

Rafał Kaczmarek*, Karol Kaczmarek

Łukasiewicz - Górnośląski Instytut Technologiczny – Centrum Spawalnictwa

Wykrywalność gniazd pęcherzy w złączach spawanych przy użyciu konwencjonalnych i zaawansowanych technik ultradźwiękowych PE, TOFD, PAUT, TFM i PCI – część druga

Detection of gas pore clusters in welded joints using conventional and advanced ultrasonic techniques PE, TOFD, PAUT, TFM, and PCI – part two

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących wykrywalności gniazd pęcherzy w złączach spawanych blach ze stali niestopowej, przy zastosowaniu konwencjonalnych i zaawansowanych technik badań ultradźwiękowych: ręcznych puls-echo (PE), Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT), Time of Flight Diffraction (TOFD), Total Focusing Method (TFM) oraz Phased Coherence Imaging (PCI).

W pierwszej części pracy omówiono zagadnienie wykrywalności gniazd pęcherzy przy zastosowaniu konwencjonalnej techniki ultradźwiękowej PE oraz techniki PAUT, wykazując, że badania wykorzystujące kryteria akceptacji bazujące na długości i amplitudzie wskazań prowadzone wg aktualnych norm ISO wykazują niską skuteczność w zakresie wykrywania tego rodzaju nieciągłości [1].

W drugiej części pracy, opisanej w niniejszym artykule, skoncentrowano się na analizie ultradźwiękowych technik obrazujących, z zastosowaniem wymiarowych kryteriów akceptacji wskazań. Zbadano możliwości wykrycia dużych gniazd pęcherzy przy użyciu technik PAUT, TOFD, TFM i PCI. Wyniki badań wskazują na możliwość skutecznego wykrywania dużych gniazd pęcherzy przy zastosowaniu ultradźwiękowych technik obrazujących, pod warunkiem zastosowania wymiarowych kryteriów akceptacji oraz prowadzenia oceny sygnałów niskoamplitudowych, o amplitudach niższych od tradycyjnie przyjętych poziomów oceny.

Słowa kluczowe: gniazda pęcherzy, badania ultradźwiękowe, PAUT, TOFD, TFM, PCI, kontrola jakości, złącza spawane.

1. Wprowadzenie

Wykrywanie gniazd pęcherzy w złączach spawanych stanowi istotne wyzwanie dla badań metodą ultradźwiękową. Jednak wprowadzane do praktyki przemysłowej kolejne techniki ultradźwiękowe oferują nowe, dotychczas niezbrane możliwości, które czasem mogą być sprzeczne z utartymi poglądami na temat skuteczności klasycznych metod i technik badawczych [2–9]. Stąd podjęcie przez autorów tematyki niniejszego artykułu, traktującego o wykrywalności dużych

ABSTRACT

The paper presents the results of research on the detectability of gas pore clusters in welded joints of mild steel plates using both conventional and advanced ultrasonic testing techniques: manual pulse-echo (PE), Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT), Time of Flight Diffraction (TOFD), Total Focusing Method (TFM), and Phased Coherence Imaging (PCI). The first part of the study addressed the detectability of gas pore clusters using the conventional PE ultrasonic technique and the PAUT method, demonstrating that testing based on length and amplitude criteria as per current ISO standards shows low effectiveness in detecting this type of discontinuity [1].

The second part of the study, described in this article, focuses on the analysis of ultrasonic imaging techniques, applying dimensional acceptance criteria. The capabilities of detecting large gas pore clusters using PAUT, TOFD, TFM, and PCI techniques were investigated. The research results indicate that large gas pore clusters can be effectively detected using ultrasonic imaging techniques, provided that dimensional acceptance criteria are applied and low-amplitude signals, with amplitudes lower than the traditionally accepted evaluation levels, are considered.

Keywords: gas pore clusters, ultrasonic testing, PAUT, TOFD, TFM, PCI, quality control, welded joints.

gniazd pęcherzy na tle pełnego spektrum najważniejszych technik badań ultradźwiękowych, w tym najnowocześniejszych, takich jak TFM oraz PCI.

W pierwszej części artykułu omówiono ograniczenia w zakresie wykrywalności gniazd pęcherzy przy pomocy technik ultradźwiękowych stosowanych wraz z tradycyjną, amplitudową oceną wskazań, takich jak technika puls-echo (PE) oraz technika Phased Array (PAUT). Wykazano, że badania prowadzone w oparciu o normatywne kryteria oceny amplitudowej wykazują niewielką skuteczność wykrywania gniazd pęcherzy. Powodem jest niska amplituda sygnałów odbitych od tego typu nieciągłości, wynikająca ze zdolności

*Autor korespondencyjny.

E-mail: *rafal.kaczmarek133@gmail.com

do silnego rozpraszania wiązki ultradźwiękowej przez ten rodzaj nieciągłości [1].

W drugiej części artykułu skoncentrowano się na analizie możliwości ultradźwiękowych technik obrazujących: Time-of-Flight Diffraction (TOFD), Phased Array (PAUT), Total Focusing Method (TFM) oraz Phase Coherence Imaging (PCI), stosowanych w połączeniu z wymiarowymi kryteriami akceptacji. Techniki te charakteryzują się unikalnymi możliwościami w zakresie obrazowania, charakteryzowania i wymiarowania nieciągłości. Zagadnienie oceny wiarygodności wykrywania gniazd pęcherzy za pomocą tych technik nie było dotychczas szerzej poruszane w literaturze.

Technika TOFD wykorzystuje zjawisko dyfrakcji fal ultradźwiękowych na krawędziach (wierzchołkach nieciągłości), co pozwala na precyzyjne wymiarowanie wysokości i głębokości zalegania odosobnionych nieciągłości płaskich [2]. Ponadto TOFD umożliwia skuteczne wykrywanie nawet bardzo małych nieciągłości, niezależnie od ich orientacji względem wiązki ultradźwiękowej. W przypadku nieciągłości przestrzennych, takich jak gniazda pęcherzy, ich charakteryzowanie jest trudniejsze. Dzieje się tak, ponieważ sygnały dyfrakcyjne w tych przypadkach nie są tak jednoznacznie zdefiniowane jak przy odosobnionych wskazaniach od nieciągłości płaskich [2, 10, 11]. Technika TOFD jest szeroko stosowana w badaniach złączy spawanych, oferując wysoką wykrywalność większości rodzajów nieciągłości [12, 13]. Jednakże skuteczność charakteryzowania przy jej pomocy nieciągłości występujących grupowo, włączając gniazda pęcherzy, jest ograniczona.

Technika PAUT opiera się na wykorzystaniu głowic wieloprzetwornikowych, które poprzez sterowanie fázowe pozwalają na odchylenie i ogniskowanie wiązki ultradźwiękowej. Umożliwia to przeprowadzenie skanowania z uzyskaniem obrazowań graficznych (B-skan, C-skan, S-skan), które ułatwiają charakteryzowanie, a także pozwalają na precyzyjne wymiarowanie wykrytych wskazań [14, 15]. Technika ta znakomicie nadaje się do wykonywania badań, w których interpretacja i ocena wskazań odbywa się głównie w oparciu o ich charakter, w szczególności położenie, wymiary i wnioskowany rodzaj nieciągłości. Nie zmienia to faktu, że PAUT znajduje również zastosowanie do badań z wykorzystaniem amplitudowej techniki oceny wskazań [3, 4, 11].

Technika PAUT wykazała między innymi wysoką skuteczność w zakresie wykrywania w złączach doczołowych nieciągłości niekorzystnie zorientowanych w stosunku do padającej wiązki [16] oraz w wykrywaniu mikronieciągłości w obiektach wytwarzanych metodami przyrostowymi [7]. Zastosowanie adaptacyjnych głowic PAUT z klinami dostosowującymi się do kształtu powierzchni pozwala na skuteczne badanie złożonych geometrii złączy spawanych [8], integracja techniki PAUT z techniką TOFD zwiększa natomiast wiarygodność i precyzję prowadzonych badań [11], a zastosowanie zaawansowanych algorytmów przetwarzania sygnałów pozwala na poprawę dokładności

wykrywania i charakteryzowania wskazań [17].

Technika TFM jest zaawansowaną techniką ultradźwiękową, która w połączeniu z techniką akwizycji danych FMC wykorzystuje wszystkie możliwe kombinacje elementów nadawczych i odbiorczych głowic wieloprzetwornikowych do generowania obrazów o wysokiej rozdzielczości [5, 18]. Badania nad optymalizacją parametrów TFM wskazują na możliwość dalszego zwiększenia skuteczności wykrywania nieciągłości [9, 19, 20].

Technika PCI jest pod wieloma względami zbliżona do TFM, jednak do tworzenia obrazowań zamiast amplitudy wykorzystuje analizę koherencji fazowej sygnałów ultradźwiękowych. Pozwala to na skuteczne obrazowanie, a w efekcie wykrywanie, interpretację i wymiarowanie nieciągłości o złożonej morfologii, takich jak gniazda pęcherzy, oraz na dokładniejsze określenie ich charakteru [6]. Ponadto zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji w połączeniu z techniką PCI otwiera nowe perspektywy w automatycznej detekcji i klasyfikacji defektów [21].

W ostatnich latach coraz większe znaczenie zyskuje również podejście probabilistyczne pozwalające na ilościową ocenę prawdopodobieństwa wykrycia nieciągłości w badaniach nieniszczących. Zastosowanie modeli statystycznych prawdopodobieństwa wykrycia (ang. Probability of Detection, POD), często wspieranych symulacjami komputerowymi, pozwala na obiektywną ocenę skuteczności technik ultradźwiękowych w wykrywaniu określonych typów nieciągłości [22, 23]. Dzięki temu możliwe jest lepsze dostosowanie parametrów badania i technik oceny do specyfiki wykrywanych nieciągłości, co zwiększa wiarygodność i efektywność badań.

Celem niniejszej pracy jest ocena skuteczności zaawansowanych technik ultradźwiękowych w wykrywaniu gniazd pęcherzy w złączach spawanych. W niniejszej drugiej części artykułu opisano wyniki badań związanych z oceną bazującą na obrazowaniach 2D z zastosowaniem wymiarowych kryteriów akceptacji. Omówiono wyniki badań dotyczące zastosowania technik TOFD, PAUT, TFM oraz PCI. Omówiono ponadto wpływ parametrów badawczych na jakość uzyskanych obrazowań. Przedstawiono także wyniki badań eksperymentalnych, które pozwoliły na ocenę możliwości detekcji i interpretacji wskazań od gniazd pęcherzy przy użyciu zaawansowanych ultradźwiękowych technik badawczych.

2. Materiał i metodyka badań

Jako próbki do badań wykorzystano doczołowe złącza spawane z pełnym przetopem o grubości od 10 do 16 mm, wykonane ze stali niestopowej gatunku S355J0, zawierające naturalne, celowo wygenerowane nieciągłości spawalnicze, w tym będące przedmiotem badań gniazda pęcherzy. Opis nieciągłości wygenerowanych w próbkach do badań został przedstawiony w części pierwszej artykułu.

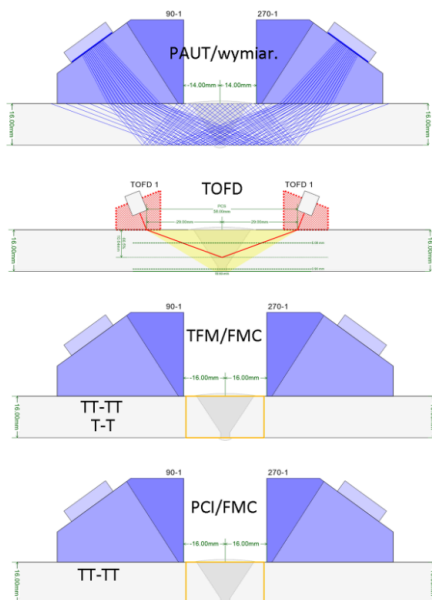
Badania opisane w pracy zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu wymiarowych kryteriów akceptacji opartych na wymaganiach punktu 6a normy ISO 19285 (dla PAUT/

wymiar. i TFM/FMC) a także normy ISO 15626 (dla TOFD). Dla techniki PCI/FMC zastosowano kryteria wymiarowe zaimplementowane z badań PAUT i TFM.

W przypadku wymiarowych kryteriów akceptacji, w pierwszej fazie oceny o akceptowalności wskazań decydują ich długość i wysokość (w mm) zmierzone na obrazowaniach graficznych, a nie – jak przy kryteriach amplitudowych – długość i maksymalna amplituda (w dB). Zatem amplituda wskazania nie ma bezpośredniego wpływu na akceptowalność wykrytych wskazań. Fakt ten jest kluczowy w przypadku wykrywania gniazd pęcherzy, które mogą być wyraźnie widoczne na obrazowaniach graficznych, pomimo bardzo niskiej amplitudy wskazań.

Warto zauważyć, że opisane kryteria akceptacji stosowane zgodnie z punktem 6a normy ISO 19285:2017 zostały zapożyczone z opublikowanej wiele lat wcześniej normy ISO 15626:2009 dla badań TOFD i są z zapisami tej normy tożsame. Jedyną istotną zmianą w stosowanych systemach oceny to różnica w poziomie akceptacji przypisanym określonoemu poziomowi jakości złącza. Dla poziomu jakości B wg ISO 5817 w badaniach TOFD stosowany jest poziom akceptacji 1 wg ISO 15626, natomiast w badaniach PAUT i TFM stosuje się łagodniejszy poziom akceptacji 2 wg ISO 19285.

Wyniki badań przedstawione w drugiej części artykułu zostały uzyskane z zastosowaniem konfiguracji badawczych zdefiniowanych i scharakteryzowanych w pierwszej części pracy, tzn. technik TOFD, PAUT/wymiar., TFM/FMC oraz PCI/FMC [1]. Przykładowe plany skanowania zastosowane przy badaniu złącza o grubości 16 mm pokazano na rysunku (Rys. 1).



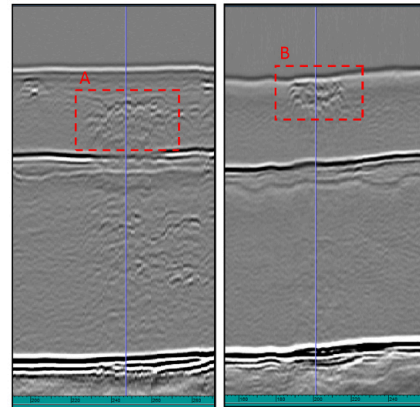
Rys. 1. Plany skanowania zastosowane w badaniach ultradźwiękowych: PAUT/wymiar., TOFD, TFM/FMC oraz PCI/FMC

Fig. 1. Scan plans used in ultrasonic testing: PAUT/dimensional, TOFD, TFM/FMC, and PCI/FMC

3. Wyniki badań i ich analiza

3.1 Badania techniką TOFD

W pierwszej części artykułu przedstawiono wyniki badań radiograficznych oraz ultradźwiękowych złączy spawanych zawierających gniazda pęcherzy o oznaczeniu A oraz B. Na rysunku poniżej (Rys. 2) zaprezentowano wyniki badań techniką TOFD odcinków złączy na których występują przywołane powyżej gniazda pęcherzy.



Rys. 2. Obrazy TOFD złączy z widocznymi wskazaniami gniazda pęcherzy A (po lewej) oraz B (po prawej)

Fig. 2. TOFD images of joints with visible indications of gas pore cluster A (left) and B (right)

Na obrazach TOFD zaprezentowano wyraźnie widoczne wskazania od gniazd pęcherzy o oznaczeniu A i B (Rys. 2). W przeciwieństwie do pojedynczych nieciągłości płaskich (patrz Rys. 13 w [1]), wskazania te nie mają jednoznacznie zdefiniowanych linii sygnałów dyfrakcyjnych i przypominają miejscowy szum, który rozciąga się w dół w kierunku dłuższego czasu przejścia wiązki. W tym przypadku dochodzi do rozmycia sygnału fali odbitej, wynikającego z rozproszenia wiązki, przy jednoczesnym braku rozmycia sygnału fali transformowanej, która propaguje z odsunięciem od osi badanego złącza [2, 10]. Na podstawie analizy sygnałów można wnioskować, że gniazdo znajduje się blisko grani spoiny i jest symetrycznie rozmieszczone względem jej osi.

W przypadku gniazda pęcherzy B jego wskazanie jest również wyraźnie widoczne, z tą różnicą, że jest przesunięte do krótszych czasów przejścia wiązki, tj. bliżej fali podpowierzchniowej LW. Jednocześnie nie występuje osłabienie fali odbitej. Świadczy to o mniejszej głębokości zalegania nieciągłości w stosunku do gniazda A.

Warto zwrócić uwagę, że wskazania od gniazd pęcherzy w TOFD mają zbliżoną amplitudę do wskazań od nieciągłości płaskich. Szczególnie widoczne jest to w przypadku pęknięcia P1, które można rozpoznać po przerwaniu fali odbitej oraz sygnale górnego wierzchołka nieciągłości o amplitudzie nieprzekraczającej amplitudy wskazania od gniazda pęcherzy (patrz Rys. 13 w części 1 artykułu). W rozważanym przypadku wykrycie wskazania od gniazda pęcherzy nie jest trudniejsze niż wykrycie wskazań od nieciągłości płaskich, jednak jego charakteryzowanie nie pozwala na wymiarowanie wysokości ze zbliżoną dokładnością. Jest to spowodowane faktem, że widoczne wskazanie graficzne nie jest pojedynczym sygnałem dyfrakcyjnym z wierzchołka

nieciągłości – jak ma to miejsce w przypadku pęknięcia - lecz jest wynikiem interferencji wielu sygnałów odbitych, rozproszonych lub ugiętych na dziesiątkach pojedynczych, niewielkich nieciągłościach w postaci pęcherzy. Nie podlega jednak dyskusji, że analizowane gniazda pęcherzy są łatwo wykrywalne w badaniu TOFD.

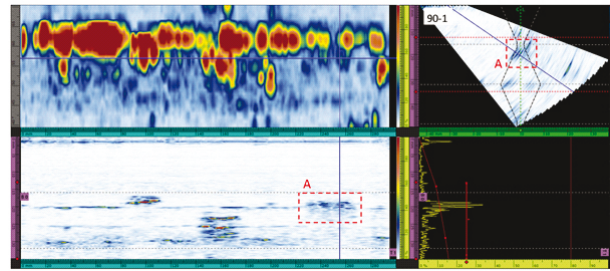
3.2 Badania techniką PAUT

Zamieszczone poniżej rysunki przedstawiają przykłady wskazań od gniazda pęcherzy A i B w badaniach PAUT (Rys. 3÷5). W przypadku gniazda A, wskazanie jest widoczne na obrazowaniu B-skan na odcinku od około 230 do 270 mm długości skanu, jak również na obrazowaniu S-skan w płaszczyźnie przekroju poprzecznego złącza (Rys. 3). Analogicznie, w przypadku gniazda B na obrazowaniu B-skan występuje wskazanie na odcinku w przybliżeniu od 185 do 225 mm długości skanu, jak również na obrazowaniu S-skan generowanym w płaszczyźnie przekroju poprzecznego złącza (Rys. 4). Aby uwidocznić niską kierunkową zdolność odbijania, na rysunku przedstawiono porównanie wskazań na długości oraz przekroju spoiny, uzyskanych z obu stron złącza z pozycji 90-1 i 270-1 (Rys. 5). Na wszystkich czterech obrazowaniach PA wskazania od gniazda pęcherzy A i B są dobrze widoczne i mają zbliżony charakter, z dużą liczbą rozmytych sygnałów o amplitudzie kodowanej kolorem niebieskim lub granatowym. Podsumowując, we wszystkich analizowanych przypadkach duże gniazda pęcherzy o oznaczeniach A i B zostały skutecznie wykryte za pomocą techniki PAUT z wykorzystaniem konfiguracji badawczej zaprojektowanej do użycia łącznie z kryteriami akceptacji opartymi na długości i wysokości wskazań.

Aby szczegółowo udokumentować wartości amplitudy wskazań wzdłuż długości złącza, dla wybranych wyników badań przeprowadzono pomiary amplitudy zgodnie z metodyką opisaną w części pierwszej artykułu [1]. Wyniki tych pomiarów przedstawiono na rysunku (Rys. 6).

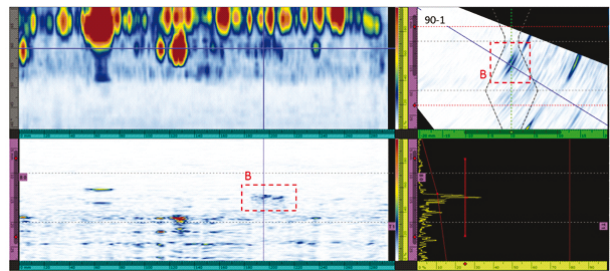
Biorąc pod uwagę, że wartość amplitudy sygnału dla rozważanych nieciągłości, wyłączając obszary o obniżonej amplitudzie na ich końcach, waha się w zakresie od ok. -24 dB do -10 dB, a zmierzona wartość szumu w obszarze występowania gniazda pęcherzy wyniosła ok. -36 dB można stwierdzić, że stosunek sygnału do szumu dla wskazań tych konkretnych nieciągłości w rozpatrywanych warunkach badania wynosi ok. 12 dB. Oznacza to, że wymagany dla badań PAUT z oceną na obrazowaniach graficznych, określony w normie ISO 13588, minimalny stosunek sygnału do szumu równy 6 dB, został w tym przypadku osiągnięty z nadmiarem. Oznacza to jednocześnie, że istnieje techniczna możliwość uwidocznienia tych wskazań na tle szumów występujących na obrazowaniach.

Zastosowana konfiguracja badawcza PAUT/wymiar. różniła się znacząco od PAUT/amp. użytej w badaniach z amplitudową oceną wskazań, opisanych w pierwszej części artykułu [1]. W badaniach przeprowadzonych na potrzeby oceny amplitudowej zastosowano cztery skanowania elektroniczne sektorowe, wykonywane po dwa z każdej strony złącza, zakładające kierowanie wiązek pod kątem zbliżonym



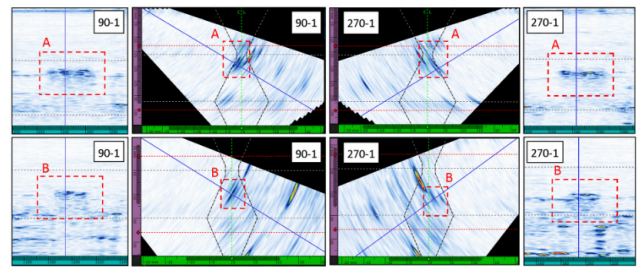
Rys. 3. Wskazania od gniazda pęcherzy A w badaniach PAUT/wymiar. przy skanowaniu z pozycji 90-1

Fig. 3. Indications from gas pore cluster A in PAUT/dimensional testing at scanning position 90-1



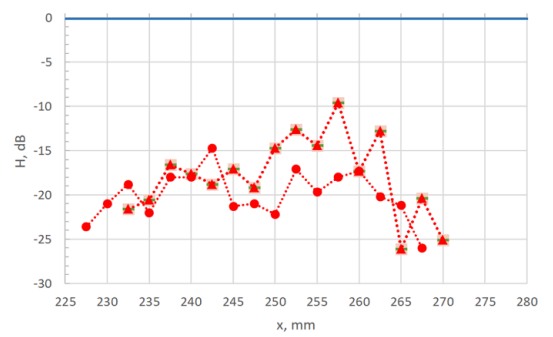
Rys. 4. Wskazania od gniazda pęcherzy B w badaniach PAUT/wymiar. przy skanowaniu z pozycji 90-1

Fig. 4. Indications from gas pore cluster B in PAUT/dimensional testing at scanning position 90-1



Rys. 5. Zestawienie przykładowych wskazań od gniazd pęcherzy A i B w badaniach PAUT/wymiar. z pozycji głowicy 90-1 i 270-1

Fig. 5. Examples of indications from gas pore clusters A and B in PAUT/dimensional testing using a 90°-1 and 270°-1 probe



Rys. 6. Wyniki pomiarów amplitudy wskazań od gniazda pęcherzy A w badaniu PAUT/wymiar.; oznaczenie punktów: O – pozycja 90-1, Δ – pozycja 270-1

Fig. 6. Amplitude of indications from gas pore cluster A along the joint length, PAUT technique: O – position 90-1, Δ – position 270-1

do prostopadłego na ukosowaną ściankę rowka spoiny. W zaprezentowanych powyżej badaniach PAUT, ukierunkowanych na ocenę wymiarową, wykorzystano dwa skanowania elektroniczne typu compound (sektorowe poszerzone) z zastosowaniem kątów padania wiązek umożliwiających uzyskanie sygnałów dyfrakcyjnych lub odbitych z nieciągłości płaskich zlokalizowanych na ściance rowka spoiny (np. przyklejeń lub pęknięć) [5]. Mimo różnic w stosowanej konfiguracji badawczej, zarejestrowane wartości amplitudy są w obu przypadkach zbliżone. Potwierdza to niską kierunkową zdolność odbijania wykrywanych gniazd pęcherzy.

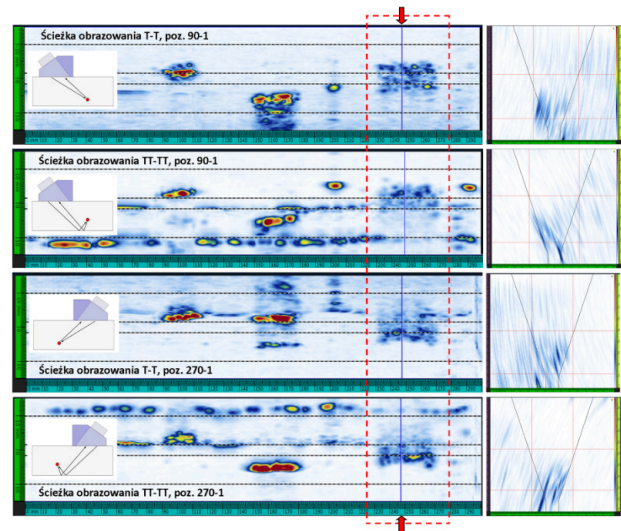
Analizując otrzymane wyniki stwierdzono, że amplituda wskazań od gniazda pęcherzy w badaniu PAUT/wymiar. jest zbliżona do poziomu oceny stosowanego w przypadku oceny amplitudowej (H0-14dB) i na przeważającej części długości gniazda pozostaje poniżej tego poziomu. Wyniki te potwierdzają więc, że mimo widoczności gniazda pęcherzy na zobrazowaniach PAUT, przyjęcie w procedurze badawczej poziomu oceny zapożyczonego z kryteriów amplitudowych będzie prowadziło do pominięcia sygnałów od tego typu nieciągłości. