

# Badania złączy spawanych techniką phased array w świetle wymagań PN-EN ISO 13588

Ultrasonic testing of welds with phased array according to PN-EN ISO 13588 standard

## Streszczenie

W pracy opisano podstawowe zasady ultradźwiękowych badań złączy spawanych techniką phased array zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 13588. Przedstawiono zakres i obszar zastosowania normy. Opisano typy skanów ultradźwiękowych zalecanych przez normę do badań spoin przy różnych poziomach techniki badania. Omówiono najważniejsze kalibracje systemów PA oraz inne aspekty ich przygotowania do badań spoin. Opisano metodykę wykonywania badań oraz oceny ich wyników wskazując na aspekty specyficzne dla zautomatyzowanej techniki phased array. Najważniejsze zagadnienia zilustrowano przykładami zaczerpniętymi z własnych badań oraz nadzorowanych wdrożeń. Wskazano na kluczowe znaczenie wprowadzonej normy dla upowszechnienia badań złączy spawanych techniką phased array.

**Słowa kluczowe:** badania NDT, UT, technika phased array, badanie spoin

## Abstract

The paper describes fundamental principles of ultrasonic testing of welded joints with phased array technique in line with PN-EN ISO 13588 standard. The scope of the standard was first explained. After that the different modes of phased array scanning were explained with reference to the testing levels. The most important calibrations and setups of PA systems were also described. Then the methodology of phased array weld testing was briefly described with specific attention to aspects characteristic to phased array technique. The most important topics were illustrated with examples taken from author's own practice and training experience. The paper emphasizes the importance of the newly introduced standard for wider implementation of phased array technology in weld testing.

**Keywords:** NDT, phased array technology, welded joints testing

## Wstęp

Pomimo coraz większego upowszechnienia ultradźwiękowej techniki phased array (UT-PA) w jej wdrażanie do praktyki badań nieniszczących było dotychczas utrudnione przez brak norm określających zasady jej stosowania do badań określonego typu wyrobów czy konstrukcji. W szczególności brak było formalnej podstawy do opracowywania instrukcji badań złączy spawanych umożliwiających jej wdrożenie na dużych projektach inwestycyjnych takich jak budowy rurociągów przesyłowych, zbiorników ciśnieniowych czy instalacji petrochemicznych. Sytuacja ta uległa istotnej zmianie wraz z pojawieniem się PN-EN ISO 13588:2013 [1] określającej zasady stosowania techniki phased array do badań złączy spawanych. Nieco wcześniej pojawiła się norma amerykańska ASTM E2700 [2]. Poza pewnymi różnicami co do zakresu stosowalności techniki PA (np. poziom automatyzacji badań, zakres grubości ścianek) zasady prowadzenia badań opisane w obu normach są podobne.

Do czasu wprowadzenia w/w norm badania spoin techniką phased array mogły być prowadzone jedynie w oparciu

o indywidualne procedury użytkowników co wymagało większego nakładu pracy oraz wiązało się z koniecznością ich kwalifikowania dla potrzeb konkretnego projektu czy instytucji nadzorującej. Wprowadzenie wymienionych norm uporządkowało i ujednoliciło zasady stosowania techniki phased array do badań złączy spawanych i tym samym stworzyło podstawę do ich szerszego wykorzystania w wielu dziedzinach współczesnej techniki. Kolejnym krokiem niezbędnym do szerokiego wdrożenia techniki PA w badaniach złączy spawanych jest upowszechnienie wymagań tych norm wśród specjalistów badań ultradźwiękowych a także kierowników laboratoriów oraz inspektorów zajmujących się nadzorem nad badaniami nieniszczącymi.

W niniejszej pracy omówiono podstawowe zasady badań ultradźwiękowych złączy spawanych techniką phased array zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 13588 [1]. Z uwagi na rozległość tematu ograniczono się do podstawowych aspektów metodyki badań oraz typowych zastosowań do badań złączy doczołowych ze stali niskostopowych. Ponieważ wiele

zapisów nowej normy bazuje na uregulowaniach dotychczasowych norm dotyczących badań złączy spawanych technikami tradycyjnymi (np. PN-EN ISO 17640) szczególną uwagę poświęcono nowym pojęciom i wymaganiom specyficznym dla techniki phased array. Omawiane zagadnienia zilustrowano przykładami zaczerpniętymi z literatury i własnych badań [3].

## Zakres i obszar zastosowania

Norma PN-EN ISO 13588 dotyczy zasad stosowania zautomatyzowanej techniki phased array do badań złączy spawanych o prostej geometrii z pełnym przetopem, łączących rury, płyty lub zbiorniki wykonane z niskostopowej stali węglowej. Minimalną grubość złączy spawanych, które można badać zgodnie z omawianą normą wynosi 6 mm. Norma nie ogranicza grubości maksymalnej co różni ją od ASTM E2700, która limituje grubość złączy do zakresu 9 - 200 mm. Należy również zauważyć, że PN-EN ISO 13588, w odróżnieniu od normy amerykańskiej, nie obejmuje badań manualnych techniką phased array. Badanie zautomatyzowane oznacza w jej ujęciu badanie z zastosowaniem skanera, który musi być wyposażony w enkoder położenia i zapewniać automatyczną rejestrację sygnałów ultradźwiękowych powiązaniu z położeniem głowicy na obiekcie. Skaner może być przesuwany wzdłuż spoiny zarówno w sposób zmechanizowany jak i ręcznie.

Norma PN-EN ISO 13588 opisuje jedynie techniki prowadzenia badań ultradźwiękowych złączy spawanych nie określając jednak kryteriów akceptacji. W tym sensie stanowi ona odpowiednik PN-EN ISO 17640 [4] opisującej zasady konwencjonalnych badań złączy spawanych. Analogia między tymi normami rozciąga się również na sposób definiowania poziomów badania (testing levels), który odnosi się do poziomów jakości złączy spawanych (quality levels) określonych w PN-EN ISO 5817.

Sposób powiązania między wymaganymi poziomami badania a poziomami jakości złączy spawanych określa norma PN-EN ISO 17635. Został on przedstawiony w tabeli I.

**Tablica I.** Zalecane poziomy techniki badania dla różnych poziomów jakości złączy spawanych

**Table I.** Testing levels recommended for different quality levels of welded joints

Poziom badania wg EN ISO 13588	Poziom jakości wg EN ISO 5817
A	C,D
B	B
C	wg uzgodnień
D	zastosowania specjalne

Podobnie jak w normie dotyczącej badań konwencjonalnych poziomy badania od A do C oznaczają stopniowy wzrost wymagań normy odnośnie liczby technik skanowania czy próbek odniesienia. Poziom D odnosi się do zastosowań specjalnych, gdzie zainteresowane strony samodzielnie uzgadniają szczegóły techniki badania w formie pisemnej procedury na podstawie specyficznych uwarunkowań danego projektu (np. badania spoin z materiałów innych niż stal, badania automatyczne, badania w podwyższonych temperaturach).

Biorąc pod uwagę (opisany dalej) sposób kalibracji systemu PA oraz zalecany sposób nastawiania czułości badania (wg wymagań PN-EN ISO 17640) metodyka badań phased array opisana w PN-EN ISO 13588 umożliwia wykorzystanie

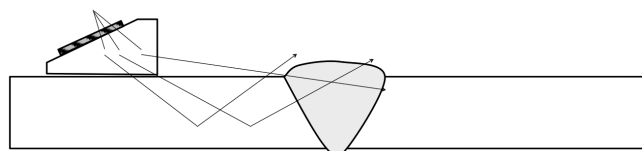
dotychczasowych kryteriów oceny jakości złączy spawanych zawartych np. w PN-EN ISO 11666. Jest to niezwykle ważny aspekt tej normy umożliwiający szybkie wdrażanie techniki phased array w zastępstwie stosowanej dotychczas techniki konwencjonalnej.

## Techniki skanowania

Norma PN-EN ISO 13588 definiuje techniki skanowania ultradźwiękowego phased array jakie należy stosować dla poziomów badań A, B i C. Badacz ma do wyboru kilka technik badania (test set-ups) które, w zależności od wymaganego poziomu badania oraz posiadanej aparatury, mogą być stosowane pojedynczo lub w określonych kombinacjach.

- Norma definiuje następujące techniki skanowania spoin:
- Skanowanie wzdłuż spoiny ustalonymi kątami wiązek przy ustalonej odległości głowicy od środka spoiny
  - Skanowanie rastrowe ustalonymi kątami wiązek
  - Skanowanie typu E-scan wzdłuż spoiny przy ustalonej odległości głowicy od środka spoiny
  - Skanowanie typu S-scan wzdłuż spoiny przy ustalonej odległości głowicy od środka spoiny
  - Skanowanie rastrowe typu S-scan
  - Skanowanie TOFD uzyskiwane parą głowic phased array
  - Skanowanie na wady porzeczne (skewed scan)

Skanowanie ustalonymi kątami wiązek (rys. 1) jest to typ skanowania podobny do stosowanego w zautomatyzowanych badaniach spoin głowicami jednoprotownikowymi z tą różnicą, że w badaniach PA zamiast kilku głowic o różnych kątach stosuje się jedną głowicę generującą kilka wiązek wprowadzanych pod różnymi kątami. Jest to rozwiązanie pozwalające na zastąpienie ciężkich wielogłowicowych skanerów mniejszymi skanerami dwugłowicowymi, jednak idea badania oraz zakres uzyskiwanych informacji jest taki sam jak w przypadku konwencjonalnych badań skanerami wielogłowicowymi.



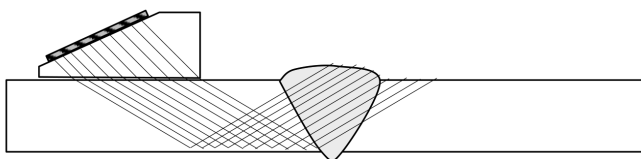
**Rys. 1.** Skanowanie ustalonymi kątami wiązek (rastrowe lub wzdłuż spoiny)

**Fig. 1.** Scanning with fixed beam angles (raster or linear)

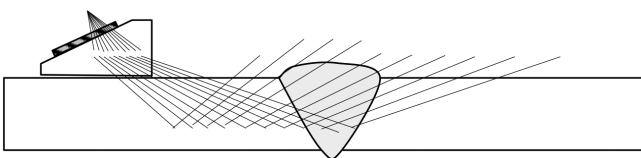
W skanowaniu typu E-scan (rys. 2) kolejne zespoły przetworników głowicy liniowej pobudzane są w kolejnych cyklach częstotliwości powtarzania tak, że punkt wejścia wiązki ultradźwiękowej stopniowo przesuwa się wzdłuż głowicy. Dzięki temu kolejno generowane wiązki ultradźwiękowe penetrują różne obszary złącza spawanego. Jest to rozwiązanie analogiczne jak w konwencjonalnych badaniach manualnych, z tym że przemieszczanie wiązki w kierunku prostopadłym do osi spoiny odbywa się elektronicznie bez fizycznego przesuwu głowicy. Planując badanie należy dobrać długość szeregu fazowego głowicy, kąt wprowadzania fali oraz odległość głowicy od środka spoiny tak, aby kolejne wiązki E-skanu pokryły całą objętość spoiny wraz z przylegającymi strefami wpływu ciepła.

Skanowanie typu E dobrze nadaje się do wykrywania defektów typu przyklejeń bocznych pod warunkiem odpowiedniego dopasowania kąta wprowadzania wiązki do kąta ukosowania rowka spawalniczego. Wadą E-skanu jest natomiast konieczność stosowania długich, wieloprotwor-

nikowych głowic phased array zapewniających odpowiednio duży zakres przesuwu wiązki. Duży rozmiar przyłgi głowicy wiąże się jednak z koniecznością przygotowania szerokich obszarów przesuwu głowic oraz problemami z utrzymaniem sprężenia akustycznego.



Rys. 2. Skanowanie typu E-skan wzdłuż spoiny  
Fig. 2. E-scan at fixed probe position along the weld



Rys. 3. Skanowanie sektorowe typu S (rastrowe lub wzdłuż spoiny)  
Fig. 3. Sectorial scanning of S type (raster or linear)

Najbardziej uniwersalnym i najczęściej stosowanym w badaniach spoin typem skanowania phased array jest tzw. skan sektorowy nazywany też skanem typu S. W tym przypadku system PA generuje z jednej apertury szereg wiązek ultradźwiękowych różniących się kątem wejścia do badanego materiału (patrz rys. 3). Planując badanie należy dobrać zakres kątowy skanowania oraz odległość głowicy od osi spoiny, tak aby wiązki skanu sektorowego pokryły całą objętość spoiny wraz z przylegającymi strefami wpływu ciepła. W przypadku, gdy nie jest to możliwe do uzyskania z jednego położenia głowicy (np. dla grubszych spoin) należy zaplanować wykonanie dwóch lub większej liczby skanów z różnymi odległościami głowicy od środka spoiny.

Zaletą badania z wykorzystaniem S-skanu jest mniejszy rozmiar głowic, które zwykle zawierają jedynie 16 elementów, co ułatwia utrzymanie sprężenia akustycznego oraz zmniejsza wymaganą szerokość obszarów przesuwu głowic.

Szczegółowe wymagania co do liczby oraz rodzaju skanów ultradźwiękowych jakie należy wykonać na spoinie przy określonym poziomie badania określono w tabeli II PN-EN ISO 13588. Przykładowo dla poziomu B wymagane są co najmniej dwa liniowe skany sektorowe (typu S) wykonane głowicami umieszczonymi po obu stronach spoiny lub z jednej strony spoiny przy różnych odległościach głowicy od środka spoiny. Alternatywnie można zastosować skany liniowe typu E wykonywane z obu stron spoiny przy dwóch różnych kątach wprowadzenia wiązki różniących się o co najmniej  $10^\circ$ .

## Przygotowanie i kalibracja aparatury badawczej

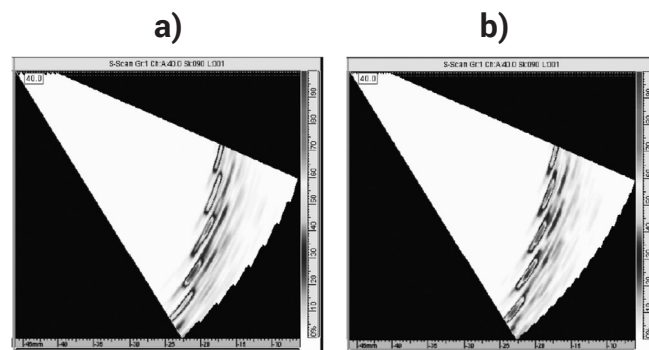
Przygotowanie systemu phased array do badania spoin jest dużo trudniejsze i bardziej złożone niż w przypadku konwencjonalnych badań ultradźwiękowych. Wynika to z potrzeby wprowadzenia szeregu parametrów nie występujących w konwencjonalnych badaniach spoin oraz wykonania dodatkowych kalibracji. Dotyczy to np. parametrów geometrycznych niezbędnych do prawidłowej wizualizacji przekroju spoiny (grubość materiału, geometria rowka spawalniczego, pozycjonowanie głowic względem spoiny). Konieczne jest również określenie parametrów niezbędnych do wygenerowania praw opóźnień dla skanu typu S lub E (apertura wirtualna, zakres kątowy lub liniowy, skok kątowy lub liniowy, odległość ogniskowa) oraz przeprowadzenie szeregu

kalibracji systemu badawczego (ACG, TCG, czułość badania, rozdzielczość enkodera).

Ze względu na dużą liczbę parametrów koniecznych do wprowadzenia we właściwej kolejności nowoczesne systemy phased array posiadają specjalne kreatory, które prowadzą użytkownika przez wszystkie etapy niezbędne do przygotowania systemu do badań. Ponieważ poszczególne rozwiązania aparaturowe różnią się między sobą nie omówiono tutaj szczegółów całego procesu zwracając jedynie uwagę na specyficzne wymagania charakterystyczne dla techniki phased array. Bardziej szczegółowe omówienie całego procesu przygotowania systemu PA do badań można znaleźć w pracy [3].

Zakładając, że do systemu PA wprowadzono wszystkie wymagane parametry badanych spoin, podłączonych głowic oraz zaplanowanych skanów do rozwiązania pozostaje problem całościowej kalibracji czułości badania. Istotą tego problemu jest to aby zobrazowania typu S, E, B lub C generowane przez system PA mogły być podstawą do oceny wad na podstawie amplitudy wskazań kodowanej za pomocą palety kolorów. Podobnie jak w konwencjonalnych badaniach ultradźwiękowych amplituda rejestrowanych ech ultradźwiękowych musi być jednoznacznie powiązana z wielkością reflektora odniesienia (np. otworu poprzecznego lub płaskodennego). W badaniach techniką PA problem polega na tym, że system generuje kilkadziesiąt różnych wiązek ultradźwiękowych, które należy skalibrować w jednakowy sposób. Jest to szczególnie istotne w przypadku skanu sektorowego, w którym wiązki ultradźwiękowe wprowadzane są pod różnymi kątami i mają różne amplitudy z uwagi na kątową zależność współczynnika transmisji na granicy klin-materiał. Oznacza to, że czułość każdej wiązki skanu sektorowego musi być indywidualnie skorygowana ze względu na kąt jej wprowadzenia. Funkcjonalność ta określana jest skrótem ACG (Angle Corrected Gain) i wymaga przeprowadzenia specjalnej procedury kalibracyjnej na otworu cylindrycznym.

Niezależnie od znormalizowania czułości wszystkich wiązek skanu sektorowego pozostaje problem związany z odległościową korekcją amplitudy wskazań. W przypadku konwencjonalnych badań ultradźwiękowych wykorzystuje się w tym celu krzywe DAC lub DGS, do których przyrównuje się amplitudy ech uzyskiwanych na zobrazowaniu typu A. W przypadku badań PA takie podejście nie jest użyteczne, ponieważ oceny wskazań dokonuje się na zobrazowaniach typu S, E, B lub C, na których miarą amplitudy wskazania jest jego kolor. Chcąc, aby kolor wskazania jednoznacznie określał wielkość równoważną reflektora niezależnie od jego odległości od głowicy należy dodatkowo przeprowadzić odległościową korekcję amplitudy TCG. Dopiero wykonanie obu kalibracji (ACG i TCG) spowoduje, że kolor wskazania będzie jednoznaczną miarą wielkości równoważnej reflektora



Rys. 4. Skan sektorowy ze wskazaniami od jednakowych otworów poprzecznych usytuowanych w różnych miejscach próbki uzyskany a) przed oraz b) po wykonaniu kalibracji ACG i TCG  
Fig. 4. Sectorial scans with indications from identical side drilled holes situated at different depths of reference block registered a) before and b) after ACG and TCG calibrations

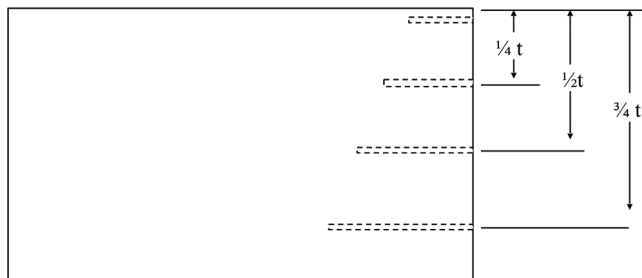
niezależnie od jego położenia na obrazowaniu. Na rysunku 4 pokazano skan sektorowy próbki wzorcowej z jednakowymi otworami poprzecznymi na różnych głębokościach wykonany przed oraz po kalibracjach ACG i TCG. Widać, że dopiero po wykonaniu kalibracji jednakowe reflektory dają jednakowe wskazania w kolorze czerwonym.

Po wykonaniu kalibracji ACG i TCG nastawienie docelowej czułości badania wraz z ewentualną korektą na straty przejścia jest bardzo proste i sprowadza się do nastawienia ogólnego wzmocnienia systemu (tj. wzmocnienia odnoszącego się do wszystkich generowanych wiązek) w taki sposób aby echo wybranego reflektora odniesienia osiągnęło wymaganą wysokość (np. 80% FSH) na dowolnym obrazowaniu typu A. Nie ma przy tym znaczenia, którą wiązką trafiamy w przedmiotowy reflektor ponieważ wszystkie A-skany mają jednakowe, znormalizowane czułości. Typy i rozmiary reflektorów odniesienia, jakie należy stosować do nastawiania czułości badania powinny być ustalone zgodnie z EN ISO 17640 [4], czyli dokładnie w ten sam sposób jak w badaniach konwencjonalnych.

Po wykonaniu kalibracji ACG i TCG oraz ustawieniu czułości badania obrazowania uzyskiwane techniką PA pozwalają nie tylko lokalizować reflektory ultradźwiękowe, lecz także (na podstawie koloru wskazań) oceniać ich wielkość równoważną. Dzięki temu można dokonywać oceny wskazań według tych samych zasad jak w konwencjonalnych badaniach ultradźwiękowych. Przykładowo można stosować kryteria akceptacji spoin określone w EN ISO 11666 [5].

## Próbki odniesienia

Norma PN-EN ISO 13588 wymaga aby nastawy systemu phased array zostały, przed rozpoczęciem badań spoin, zweryfikowane na specjalnych próbkach odniesienia. Wymiary oraz rodzaj, liczba i usytuowanie reflektorów odniesienia, które powinny znajdować się w tych próbkach uzależnione jest od poziomu badania oraz grubości badanych spoin. Generalnie próbki odniesienia powinny być wykonane z materiału podobnego jak badane złącza oraz mieć grubość zawierającą się w przedziale od 0,8 do 1,5 grubości materiału rodzimego, przy czym maksymalna różnica grubości nie może przekroczyć 20 mm. Szczegółowe zalecenia co do umiejscowienia i wymiarów reflektorów odniesienia określono w dodatku A przedmiotowej normy. Podstawowymi reflektorami odniesienia są otwory poprzeczne o średnicy od 2,0 do 6,0 mm w zależności od grubości próbki odniesienia. Dodatkowymi reflektorami odniesienia, stosowanymi tylko w przypadku poziomów badania B i C, są nacięcia o wysokości od 1 do 3 mm w zależności od grubości próbki odniesienia. Na uwagę zasługuje fakt, że nacięcia zalecane



**Rys. 5.** Zalecana konfiguracja próbki odniesienia dla poziomu badania B i grubości  $t$  powyżej 25 mm. Szczegółowe wymiary reflektorów odniesienia zależą od grubości próbki

**Fig. 5.** Recommended configuration of reference block for testing level B and thickness  $t$  above 25 mm. Detailed dimensions of reference reflectors depend on block thickness

w omawianej normie powinny mieć szerokość  $0,2 \pm 0,05$  mm co może powodować pewne trudności z wykonaniem tego rodzaju próbek. Przykładowa konfiguracja próbki odniesienia dla poziomu badania B pokazana została na rysunku 5.

Należy podkreślić, że podstawowym zastosowaniem próbek odniesienia nie jest nastawa czułości badania, którą należy wykonać zgodnie z PN-EN ISO 17640, lecz całościowe sprawdzenie prawidłowości przygotowania systemu badawczego przed rozpoczęciem badań (procedure qualification). W szczególności procedura badawcza powinna zapewnić wykrycie wszystkich reflektorów odniesienia oraz wykazać pokrycie objętości materiału odpowiadające głębokości i szerokości badanych spoin wraz ze strefami wpływu ciepła.

## Wykonanie badania oraz ocena jego wyników

Zautomatyzowane badanie spoiny systemem phased array polega na kontrolowanym przemieszczaniu wzdłuż spoiny jednej lub kilku głowic. Przemieszczenie głowic rejestrowane jest przez enkoder położenia, który przekazuje do jednostki centralnej aktualną informację o przebytej drodze. Po przebyciu określonych odcinków drogi (np. co 1 mm), wykonywane są pełne sekwencje elektronicznych skanów typu E lub S i zapisywane w pamięci aparatu.

W przypadku złączy spawanych o mniejszej grubości badanie prowadzone jest zwykle dwiema głowicami PA umieszczonymi symetrycznie po obu stronach spoiny (patrz rys. 6). W przypadku złączy o większych grubościach konieczne jest zastosowanie kilku par głowic penetrujących różne obszary spoiny. Alternatywnym rozwiązaniem, nie wymagającym stosowania rozbudowanego skanera, może być wykonywanie kilku skanów tej samej spoiny za pomocą jednej pary głowic przy różnych odległościach głowic od środka spoiny. W każdym przypadku należy dokładnie zaplanować parametry skanów tak, aby pokryły one całą objętość spoiny wraz z przylegającymi strefami wpływu ciepła.



