pokrycie całej grubości spoiny zachodząc na siebie na, co najmniej, 10% grubości.

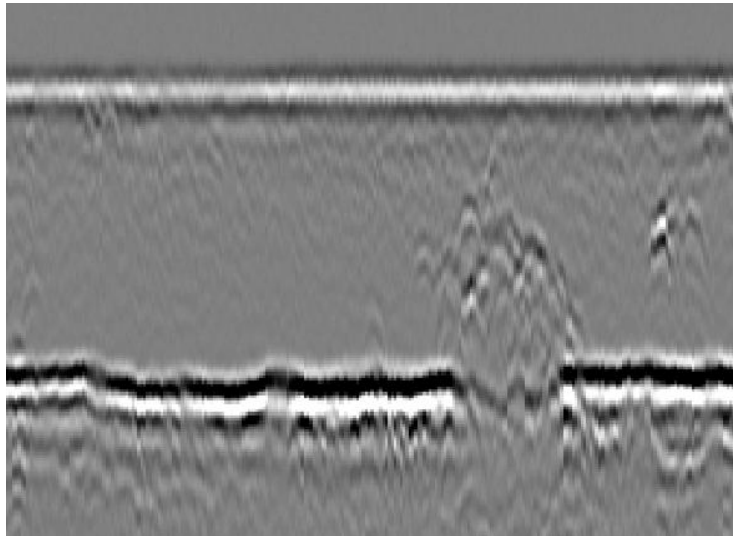
Identyfikacja wskazań pochodzących od nieciągłości

Należy odróżnić wskazania pochodzące od rzeczywistych nieciągłości materiału od wskazań powstających w wyniku cech geometrycznych badanego obiektu. Typowym przykładem wskazań pochodzących od niedoskonałej geometrii złącza spawanego jest rozdzielenie echa dna spowodowane przesunięciem krawędzi łączonych rur lub blach.

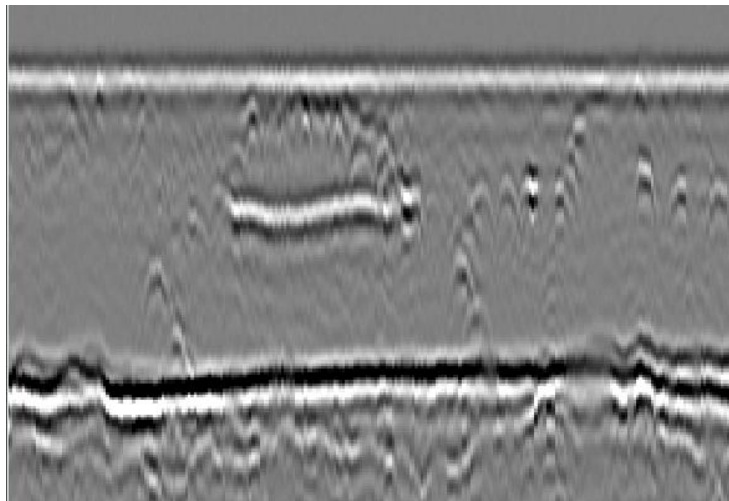
Klasyfikacja wskazań pochodzących od nieciągłości

Dla celów dalszej oceny wskazania TOFD pochodzące od nieciągłości należy zaklasyfikować do jednej z trzech grup:

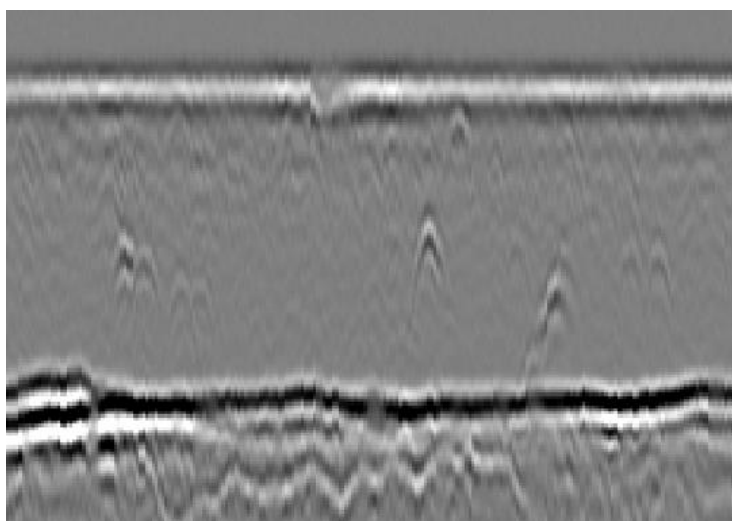
- a) wskazania od nieciągłości wychodzących na powierzchnię (skanowania lub przeciwległą), rys. 3
- b) wskazania od nieciągłości wewnętrznych, rys. 4
- c) wskazania punktowe, rys. 5



Rys. 3. Wskazanie od nieciągłości wychodzącej na powierzchnię przeciwną (brak przetopu).



