
**XXI Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane 18-20 marca 2015**

**ULTRADŹWIĘKOWE BADANIA ZŁĄCZY SPAWANYCH
TECHNIKĄ PHASED ARRAY**

Sławomir MACKIEWICZ
IPPT PAN, Warszawa
smackiew@ippt.pan.pl
Mateusz ZGUTKA
Mostostal, Warszawa

1. Wstęp

Ultradźwiękowa technika *phased array* (UT-PA) znajduje coraz szersze zastosowanie w badaniach nieniszczących materiałów i konstrukcji. Na seminariach w Zakopanem omawiane były jej zastosowania do badań degradacji rurociągów [1], wirników turbin [2], odlewów [3] oraz struktur kompozytowych stosowanych w przemyśle lotniczym [4,5]. Relatywnie mało uwagi poświęcono dotychczas wykorzystaniu techniki *phased array* do badań złączy spawanych, mimo, że badania spoin stanowią jeden z najważniejszych obszarów zastosowań metody ultradźwiękowej. W dużej mierze wynikało to z faktu, że badania spoin techniką *phased array* nie były znormalizowane. Brak było formalnej i merytorycznej podstawy do opracowywania technik i instrukcji badań, co stało na przeszkodzie szerszemu wykorzystaniu metody PA na budowach rurociągów i innych konstrukcji spawanych. W ostatnim czasie sytuacja ta uległa korzystnej zmianie wraz z pojawieniem się normy PN-EN ISO 13588 [6] określającej zasady stosowania techniki *phased array* do zautomatyzowanych badań złączy spawanych. Nieco wcześniej pojawiła się norma amerykańska ASTM E2700 [7] określająca zasady stosowania techniki PA zarówno do badań zautomatyzowanych jak i manualnych.

Pojawienie się w/w norm w znacznym stopniu uporządkowało i ujednoliciło zasady stosowania techniki *phased array* do badań złączy spawanych. Do tego czasu mogły być one prowadzone w oparciu o zalecenia producentów sprzętu (np. [8]) lub samodzielnie opracowywane i walidowane procedury użytkowników.

Badania złączy spawanych techniką *phased array* mają szereg zalet i w dłuższej perspektywie czasu mogą zastąpić konwencjonalne badania spoin głowicami jednoprzetwornikowymi. Ich kluczową cechą jest możliwość elektronicznego sterowania wiązką ultradźwiękową wprowadzaną do materiału. Drugą ważną zaletą jest możliwość graficznego przedstawienia wskazań ultradźwiękowych na obrazowaniach typu S, E, B i C w odniesieniu do przekrojów badanego złącza spawanego. Ta druga możliwość wykorzystywana była również w zautomatyzowanych systemach z głowicami jednoprzetwornikowymi jednak łączyło się to z koniecznością stosowania dużych wielogłowicowych skanerów i w konsekwencji ograniczało zakres zastosowań tej metody.

Zintegrowane badanie PA + TOFD stanowi obecnie najbardziej nowoczesny i efektywny sposób badań nieniszczących złączy spawanych. Obie techniki uzupełniają się wzajemnie i pozwalają na uzyskanie najbardziej wiarygodnych i dokładnych informacji o wadach znajdujących się w spoinie. Jednocześnie obie techniki zapewniają pełną rejestrację wyników badania w postaci enkodowanych zapisów komputerowych.

Niezależnie od wielu zalet techniki *phased array* jej wdrożenie jest dla potencjalnych użytkowników poważnym wyzwaniem. Po pierwsze jest to technika stosunkowo droga z powodu wysokiej ceny defektoskopów i głowic. Po drugie jest ona relatywnie trudna do opanowania przez personel badań ultradźwiękowych. Liczba parametrów, jakie należy wprowadzić do systemu oraz wieloetapowy proces jego kalibracji stanowi poważną barierę nawet dla doświadczonych operatorów badań ultradźwiękowych, którzy mieli dotychczas do czynienia jedynie z prostymi defektoskopami jednokanałowymi. Oprócz obsługi skomplikowanego oprogramowania systemu *phased array* kluczowe znaczenie ma zrozumienie i przyswojenie szeregu nowych pojęć, które nie występują w klasycznych badaniach ultradźwiękowych. Przyjmuje się, że wykwalifikowany operator UT-2 powinien dodatkowo odbyć ok. 80 godzinne przeszkolenie specjalistyczne w zakresie podstaw i praktycznego stosowania techniki PA.

W niniejszej pracy podjęto próbę przedstawienia tematyki ultradźwiękowych badań złączy spawanych techniką *phased array* zgodnie z wymaganiami aktualnych norm [6,7]. Z uwagi na rozległość tematu ograniczono się do podstawowych aspektów metodyki badań oraz typowych zastosowań do badań złączy doczołowych ze stali niskostopowych. Omawiane zagadnienia zilustrowano przykładami z badań prowadzonych w ramach wdrażania techniki UT-PA w Mostostal Warszawa S.A oraz realizacji przez Mostostal projektu badawczego pt. „NDTROB – Automatyczny system kontroli jakości spoin obwodowych rurociągów technologicznych i przesyłowych metodami UT” dofinansowanego z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu „INNOTECH” w ścieżce programowej IN-TECH.

2. Podstawowe zasady badań spoin techniką UT-PA

W najbardziej ogólnym ujęciu badania złączy spawanych techniką *phased array* są bardzo podobne do badań prowadzonych konwencjonalną techniką echa. W obu przypadkach stosuje się wiązki fal poprzecznych wprowadzane do materiału rodzimego pod różnymi kątami i skierowane w stronę objętości spoiny. Zakresy stosowanych częstotliwości, efektywne rozmiary przetworników oraz charakterystyki wiązek ultradźwiękowych nie różnią się od stosowanych w badaniach konwencjonalnych.

W obu przypadkach podstawową zasadą badania jest wykrycie echa ultradźwiękowego pochodzącego od nieciągłości materiału. Ocena akceptowalności wskazania także bazuje na pomiarze maksymalnej amplitudy echa (względem ustalonego reflektora odniesienia) oraz długości jego obwiedni wzdłuż spoiny.

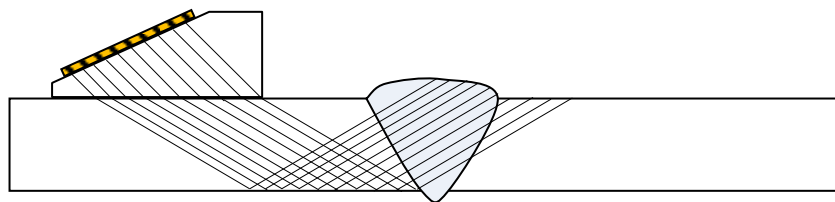
Podstawowa różnica między badaniami spoin techniką PA a badaniami techniką konwencjonalną polega na sposobie sterowania wiązką ultradźwiękową penetrującą obszar spoiny. W badaniach konwencjonalnych wiązka ultradźwiękowa o ustalonym kącie przemieszczana jest w przekroju złącza spawanego przez fizyczny przesuw głowicy w kierunku prostopadłym do osi spoiny. Przesuw w granicach jednego skoku zapewnia przeszukanie całej objętości spoiny.

W badaniach techniką PA w celu przeszukania całego przekroju spoiny stosuje się jeden z dwóch rodzajów skanów elektronicznych nie wymagających fizycznego przesuwu głowicy w kierunku prostopadłym do osi spoiny. Skany te określane są odpowiednio jako E-skan i S-skan.

W skanie typu E, pokazanym schematycznie na rys. 1, kolejne zespoły przetworników głowicy liniowej pobudzane są w kolejnych cyklach częstotliwości powtarzania tak, że punkt wejścia wiązki ultradźwiękowej przesuwana się wzdłuż głowicy co pozwala jej penetrować różne obszary złącza spawanego. Jest to rozwiązanie analogiczne

jak w badaniach konwencjonalnych, z tym że przemieszczanie wiązki odbywa się elektronicznie bez fizycznego przemieszczania głowicy.

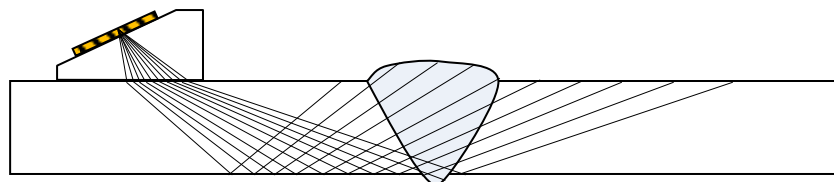
Planując badanie należy dobrać długość szeregu fazowego głowicy, kąt wprowadzania fali oraz odległość głowicy od środka spoiny tak, aby kolejne wiązki E-skanu pokryły całą objętość spoiny wraz z przylegającymi strefami wpływu ciepła. Należy pamiętać, że każda z wytwarzanych wiązek (zilustrowana na rysunku pojedynczą linią) posiada swój własny profil scharakteryzowany długością pola bliskiego oraz rozbieżnością. Oznacza to, że każda wiązka „widzi” obszar materiału odpowiadający całej swojej szerokości niezależnie od tego, że system zobrazowania wyników badania przypisuje jej jedynie wąski sektor materiału położony wzdłuż osi wiązki. Z tego powodu na obrazowaniach typu S lub E nawet niewielkie reflektory punktowe uwidocznione są w postaci szerokich półksiężyców. Szerokość takich wskazań odzwierciedla bardziej szerokość wiązki skanującej niż faktyczną wielkość defektów.



Rys. 1. Zasada badania *phased array* przy wykorzystaniu elektronicznego skanu liniowego, tzw. E-skanu

Skanowanie liniowe 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, wieloprzetwornikowych głowic PA zapewniających odpowiednio duży zakres przesuwu wiązki. Duży rozmiar przyłgi głowicy wiąże się z koniecznością przygotowania szerokich obszarów przesuwu głowic oraz utrudnionym utrzymaniem sprężenia akustycznego.

Drugim, bardziej uniwersalnym i częściej stosowanym rodzajem skanowania jest tzw. skan sektorowy nazywany też skanem typu S. W tym przypadku system *phased array* generuje szereg wiązek ultradźwiękowych różniących się kątem wejścia do badanego materiału (patrz rys. 2). Planując badanie należy dobrać zakres kątowy skanowania oraz odległość głowicy od osi spoiny (tzw. *index offset*), tak aby wiązki S-skanu pokryły całą objętość spoiny wraz z przylegającymi strefami wpływu ciepła.



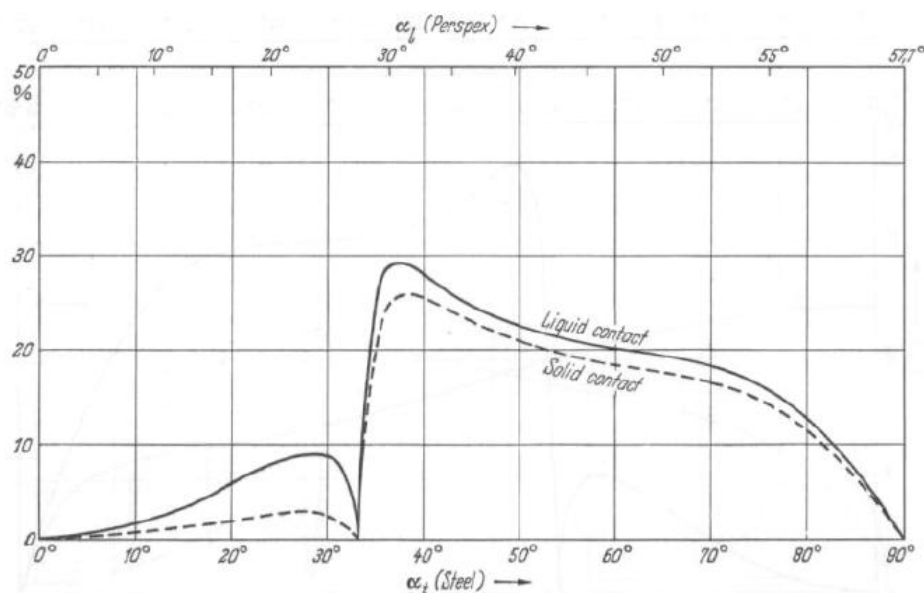
Rys. 2. Zasada badania *phased array* przy wykorzystaniu elektronicznego skanu sektorowego, tzw. S-skanu.

Należy pamiętać, aby podobnie jak w badaniach konwencjonalnych, kąty padania wiązek skanu sektorowego na krawędź ukosowania spoiny nie odbiegały od kąta prostego o więcej niż $\pm 10^\circ$. 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 liniowych z różnymi odległościami głowic od środka spoiny.