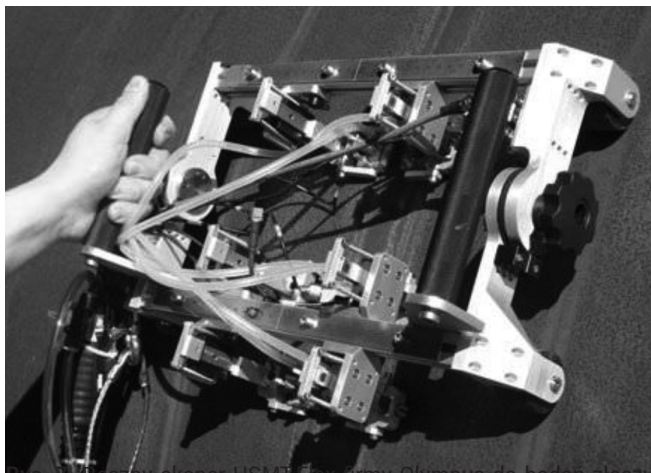
**Rys. 6.** Typowy schemat badania spoiny systemem phased array  
**Fig. 6.** Typical scheme of weld testing with phased array system

Zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 13588 zapisywane powinny być wszystkie A-skany składające się na każdy skan typu S lub E. Umożliwia to pełną analizę danych pomiarowych zebranych podczas skanowania, niezależnie od bieżącego ustawienia bramek pomiarowych. Należy pamiętać, że w przypadku najprostszyc systemów PA zapisywane są jedynie wynikowe obrazowania typu E lub S generowane przez system w czasie skanowania. Brak zapisu indywidualnych A-skanów oznacza, że systemy takie nie spełniają warunków omawianej normy.

Istotnym aspektem badania techniką phased array jest dobre sprzężenie akustyczne między głowicami a powierzchnią materiału. Ze względu na konieczność precyzyjnego sterowania wiązką ultradźwiękową jakość sprzężenia akustycznego w badaniach PA jest bardziej krytyczna niż w badaniach konwencjonalnych. Zalecane jest sprzężenie wodne realizowane przez ciągły dopływ wody pod głowice.

W tym celu stosuje się specjalnie zaprojektowane kliny głowic posiadające otwory irygacyjne oraz króćce do przyłączenia przewodów doprowadzających wodę pod niewielkim ciśnieniem. Przykład uniwersalnego ręcznego skanera do badań spoin półautomatyczną techniką PA i/lub TOFD pokazano na rysunku 7.

Skaner ten pozwala na zamontowanie kilku par głowic phased array lub TOFD, jest wyposażony w zintegrowany enkoder położenia oraz system irygacyjny zapewniający ciągły dopływ wody pod głowice. Skaner utrzymywany jest na obiekcie za pomocą kółek magnetycznych, co ułatwia operatorowi prowadzenie go wzdłuż spoiny. Przegubowa konstrukcja ramy skanera pozwala na dostosowywanie go do badań złączy obwodowych o średnicach powyżej 114 mm lub złączy płaskich.



Rys. 7. Ręczny skaner HSMT-Flex firmy Olympus do badań złączy spawanych techniką PA oraz TOFD

**Fig. 7.** Manual scanner HSMT-Flex of Olympus for testing welded joints with PA and TOFD techniques

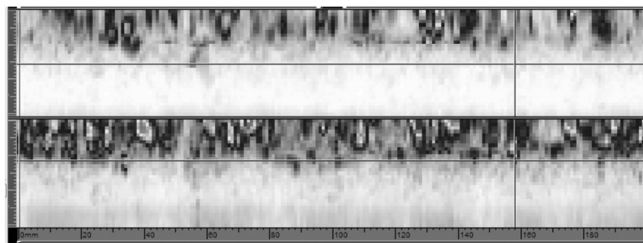
Po przeskanowaniu zaplanowanej długości spoiny należy zatrzymać skaner i zapisać surowe wyniki skanowania w pamięci aparatu. Nazwa pliku powinna jednoznacznie identyfikować obiekt i spoinę. W zależności od organizacji badań, ocenę wyników badania można przeprowadzić bezpośrednio po zakończeniu skanowania lub też w warunkach biurowych po przeskanowaniu większej partii spoin. W celu zwiększenia efektywności wykorzystania sprzętu istnieje możliwość przeniesienia zapisanych skanów do osobnego komputera z odpowiednim oprogramowaniem i równoległego prowadzenia oceny wyników badań oraz sporządzania raportów. W ten sposób ekipa badająca może przeskanować znacznie większą liczbę spoin w tym samym czasie.

Dane zarejestrowane przez system PA podczas skanowania umożliwiają wszechstronną i dokładną analizę stanu złącza spawanego. Podstawowe etapy oceny wyników badania są takie same jak w przypadku konwencjonalnych badań spoin techniką manualną. W przypadku oceny skanów PA proces ten jest jednak bardziej obiektywny i lepiej udokumentowany.

Pierwszym elementem analizy wyników jest ocena poprawności wykonania skanu oraz kompletności jego zapisu. Norma dopuszcza utratę do 5% pojedynczych linii skanu jednak nie zezwala na pominięcie dwóch lub więcej przylegających linii zapisu. Należy też zwrócić uwagę na jakość sprzężenia akustycznego, prawidłowość nastawy czułości badania oraz stosunek sygnału do szumu.

Kolejnym i zwykle najtrudniejszym etapem oceny wyników badania jest odróżnienie wskazań wad od ech kształtu pochodzących od nierówności lica lub grani. Na rysunku 8 pokazano dwa nieskorygowane C-skany zarejestrowane

przez dwie głowice PA umieszczone po obu stronach badanej spoiny. Na zobrazowaniach tych uwidocznione są amplitudy zarejestrowanych ech ultradźwiękowych w funkcji położenia na długości spoiny (oś pozioma) oraz kąta wiązki ultradźwiękowej (oś pionowa). Analizując nieskorygowany C-skan operator widzi jednocześnie wszystkie wskazania ultradźwiękowe zarejestrowane wszystkimi wiązkami danej głowicy na określonej długości spoiny. W ten sposób może np. zidentyfikować odcinki spoiny bez istotnych wskazań nie wymagające dalszej uwagi. Oprócz tego występują liczne odcinki spoiny wykazujące silne echa ultradźwiękowe, które trudno ocenić jedynie na podstawie C-skanu.

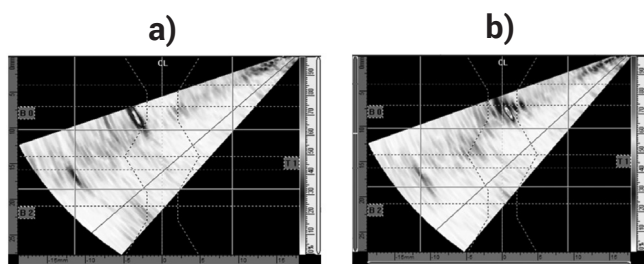


**Rys. 8.** Przykład zobrazowań typu C z dwóch głowic PA umieszczonych po przeciwnych stronach spoiny

**Fig. 8.** Example C-scans registered from two PA probes situated on the opposite sides of the weld

Aby uzyskać bardziej szczegółowe informacje o konkretnych wskazaniach należy skorzystać z innych zobrazowań wyników badania oferowanych przez oprogramowanie systemu phased array. W szczególności należy przeanalizować skany sektorowe w miejscach, w których na C-skanie zarejestrowano silne echa. Podstawową zaletą analizy wskazań na zobrazowaniach typu S jest fakt, że reflektory uwidocznione są tutaj na tle geometrycznego przekroju spoiny. Daje to dobrą podstawę do oceny prawdopodobnego źródła ich pochodzenia.

Na rysunku 9a pokazano przykładowy skan sektorowy obrazujący silne echo pochodzące z obszaru grani spoiny, ok. 3 mm za jej środkiem. Położenie tego wskazania sugeruje, że jest to echo kształtu powstałe w wyniku odbicia fali od krawędzi wycieku z grani. Dla potwierdzenia tej interpretacji należy dodatkowo przeanalizować skan sektorowy uzyskany głowicą usytuowaną po przeciwnej stronie spoiny.



**Rys. 9.** Skany sektorowe spoiny typu V o grubości 7,2 mm: a) w miejscu występowania echa kształtu od wycieku z grani, b) w miejscu występowania echa od braku przetopu

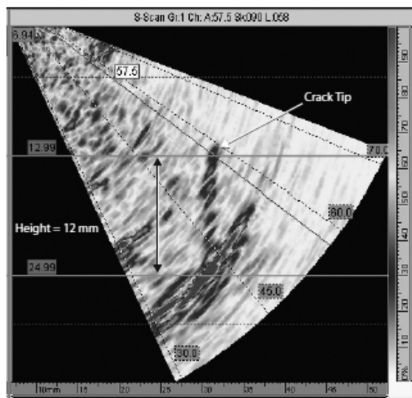
**Fig. 9.** Sectorial scans of V-type weld of 7,2 mm thickness: a) in position showing geometry echo from excess penetration, b) in position showing lack of root penetration defect

Umieszczenie reflektora ultradźwiękowego na przekroju spoiny jest ważnym, ale nie jedynym wyznacznikiem rodzaju wskazania w badaniach phased array. Bardzo istotną charakterystyką wskazań ultradźwiękowych uwidocznionych na zobrazowaniach PA jest ich kształt oraz układ. Przykładowo na skanie sektorowym pokazanym na rysunku 10 widoczne jest jedno duże echo od reflektora znajdującego się na głębokości zbliżonej do grubości materiału rodzimego

(ok. 25 mm) oraz szereg mniejszych odbić układających się wzdłuż linii prostopadłej do powierzchni elementu.

Obraz ten należy interpretować jako silne odbicie od naroża tworzonego przez pęknięcie z dodatkowymi małymi echemi pochodzącymi od załomków tego pęknięcia. Na podstawie różnicy głębokości tych odbić ocenić można wysokość wykrytego pęknięcia (odległość między zieloną i czerwoną linią kursora).

Kolejnym rodzajem zobrazowania phased array przydatnym przy analizie wskazań jest zobrazowanie typu B wzdłuż spoiny. W przypadku skanowania typu S zobrazowania typu B można generować w sposób dynamiczny dla dowolnie wybranego kąta wiązki. Oznacza to, że można oglądać przekroje podłużne spoiny „widziane” przez wiązki o różnych kątach załamania. Przykładowo na rysunku 11 pokazano zobrazo-



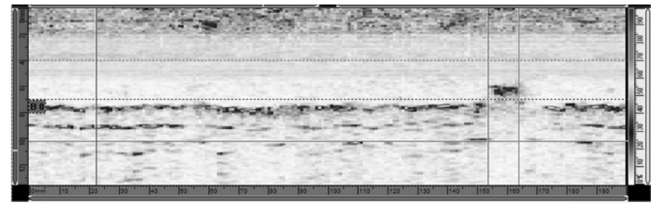
**Rys. 10.** Skan sektorowy ze wskazaniem pęknięcia wychodzącego od powierzchni przeciwległej

**Fig. 10.** Sectorial scan of a weld with indication of the crack starting at the far surface

wanie uzyskane wiązką o kącie załamania  $\beta = 68^\circ$ , na którym wyraźnie widać umiejscowienie wady typu brak przetopu na tle silnych ech pochodzących od wycieku z grani.

Po określeniu charakteru wskazania należy określić jego rozmiary oraz położenie w spoinie. Ten etap oceny jest w badaniu PA stosunkowo łatwy i sprowadza się wykonania odpowiednich pomiarów kursorowych na odpowiednich zobrazowaniach. Przykładowe położenia kursorów pomiarowych dla oceny wysokości oraz długości wykrytych wad pokazano odpowiednio na rysunkach 10 i 11.

Norma PN-EN ISO 13588 nie określa kryteriów akceptacji wskazań wad a jedynie daje podstawę do takiej oceny. Wskazania zakwalifikowane jako pochodzące od wad można ocenić zarówno na podstawie długości i amplitudy echa (rozmiaru reflektora równoważnego) lub też na podstawie długości i wysokości. Zainteresowane strony mogą samodzielnie ustalić odpowiednie kryteria akceptacji lub też odwołać się do istniejących norm. Można w tym celu wykorzystać np. PN-EN ISO 11666 [5].



**Rys. 11.** Zobrazowanie typu B obrazujące wadę typu brak przetopu (między czerwonym i zielonym kursorem) na tle ech kształtu od wycieku z grani

**Fig. 11** B-scan showing lack of penetration defect (between red and green cursors) on the background of geometry indications from the excess penetration

## Podsumowanie

W artykule omówiono podstawowe aspekty badań złączy spawanych ultradźwiękową techniką phased array zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 13588:2013 [1]. Dzięki wprowadzeniu tej normy badania złączy spawanych techniką PA znalazły długo oczekiwaną podstawę formalną i techniczną.

Aby wykorzystać potencjał techniki phased array w badaniach złączy spawanych konieczny jest odpowiednio przygotowany i nadzorowany proces wdrożenia tej techniki w laboratorium badań nieniszczących. Zdecydowanie nie wystarczy tutaj sam zakup aparatury badawczej i kilkugodzinne przeszkolenie operatorów badań ultradźwiękowych u jej dostawcy. Zgodnie z zapisem normy PN-EN ISO 13588 personel wykonujący badania spoin techniką PA powinien być wykwalifikowany zgodnie z ISO 9712 (lub EN 473) i posiadać odpowiedni stopień w metodzie ultradźwiękowej. Dodatkowo powinien on przejść udokumentowane przeszkolenie specjalistyczne w zakresie badań spoin techniką phased array. Norma nie precyzuje zakresu tego szkolenia ale przykłady zagraniczne oraz praktyczne doświadczenia autora wskazują, że konieczny jest ok. 80 godzinny kurs poświęcony podstawom techniki PA, obsłudze konkretnego systemu badawczego oraz praktycznym badaniom reprezentatywnych próbek spoin wraz z oceną. Z uwagi na szerokie wykorzystanie oprogramowania komputerowego dodatkowym wymaganiami wstępnym jest dobra znajomość obsługi komputerów i oprogramowania.

Biorąc pod uwagę zalety techniczne, wydajność, mobilność oraz uniwersalność techniki phased array staje się ona atrakcyjną alternatywą dla konwencjonalnych badań złączy spawanych. W połączeniu z techniką TOFD stanowi najskuteczniejsze obecnie narzędzie badań złączy spawanych zarówno podczas budowy nowych konstrukcji jak też w trakcie remontów i eksploatacji. Wprowadzenie PN-EN ISO 13588 usunęło istotną przeszkodę na drodze upowszechnienia badań złączy spawanych techniką phased array tak więc należy oczekiwać szybkiego wzrostu jej stosowania w najbliższych latach.

## Literatura

- [1] PN-EN ISO 13588 Badania nieniszczące spoin – Badanie ultradźwiękowe - Stosowanie technologii zautomatyzowanej głowicy mozaikowej.
- [2] ASTM E2700-14 Standard Practice for Contact Ultrasonic Testing of Welds Using Phased Arrays.
- [3] S. Mackiewicz, M. Zgutka, Ultradźwiękowe badania złączy spawanych techniką phased array, Materiały XXI Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 18-20 marca 2015.
- [4] PN-EN ISO 17640 Badania nieniszczące spoin - Badania ultradźwiękowe - Techniki, poziomy badania i ocena.
- [5] PN-EN ISO 11666 Badania nieniszczące spoin - Badania ultradźwiękowe złączy spawanych - Poziomy akceptacji.
- [6] Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications., R/D Tech Guideline., 2004, 2005, 2007 by Olympus NDT
- [7] Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications., Advanced Practical NDT Series, Olympus NDT, 2007