Rys. 4. Wskazanie od nieciągłości wewnętrznej (pęknięcie podłużne).

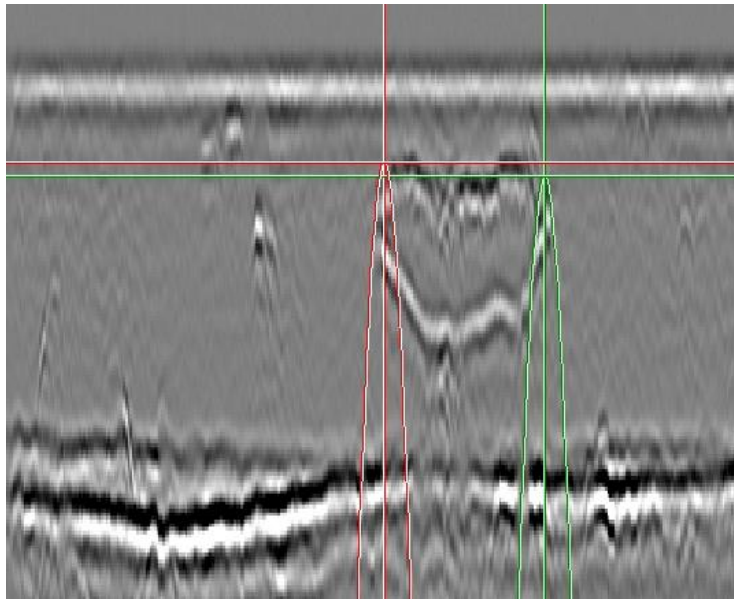


Rys. 5. Wskazania punktowe (pęcherze kuliste) .

Wyznaczenie położenia oraz długości i wysokości wskazań

W przypadku wskazań punktowych wyznacza się jedynie położenie wskazania na osi długości oraz głębokości dopasowując kursor hiperboliczny do profilu wskazania. Nie wyznacza się długości ani wysokości wskazań punktowych.

W przypadku wskazań od nieciągłości wychodzących na powierzchnię oraz wskazań od nieciągłości wewnętrznych wyznacza się położenia początku oraz końca wskazania na osi długości spoiny – odpowiednio x_1 oraz x_2 . Pomiarów dokonuje się ustawiając kursory hiperboliczne na obu końcach wskazania tak aby możliwie najdokładniej przylegały do profilu wskazania. Odległość między położeniami kursorów na osi x wyznacza długość wskazania. Przykład pomiaru długości nieciągłości wewnętrznej za pomocą kursorów hiperbolicznych pokazano na rys. 6.

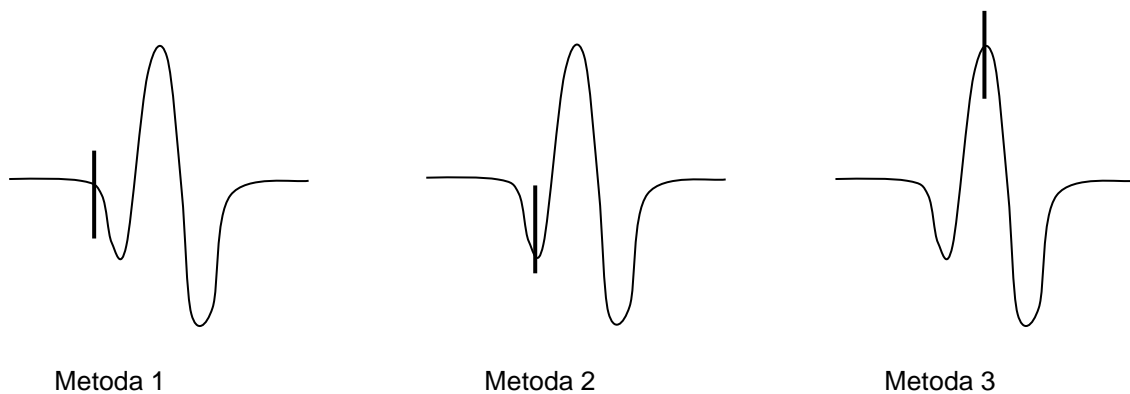


Rys. 6. Wyznaczanie długości nieciągłości wewnętrznej za pomocą kursorów hiperbolicznych.

Nieco bardziej złożony jest pomiar wysokości wskazań. W pierwszym rzędzie należy jednoznacznie ustalić położenie punktu charakterystycznego impulsów, względem którego dokonuje się pomiarów kursorowych na osi czasu odpowiadającej osi głębokości. Norma EN ISO 15626 rekomenduje w tym względzie wybór jednej z 3 metod zilustrowanych na rys. 7:

- Metoda 1: pomiary pomiędzy narastającymi zboczami impulsów
- Metoda 2: pomiary pomiędzy pierwszymi wierzchołkami impulsów
- Metoda 3: pomiary pomiędzy maksymalnymi wierzchołkami impulsów

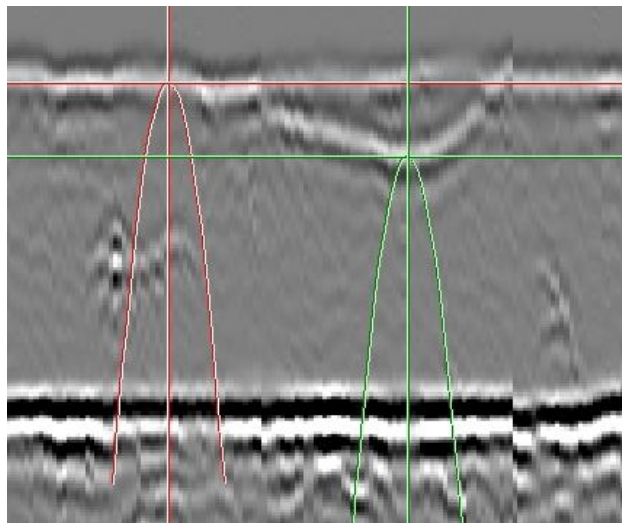
Niezależnie od wybranej metody pozycjonowania kursora należy bezwzględnie pamiętać o zmianach fazy odpowiednich impulsów (np. maksimum impulsu fali podpowierzchniowej będzie odpowiadać minimum impulsu echa dna zaś maksimum impulsu dyfrakcyjnego pochodzącego od górnej krawędzi wady będzie odpowiadać minimum impulsu dyfrakcyjnego ugiętego na dolnej krawędzi wady).



Rys. 7. Metody pozycjonowania kursora na impulsach ultradźwiękowych w celu pomiaru głębokości i wysokości wskazań.

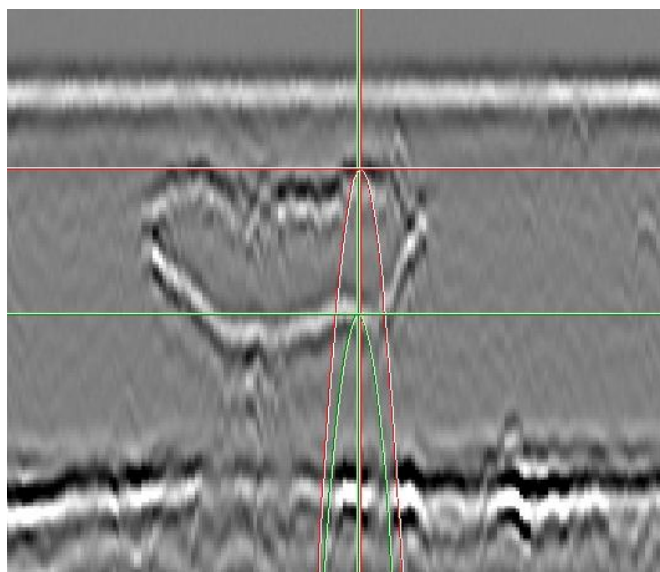
Wysokość nieciągłości wychodzących na powierzchnię skanowania wyznacza się jako maksymalną różnicę na osi głębokości między impulsem fali podpowierzchniowej a impulsem dyfrakcyjnym od dolnej krawędzi nieciągłości.

Wysokość nieciągłości wychodzących na powierzchnię przeciwną wyznacza się jako maksymalną różnicę na osi głębokości między impulsem echa dna a impulsem dyfrakcyjnym pochodzących od górnej krawędzi nieciągłości.