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

Zakres kątowy sterowania wiązką ultradźwiękową w systemach *phased array* jest zdeterminowany przez szereg czynników związanych z konstrukcją głowicy (częstotliwość, szerokość pojedynczego elementu piezoelektrycznego, apertura wirtualna) jednak w głowicach fal poprzecznych wykorzystujących kliny załamujące jest on ograniczony głównie przez współczynnik transmisji fal na granicy klin - materiał. Na rys. 3 pokazano obliczony teoretycznie współczynnik podwójnej transmisji fal ultradźwiękowych na granicy pleksiglas – stal [9].

Kąty załamania poniżej pierwszego kąta krytycznego, tj. poniżej 33° , nie mogą być stosowane z uwagi na równoczesne wytwarzanie w badanym materiale fali poprzecznej i podłużnej. Również kąty w pobliżu kąta krytycznego (tj. poniżej ok. 40°) nie powinny być stosowane z uwagi na szybki spadek amplitudy fali prowadzący do silnego osłabienia i zniekształcenia wiązki ultradźwiękowej. Podobny problem występuje dla kątów załamania powyżej ok. 75° , co w praktyce ogranicza maksymalny zakres kątowy skanu sektorowego do przedziału $40^\circ - 75^\circ$.

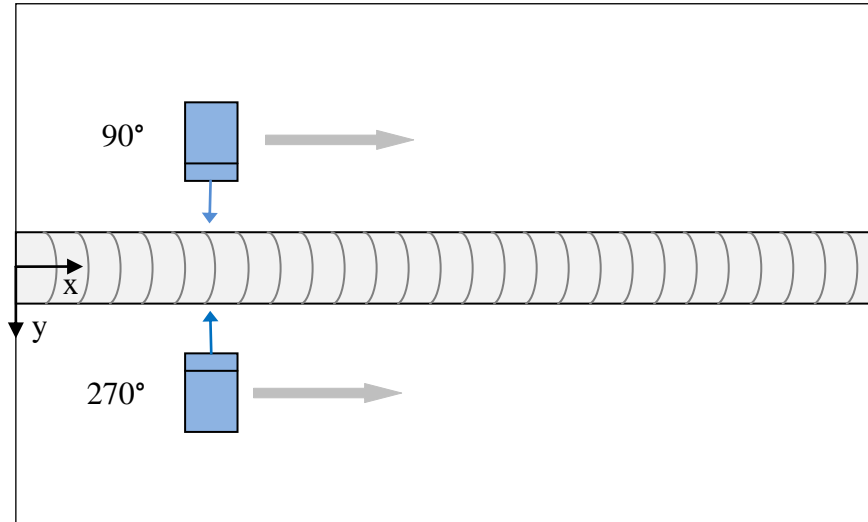


Rys.3. Współczynnik podwójnej transmisji (pleksi → stal → pleksi) fali ultradźwiękowej na granicy pleksiglas – stal [9].

Zautomatyzowane skanowanie spoiny systemem *phased array* polega na kontrolowanym przemieszczaniu wzdłuż spoiny pary głowic umieszczonych symetrycznie po jej obu stronach (patrz rys. 4). 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 bardziej zaawansowanych systemów PA zapisywane są 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. W przypadku prostszych systemów PA zapisywane są jedynie wynikowe zobrazenia typu E lub S generowane przez system w czasie skanowania. Brak zapisu indywidualnych A-skanów nie pozwala tutaj na jakiegokolwiek modyfikacje ustawień bramek pomiarowych czy czułości badania.



Rys.43. Schemat badania spoiny zautomatyzowanym systemem *phased array*.

Manualne badanie spoin techniką *phased array* dopuszczone jest jedynie w normie amerykańskiej [7] i polega na ręcznym przemieszczaniu głowicy *phased array* generującej na ekranie aparatu dynamiczny skan sektorowy. Sposób prowadzenia głowicy jest w tym przypadku podobny jak w tradycyjnych badaniach ultradźwiękowych (tj. ruch meandrowy lub zygzakowaty). Operator musi na bieżąco obserwować skan sektorowy i odpowiednio interpretować uzyskiwane wskazania. W tym przypadku wskazania nie mogą być zobrażowane na tle przekroju spoiny, ponieważ system nie ma informacji o bieżącym położeniu głowicy na obiekcie. Operator może jedynie lokalizować poszczególne wskazania poprzez odczyt ich głębokości oraz odmierzanie linijką ich rzutu poziomego względem czoła głowicy.

Generalnie badania manualne spoin techniką *phased array* nie wykorzystują pełnego potencjału tej metody. Dokumentacja z badań jest ograniczona do zapisu indywidualnych S-skanów w miejscach wybranych przez operatora i nie pozwala na udokumentowanie wyników badania całej długości spoiny. Również interpretacja wskazań (np. odróżnianie ech wad od ech kształtu) jest dużo trudniejsza i wymaga od operatora zarówno dużego praktycznego doświadczenia w badaniach spoin jak i wyobraźni przestrzennej.

3. Przygotowanie i kalibracja parametrów badania

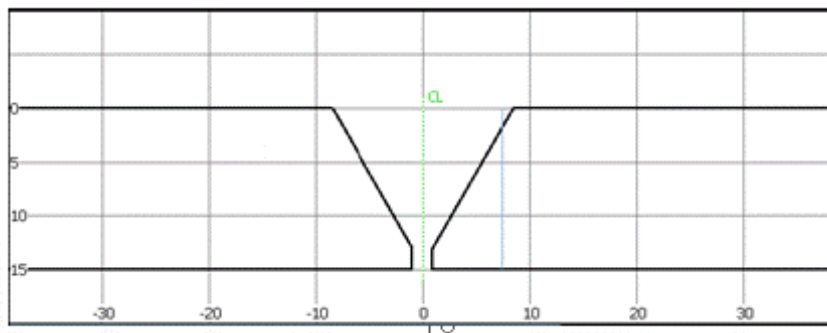
Przygotowanie systemu *phased array* do badania spoin jest dużo trudniejsze i bardziej czasochłonne niż w przypadku konwencjonalnych badań ultradźwiękowych. Wynika to z potrzeby wprowadzenia lub skalibrowania szeregu parametrów nie występujących w konwencjonalnych badaniach spoin. Dotyczy to np. parametrów 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 sektorowego lub liniowego (apertura wirtualna, zakres kątowy lub

liniowy, skok kątowy lub liniowy, odległość ogniskowa) oraz przeprowadzenie szeregu kalibracji systemu badawczego (czułość badania, ACG, TCG, 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 PA do badań. Poszczególne rozwiązania aparaturowe i programowe mogą różnić się między sobą, jednak ogólny przebieg postępowania jest podobny i składa się z następujących etapów:

- *Wprowadzenie parametrów związanych z obiektem badania (spoiną).*

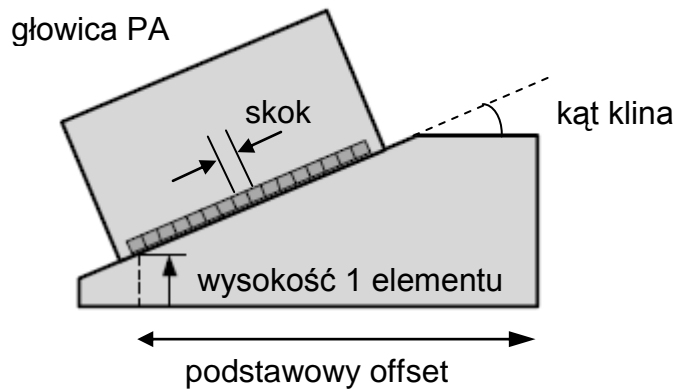
Na tym etapie określa się rodzaj i grubość materiału rodzimego złącza spawanego, podstawową geometrię obiektu badania (blacha, rura, spoina obwodowa lub wzdłużna), szczegółowe wymiary rowka spawalniczego (kształt, kąty ukosowania, wysokość i szerokość progę). Parametry te niezbędne są do wygenerowania obrazu przekroju spoiny, który w następnych etapach posłuży do przygotowania *grup* praw opóźnień oraz zaplanowania poszczególnych skanów.



Rys.5. Typowy przekrój spoiny wygenerowany przez system PA w wyniku wprowadzenia parametrów geometrycznych złącza spawanego.

- *Określenie parametrów głowic i ich konfiguracji w systemie PA*

Na tym etapie wprowadza się parametry głowic i klinów stosowanych w badaniu *phased array*, a także określa ich usytuowanie geometryczne. Dla każdej ze stosowanych głowic należy zdefiniować osobną *grupę*, która stanowi zespół parametrów definiujących jej funkcjonowanie w systemie PA. W przypadku gdy stosujemy standardowe głowice producenta systemu wystarczy wybrać odpowiedni typ głowicy oraz klina z odpowiednich list wyświetlanych w okienkach kreatora. W przypadku stosowania głowic lub klinów innego producenta operator musi samodzielnie wprowadzić wszystkie parametry danej głowicy lub klina niezbędne do konfiguracji systemu. W przypadku głowicy *phased array* są to: typ, częstotliwość, liczba elementów piezoelektrycznych, skok (odległość między środkami sąsiadujących elementów) oraz punkt referencyjny czyli odległość środka pierwszego elementu piezoelektrycznego od czoła głowicy. W przypadku klina wprowadzić należy: kąt klina, prędkość fali podłużnej w materiale klina, wysokość pierwszego elementu głowicy nad przylgą klina oraz tzw. *podstawowy offset*, czyli odległość między pozycją pierwszego elementu głowicy a czołem klina (patrz rys. 6).



Rys.6. Definicje podstawowych parametrów geometrycznych głowicy i klina.

Dalej należy zdefiniować położenie głowicy względem spoiny (lewa lub prawa strona) oraz numer kanału systemu *phased array*, do którego przyłączony będzie pierwszy element głowicy. Dzięki tej informacji system sterujący szeregiem fazowym głowicy przyporządkuje konkretnym kanałom nadawczo-odbiorczym odpowiednie prawa opóźnień. W przypadku stosowania dwóch lub więcej głowic, zakresy kanałów przydzielone poszczególnym głowicom muszą być różne. Przykładowo w systemie z modulem PA typu 16:128 współpracującym z dwiema głowicami 16 elementowymi, pierwszej głowicy można przyporządkować kanały od 1 do 16, natomiast drugiej kanały od 65 do 80.

- *Wprowadzenie parametrów do obliczenia praw opóźnień*

Na tym etapie określa się parametry niezbędne do tego, aby oprogramowanie systemu PA mogło wygenerować prawa opóźnień dla wszystkich wiązek ultradźwiękowych danej grupy. Na tym etapie system posiada już wszelkie informacje dotyczące badanego materiału, głowicy oraz klina, natomiast wymaga określenia liczby i parametrów generowanych wiązek. W pierwszym kroku kreatora praw opóźnień należy określić rodzaj przygotowywanego skanu (skan sektorowy typu S lub liniowy typu E). Następnie należy zdefiniować aperturę wirtualną, czyli liczbę jednocześnie pobudzanych elementów głowicy. W przypadku skanu sektorowego apertura wirtualna jest jednakowa dla wszystkich generowanych wiązek (wszystkie elementy głowicy), natomiast w przypadku skanu liniowego będzie ona przemieszczana wzdłuż głowicy z określonym skokiem (tj. w kolejnych cyklach pobudzone będą różne zespoły przetworników przesunięte względem siebie o jeden lub kilka elementów). W przypadku skanu sektorowego, należy zdefiniować jego zakres kątowy (np. od 40° do 70°) oraz krok (np. co 1°). W przypadku skanu liniowego, należy zdefiniować jego zakres liniowy oraz krok. Jednym z parametrów, który należy zdefiniować jest odległość ogniskowania wiązek. W przypadku badań spoin parametr ten należy ustawić na wartość dużo większą od długości pola bliskiego. Prowadzi to do uzyskania standardowych wiązek ultradźwiękowych z naturalnym maksimum na granicy pola bliskiego.

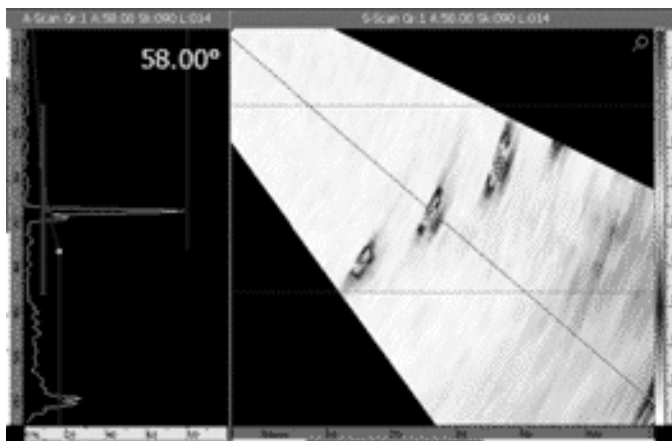
Po tym etapie przygotowania, system potrafi już wygenerować wszystkie wiązki ultradźwiękowe wybranego typu skanu oraz wyświetlić wynik skanowania w postaci zobrazowaniu typu S lub E. Zobrazowania te pozwalają lokalizować reflektory ultradźwiękowe w objętości materiału jednak nie dają jeszcze żadnej informacji na temat ich wielkości równoważnej.

- *Kalibracja czułości badania, ACG i TCG*

Aby zobrazowania typu S, E, B lub C mogły być podstawą do oceny wad, amplituda wskazań (kodowana za pomocą palety kolorów) musi być jednoznacznie powiązana z wielkością reflektora odniesienia, tak jak ma to miejsce w konwencjonalnych badaniach ultradźwiękowych.

W przypadku badań techniką PA powstają jednak dodatkowe problemy. Po pierwsze, w przypadku skanu sektorowego poszczególne wiązki ultradźwiękowe wchodzą do materiału pod różnymi kątami i w efekcie mają różne czułości wynikające z kątowej zależności współczynnika transmisji na granicy klin-materiał (patrz rys. 3). Oznacza to, że czułość każdej wiązki skanu sektorowego musi być skorygowana ze względu na kąt wprowadzenia. Funkcjonalność ta określana jest skrótem ACG (*Angle Corrected Gain*) i wymaga wykonania specjalnej procedury kalibracyjnej. Procedura ta łączy się zazwyczaj z ustawieniem podstawowej czułości badania na określonym reflektorze odniesienia (np. otworu cylindrycznym o średnicy 3 mm).

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 wskazań uzyskiwane na zobrazowaniu typu A. W przypadku badań PA takie podejście nie jest użyteczne, ponieważ oceny wskazań dokonuje się zwykle na zobrazowaniach typu S, E, B lub C, na których miarą amplitudy wskazania jest jego kolor. Chcąc, aby kolor wskazania jednoznacznie określał wielkość reflektora, niezależnie od jego odległości od głowicy, należy zastosować odległościową korekcję amplitudy TCG. Wykonanie obu kalibracji ACG i TCG powoduje, że kolor wskazania będzie uniwersalną miarą wielkości równoważnej reflektora niezależnie od jego położenia na zobrazowaniu (patrz rys. 7).



Rys.7. Skan sektorowy ze wskazaniami od jednakowych otworów poprzecznych usytuowanych w różnych miejscach próbki (po wykonaniu kalibracji ACG i TCG).

Zgodnie z normą EN ISO 13588 czułość badania dla każdej wiązki skanu typu S lub E powinna być ustawiona zgodnie z wymaganiami normy EN ISO 17640, tj. wg tych samych zasad jak w konwencjonalnych badaniach ultradźwiękowych. Oznacza to, że do nastawiania czułości badania można stosować takie same reflektory odniesienia. W przypadku skanu sektorowego, ze względu na płaską charakterystykę kątową odbicia, optymalny jest reflektor w postaci otworu poprzecznego. W przypadku spoin o małej grubości stosować można rowki prostokątne nacięte na powierzchni próbki odniesienia.

Po ustawieniu czułości i wykonaniu kalibracji ACG i TCG, zobrazowania uzyskiwane techniką PA pozwalają nie tylko lokalizować reflektory ultradźwiękowe, lecz także na podstawie koloru wskazania oceniać ich wielkość równoważną odniesioną do ustalonego reflektora odniesienia. Dzięki temu można dokonywać oceny wskazań według tych samych zasad jak w konwencjonalnych badaniach ultradźwiękowych. Przykładowo można zastosować kryteria akceptacji określone w normie EN ISO 11666.

W niektórych zastosowaniach konieczne mogą być dodatkowe kalibracje systemu PA takie jak kalibracja prędkości fali w materiale badanym czy kalibracja opóźnienia w klinie załamującym głowicy. Należy jednak pamiętać, że w przypadkach, gdy prędkość fali w badanym materiale lub parametry klina są dokładnie znane, kalibracje wykonane przez użytkownika mogą wprowadzić większe błędy, niż obliczenia wykonane przez system na podstawie predefiniowanych wartości parametrów. Należy więc wykonywać je tylko w uzasadnionych przypadkach.

Ponieważ opisany proces przygotowania systemu *phased array* do badań jest złożony i czasochłonny trudno byłoby wykonywać go przed każdym badaniem. W praktyce opracowany zespół parametrów badania zapisuje się w specjalnym pliku konfiguracyjnym w pamięci stałej aparatu ultradźwiękowego. Plik taki może być szybko wczytany w przypadku ponownych badań tego samego typu złączy lub może służyć jako punkt startowy do opracowania nowej konfiguracji badawczej do badań innego typu złączy.

4. Metodyka badań i ocena wskazań

Badania spoin techniką *phased array* mogą być prowadzone zarówno klasyczną techniką manualną jak też technikami zautomatyzowanymi. Norma europejska [6] przewiduje tylko badania zautomatyzowane. Z punktu widzenia jakości badania istotny jest nie tyle zmechanizowany sposób przesuwu głowic, co możliwość ciągłej, automatycznej rejestracji wyników badania w korelacji z położeniem głowic na obiekcie. W wielu przypadkach optymalnym rozwiązaniem jest technika półautomatyczna, w której przesuw skanera z głowicami realizowany jest ręcznie, natomiast proces rejestracji danych odbywa się automatycznie i jest synchronizowany impulsami z enkodera.

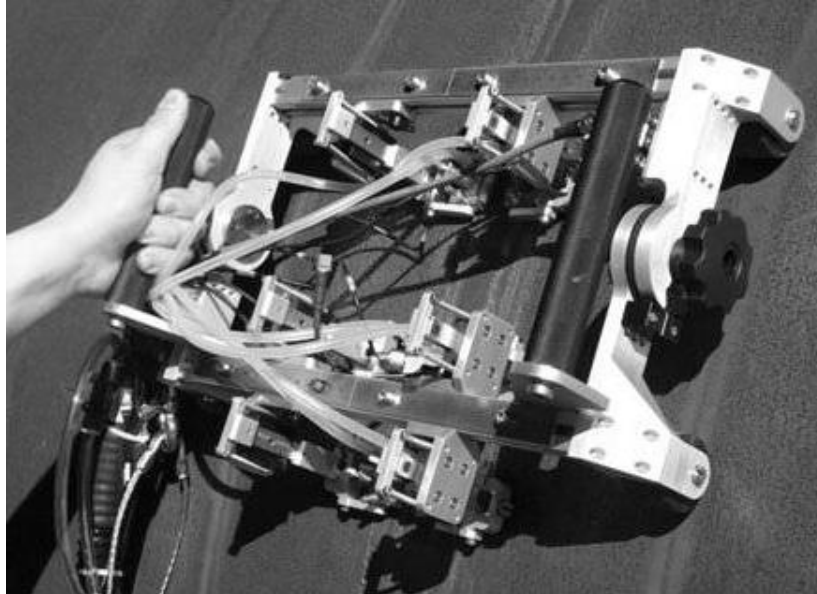
W przypadku złączy spawanych o mniejszej grubości badanie prowadzone jest zwykle dwiema głowicami PA umieszczonymi symetrycznie po obu stronach spoiny (patrz rys. 4). W przypadku złączy o większych grubościach konieczne jest zastosowanie kilku par głowic penetrujących różne obszary spoiny. Alternatywnym 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.

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.

Przed rozpoczęciem skanowania należy wczytać plik konfiguracyjny z parametrami badania opracowanymi dla danego typu spoin. Podobnie jak w przypadku innych badań ultradźwiękowych należy skontrolować czułość wszystkich podłączonych głowic. Typową przyczyną spadku czułości w przypadku badań techniką *phased array* jest wyschnięcie warstwy sprzęgającej między głowicą a klinem (głowice PA z reguły stosowane są

z rozdzielnymi klinami). Kontrola czułości badania polega na uzyskaniu echa od odpowiedniego reflektora odniesienia i sprawdzeniu, czy jego wysokość jest na wymaganym poziomie (np. 80% FSH).

Przykład uniwersalnego ręcznego skanera do badań spoin półautomatyczną techniką PA i/lub TOFD pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Ręczny skaner HSMT-Flex (firmy Olympus) do badań złączy spawanych techniką PA i TOFD.

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 dostosowanie go do badań złączy obwodowych o średnicach powyżej 114 mm lub złączy płaskich.

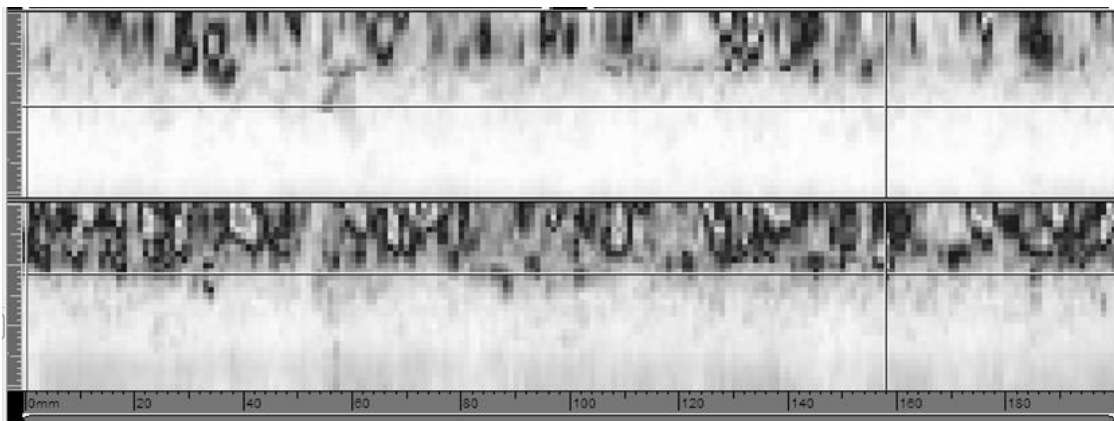
Sam proces badania przebiega następująco. Po wczytaniu parametrów konfiguracyjnych systemu i sprawdzeniu czułości wszystkich głowic, operator włącza dopływ wody pod głowice i obserwuje ustalanie się obrazowań typu S lub E z poszczególnych głowic. Po ustabilizowaniu się sprzężenia akustycznego rozpocząć można przesuw skanera wzdłuż spoiny. W trakcie przesuwu skanera operator powinien skoncentrować swoją uwagę na utrzymywaniu symetrycznego położenia głowic względem osi spoiny oraz zachowaniu równomiernego tempa przesuwu skanera. Nadmierny wzrost prędkości przesuwu spowodować może przekroczenie maksymalnej szybkości akwizycji danych i przerwę w ich zapisie (białe paski na obrazowaniu typu C). Należy także obserwować obrazowania wyświetlane na ekranie aparatu w celu kontroli sprzężenia akustycznego oraz kompletności zapisu. Większość rejestrowanych wskazań pochodzi od geometrii lica lub grani, jednak ich obecność potwierdza prawidłowy przebieg procesu skanowania.

Po przeskanowaniu zaplanowanej długości spoiny należy zatrzymać skaner i zapisać surowe wyniki skanowania w osobnym pliku w pamięci stałej 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 też możliwość przeniesienia zapisanych skanów do osobnego komputera z odpowiednim oprogramowaniem i równoległego prowadzenia oceny wyników badań oraz sporządzania raportów przez innego specjalistę. 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. Niezależnie od sposobu zapisu i zobrazowania danych 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 i zwykle najtrudniejszym elementem oceny wyników badania jest odróżnienie wskazań wad od licznych ech kształtu pochodzących od nierówności lica lub grani.

W pierwszym etapie operator analizuje tzw. *nieskorygowane C-scany* ze wszystkich stosowanych w badaniu głowic (patrz np. rys. 9).

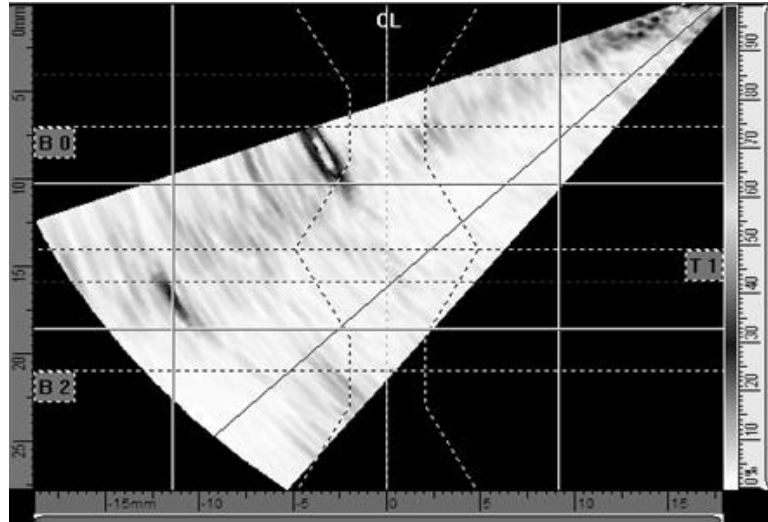


Rys. 9. Przykład zobrazowań typu nieskorygowany C-skan z dwóch głowic PA umieszczonych po przeciwnych stronach spoiny.

Należy tutaj zauważyć że zobrazowanie typu nieskorygowany C-skan różni się w sposób istotny od klasycznego C-skanu rozumianego jako widok badanego elementu z góry. Na zobrazowaniu tym 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 żadnych istotnych wskazań nie wymagające dalszej uwagi. Oprócz tego występują zwykle liczne odcinki spoiny wykazujące silne echa ultradźwiękowe. Na tym etapie wiadomo jedynie, że na określonym odcinku spoiny zarejestrowano jakieś echa ultradźwiękowe, nie wiadomo jednak jakie jest ich pochodzenie.

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 skanie typu S jest fakt, że reflektory uwidocznione są tutaj na tle geometrycznego przekroju spoiny. Daje to podstawę do wiarygodnej oceny prawdopodobnego źródła ich pochodzenia.

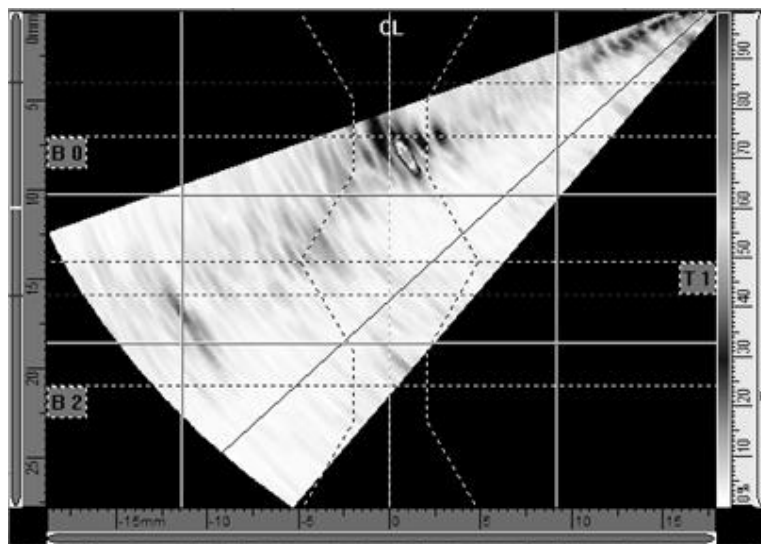
Przykładowo na rys. 10 przedstawiono skan sektorowy, który pokazuje silne echo pochodzące z obszaru grani spoiny i leżące ok. 3 mm za jej środkiem.



Rys. 10. Przykład zobrazowania typu S w miejscu występowania echa kształtu od wycieku z grani dla spoiny typu V o grubości 7,2 mm.

Położenie tego echa wskazuje, 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. Stosownym potwierdzeniem będzie brak wskazania przed środkiem spoiny.

Na rys. 11 pokazano skan sektorowy tej samej spoiny uzyskany w innym miejscu. W tym przypadku położenie reflektora wskazuje, że jest to echo pochodzące od rzeczywistej wady typu brak przetopu.

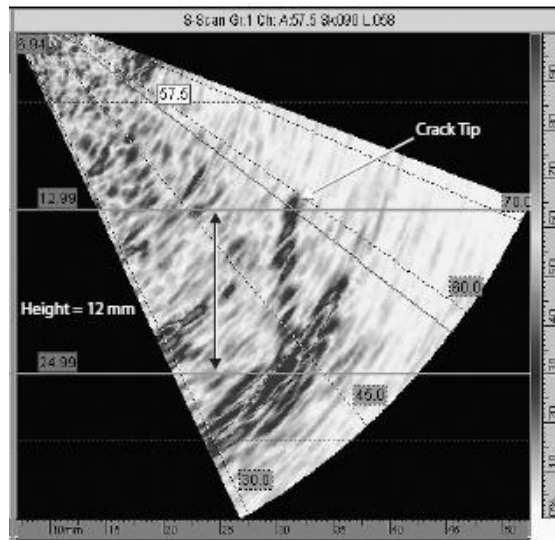


Rys. 11. Przykład zobrazowania typu S w miejscu występowania echa od braku przetopu dla spoiny typu V o grubości 7,2 mm.

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 obrazowaniach PA jest ich wzajemny układ oraz kształt.

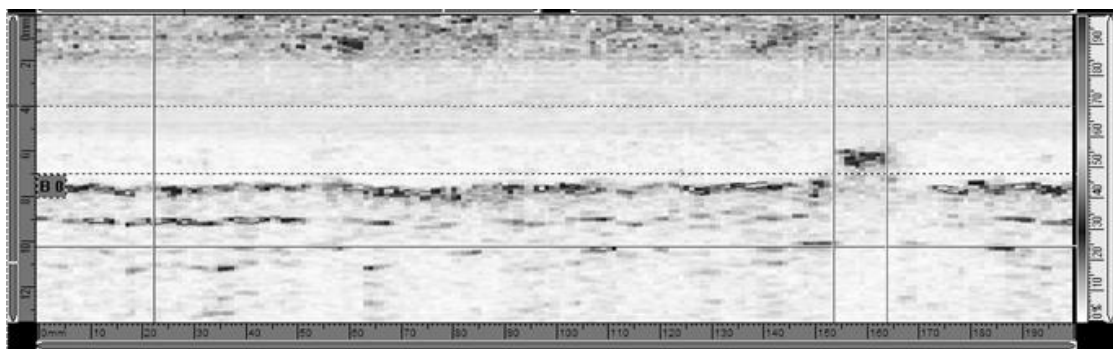
Na skanie sektorowym pokazanym na rys. 12 widoczne jest jedno duże echo od reflektora znajdującego się na głębokości zbliżonej do grubości badanego materiału (ok. 25 mm) oraz szereg mniejszych odbić wyraźnie układających się wzdłuż linii prostopadłej do powierzchni elementu.



Rys. 12. Skan sektorowy ze wskazaniem pęknięcia wychodzącego od powierzchni przeciwległej [10].

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

Przy ocenie wyników badań *phased array*, obrazowania 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 rys. 13 pokazano obrazowanie typu B (przekrój podłużny spoiny) uzyskane wiązką o kącie załamania $\beta = 68^\circ$. Jest to przekrój podłużny tej samej spoiny, która była poprzednio pokazana na obrazowaniach typu C i S (rys. 9, 10, 11).



Rys. 13. Zobrazowanie typu B obrazujące położenie wady typu brak przetopu (między pionowymi kursorami) na tle ech kształtu pochodzących od wycieku z grani.

Na przekroju podłużnym uzyskanym wiązką o kącie $\beta = 68^\circ$ penetrującą obszar grani widać wyraźnie umiejscowienie wady typu brak przetopu na tle silnych ech pochodzących od wycieku z grani. Zobrazowanie typu B uzyskane tym szczególnym kątem wiązki pozwoliło wyraźnie uwidocznić różnicę głębokości odbić od wycieku z grani oraz odbicia od braku przetopu. Przewaga metody PA w stosunku do konwencjonalnych badań automatycznych polega tutaj na tym, że można analizować zobrazowania typu B uzyskane różnymi kątami wiązki i znaleźć takie, które najlepiej uwidaczniają określone wady. W konwencjonalnych badaniach automatycznych także możemy generować zobrazowania typu B jednak skazani jesteśmy na 2, 3 ustalone kąty głowic, które nie zawsze optymalnie pokazują przebieg ewentualnych wad czy ech kształtu.

Pokazane przykłady ilustrują możliwości jakie dają komputerowe zobrazowania danych uzyskiwane techniką *phased array*. W celu skutecznego posługiwania się tymi technikami konieczne jest opanowanie stosunkowo złożonego oprogramowania do analizy wyników badań *phased array* jak np. programy *OmniPC* czy *TomoView* firmy Olympus. Niezależnie od tego najważniejszą podstawą do prawidłowej interpretacji wyników badań techniką PA pozostaje dokładne zrozumienie podstaw fizycznych badań ultradźwiękowych oraz znajomość przedmiotu badania i występujących w nim wad. W tym aspekcie wiedza i doświadczenie wyniesione z konwencjonalnych badań ultradźwiękowych są niezastąpione i stanowią konieczną bazę dla przyszłych operatorów techniki PA. Dotyczy to zwłaszcza badań złączy spawanych, w których interpretacja wskazań jest szczególnie trudna ze względu na dużą liczbę oraz przypadkowy, nieregularny charakter wskazań geometrycznych.

5. Podsumowanie

W artykule omówiono podstawowe aspekty badań złączy spawanych ultradźwiękową techniką *phased array*. Dzięki wprowadzeniu normy PN-EN ISO 13588 badania złączy spawanych techniką PA znalazły odpowiednią podstawę formalną i techniczną do szerszego wykorzystania w dużych projektach przemysłowych.

Podstawowe zalety zastosowania techniki PA do rutynowych badań złączy spawanych to:

1. Możliwość pełnej dokumentacji wyników badania (zapis surowych skanów z całej długości spoiny w plikach komputerowych).
2. Kilukrotne zwiększenie szybkości badań i wydajności pracy operatorów UT.
3. Lepsze możliwości odróżniania wskazań wad od ech kształtu oraz ustalania rodzaju wykrywanych nieciągłości.
4. Dokładniejsza ocena położenia i rozmiarów wad przy wykorzystaniu pomiarów kursorowych na zobrazowaniach typu S, E, B, C.
5. Możliwość zautomatyzowanego przygotowywania raportów z badań z załączonymi obrazami wskazań wad na tle przekrojów spoin.

Aby należycie 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 u jej dostawcy. Nie jest to jedynie wdrożenie nowego modelu defektoskopu do badań ultradźwiękowych lecz wdrożenie nowej specjalistycznej techniki badań wymagającej zrozumienia zasad jej działania, przyswojenia szeregu nowych pojęć oraz nauczenia się obsługi złożonego systemu badawczego wraz z oprogramowaniem.

Jak wspomniano, w przypadku operatorów UT-2 z doświadczeniem w konwencjonalnych badaniach spoin, konieczny jest ok. 80 godzinny kurs specjalistyczny poświęcony podstawom techniki PA, obsłudze konkretnego systemu badawczego oraz praktycznym badaniom reprezentatywnych próbek spoin wraz z oceną. Nowi pracownicy powinni najpierw odbyć standardowy cykl szkolenia w badaniach ultradźwiękowych (kursy UT-1 i UT-2), uzyskać pewne doświadczenie w konwencjonalnych badaniach ultradźwiękowych i dopiero na tej podstawie rozpoczynać szkolenie w zakresie badań spoin techniką PA. Z uwagi na szerokie wykorzystanie oprogramowania komputerowego dodatkowym wymaganiem 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 oraz komplementarnym uzupełnieniem techniki TOFD. Może być ona efektywnie wykorzystana zarówno w warunkach budowy nowych konstrukcji, jak też w trakcie remontów i eksploatacji. Należy oczekiwać szybkiego wzrostu jej stosowania w najbliższych latach.

Literatura

1. W. Manaj, G. Wojas, M. Szwed, A. Zagórski, M. Spychalski, K.J. Kurzydłowski, Badania ultradźwiękowe z zastosowaniem głowic wieloprzetwornikowych – system Phased Array, Materiały XI Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane 13-16 marca 2007
2. M. Lipnicki, K. Mroczek, B. Ostrowski, M.J. Wójcik, Zaawansowane badania diagnostyczne wirników turbin energetycznych techniką Phased Array na przykładzie badania kształtowych elementów mocowania łopatek., Materiały XVII Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane 8-11 marca 2011
3. Z. Ignaszak, P. Bobrowski, J. Ciesiółka, Akwizycja i wykorzystanie danych z badań ut-phased array do identyfikacji 3-d nieciągłości i struktury w odlewach, Materiały XVIII Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane 13-16 marca 2012
4. K. Dragan., Zastosowania głowic Phased Array w diagnostyce konstrukcji lotniczych., Materiały XVII Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane 08-11 marca 2011.
5. S. Mackiewicz, T. Katz, Ultradźwiękowe badania laminatów węglowych techniką phased array, Materiały XVIII Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane 13-16 marca 2012
6. PN-EN ISO 13588 Badania nieniszczące spoin – Badanie ultradźwiękowe - Stosowanie technologii zautomatyzowanej głowicy mozaikowej.
7. ASTM E2700-14 Standard Practice for Contact Ultrasonic Testing of Welds Using Phased Arrays.
8. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications., R/D Tech Guideline., 2004, 2005, 2007 by Olympus NDT
9. Krautkrämer J., Krautkrämer H., Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Springer-Verlag, Berlin / Heidelberg / New York, 1966
10. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications., Advanced Practical NDT Series, Olympus NDT, 2007.