Rys. 8. Pomiar wysokości nieciągłości wychodzącej na powierzchnię skanowania.

W przypadku nieciągłości wewnętrznych wysokość nieciągłości wyznacza się jako maksymalną różnicę wysokości między impulsami dyfrakcyjnymi pochodzącymi od górnej i dolnej krawędzi nieciągłości w ustalonym punkcie. Należy przy tym pamiętać o różnicy faz między tymi impulsami. Przykład pomiaru wysokości takiej nieciągłości pokazano na rys. 9.



Rys. 9. Pomiar wysokości nieciągłości wewnętrznej.

Mając wyznaczone położenia, długości oraz wysokości wskazań TOFD pochodzących od sklasyfikowanych nieciągłości można przystąpić do ich oceny w kategoriach poziomów akceptacji zdefiniowanych w normie EN ISO 15626.

4. POZIOMY AKCEPTACJI WSKAZAŃ

Norma EN ISO 15626 ustala 3 poziomy akceptacji wskazań odpowiadające poziomom jakości spoin wg EN ISO 5817 zgodnie z regułami podanymi w tab. 1. Poziomy akceptacji definiują kryteria akceptacji dla wskazań pojedynczych na podstawie ich rodzaju (wychodzące na powierzchnię lub wewnętrzne), długości - l oraz wysokości - h . Przykładowa tabela określająca kryteria oceny wskazań pojedynczych dla 1 poziomu akceptacji przedstawiona została poniżej. Należy zauważyć, że nie dotyczy ona wskazań punktowych, które oceniane są w odrębny sposób.

| Zakres grubości t | Długość maksymalna jeśli $h < h_2$ lub h_3 l_{max} | Wysokość maksymalna jeśli $l \leq l_{max}$ | | Wysokość maksymalna jeśli $l > l_{max}$ h_1 mm |
|---|--|--|---|---|
| | | Nieciągłości wych. na powierzchnię h_3 mm | Nieciągłości wewnętrzne h_2 mm | |
| $6 \text{ mm} < t \leq 15 \text{ mm}$ | $0,75 t$ | 1,5 | 2,0 | 1,0 |
| $15 \text{ mm} < t \leq 50 \text{ mm}$ | $0,75 t$ | 2,0 | 3,0 | 1,0 |
| $50 \text{ mm} < t \leq 100 \text{ mm}$ | 40 mm | 2,0 | 4,0 | 2,0 |
| $t > 100 \text{ mm}$ | 50 mm | 3,0 | 5,0 | 2,0 |

Tab. 2. Kryteria oceny wskazań dla 1 poziomu akceptacji.

Kryteria oceny wskazań zależą od grubości złącza spawanego i zdefiniowane są osobno dla 4 przedziałów grubości. Na pierwszy rzut oka logika oceny wskazań zawarta w tabeli wydaje się dość skomplikowana, jednak można uprościć jej stosowanie postępując w następujący sposób.

W pierwszym rzędzie należy ustalić zakres grubości, w którym leży grubość badanej spoiny i ustalić wiersz tabeli będący podstawą oceny. Przykładowo, jeśli badane złącze ma grubość nominalną 20 mm koncentrujemy uwagę na drugim wierszu danych tabeli.

Przechodząc do oceny konkretnej nieciągłości sprawdzamy czy jej długość l jest mniejsza czy większa od długości l_{\max} określonej w 2 kolumnie tabeli.

Jeśli $l \leq l_{\max}$ (n. krótka) to sprawdzamy czy wysokość nieciągłości h nie przekracza limitu ustalonego dla danego rodzaju nieciągłości (h_3 – dla n. wychodzących na powierzchnię, h_2 – dla n. wewnętrznych). Jeśli ten limit został przekroczony to nieciągłość odrzucamy, jeśli nie to wstępnie akceptujemy (zawsze pozostaje możliwość odrzucenia na dalszym etapie oceny).

W przypadku gdy oceniana nieciągłość ma długość $l > l_{\max}$ (n. długa) to sprawdzamy czy jej wysokość h nie przekracza limitu h_1 określonego w ostatniej kolumnie tabeli. Jeśli $h > h_1$ nieciągłość odrzucamy, jeśli $h \leq h_1$ to wstępnie akceptujemy. Należy zauważyć, że w tym przypadku limit wysokości nie zależy od rodzaju nieciągłości.

Wstępna akceptacja pojedynczych nieciągłości nie determinuje ich ostatecznej oceny. W tym celu należy zastosować dwa dodatkowe kryteria: sumarycznej długości indywidualnych wskazań na odcinku $12t$ oraz grupowania wskazań.

Sumaryczna długość indywidualnych wskazań na odcinku spoiny o długości $12t$ (t – grubość nominalna spoiny) nie może przekroczyć następujących wartości:

- dla poziomu akceptacji 1: $3,5t$ max. 150 mm
- dla poziomu akceptacji 2: $4,0t$ max. 200 mm
- dla poziomu akceptacji 3: $4,5t$ max. 250 mm

Ponieważ w normie nie określono inaczej należy wnosić, że sumowanie długości dotyczy wszystkich wskazań o mierzalnej długości, tj. zarówno tych akceptowalnych jak i nieakceptowalnych.

Kryterium grupowania podlegają wszystkie wskazania za wyjątkiem wskazań punktowych. Dwa sąsiadujące wskazania powinny być zgrupowane i oceniane jako jedno większe wskazanie wówczas gdy:

- odległość między nimi na osi długości spoiny jest mniejsza niż długość dłuższego z nich
- odległość między nimi na osi głębokości spoiny jest mniejsza niż wysokość wyższego z nich

Przyjmuje się, że długość zgrupowanego wskazania obejmuje łączną długość obu wskazań powiększoną o odległość między nimi. Wysokość zgrupowanego wskazania obejmuje wysokość obu wskazań oraz różnicę głębokości między wskazaniami.

Grupowanie zawsze dotyczy dwóch indywidualnych wskazań, nie można stosować dalszego grupowania raz zgrupowanych wskazań.

Ocena wskazań punktowych jest następująca. O ich akceptowalności decyduje liczba wskazań na 150 mm odcinku spoiny. Kryterium oceny wskazań punktowych jest jednakowe dla wszystkich poziomów akceptacji i określone następującym wzorem:

$$N = 1,2t$$

gdzie: t – grubość nominalna spoiny wyrażona w mm,

N – dopuszczalna liczba wskazań na 150 mm odcinku spoiny (uzyskiwana po zaokrągleniu wyniku do wyższej liczby całkowitej)

7. ZAKOŃCZENIE

W artykule opisano zasady oceny wyników badań TOFD złączy spawanych według niedawno wprowadzonej normy EN ISO 15626. Norma ta stanowi ważne uzupełnienie zestawu norm dotyczących ultradźwiękowej techniki TOFD wprowadzonej do badań nieniszczących w latach 90-tych ubiegłego wieku.

Wraz z wprowadzeniem tej normy badania złączy spawanych techniką TOFD uzyskały status formalny równoważny badaniom konwencjonalnym prowadzonym metodą echa. Daje to podstawę do szerszego wykorzystania potencjału techniki TOFD w badaniach złączy spawanych. Dotyczy to zwłaszcza badań zautomatyzowanych, w których technika TOFD w połączeniu z techniką Phased Array stanowi najbardziej zaawansowane rozwiązanie dostępne obecnie w badaniach nieniszczących spoin.

LITERATURA

- [1] J. Verkooijen, TOFD used to replace radiography., Insight, Vol 37, No 6, June 1995.
- [2] S. Mackiewicz, Skomputeryzowana metoda TOFD – Nowe podejście do ultradźwiękowych badań spoin., Materiały III Seminarium „Ultradźwiękowe Badania Materiałów”, Zakopane 12-14 marca 1997.
- [3] S. Mackiewicz, J. Kopiński, Doświadczenia z zastosowań ultradźwiękowej techniki TOFD., Materiały VII Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane 14-16 marca 2001
- [4] M. Śliwowski, Badanie złączy spawanych o różnej grubości techniką TOFD, Materiały XVI Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane 9-12 marca 2010
- [5] M. Śliwowski, Zmechanizowane badanie ultradźwiękowe złączy spawanych techniką wielogłowicową (TOFD+PE)., Materiały XIX Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane 12-15 marca 2013
- [6] CEN/TS 14751:2004 Welding – Use of time-of-flight diffraction technique (TOFD) for examination of welds,
- [7] PN-EN ISO 10863:2011 Badania nieniszczące spoin – Badania ultradźwiękowe – Zastosowanie techniki dyfrakcji fal ultradźwiękowych (TOFD).
- [8] PN-EN ISO 15626:2014 Badania nieniszczące spoin – Technika czasu przejścia wiązki dyfrakcyjnej (TOFD) – Poziomy akceptacji.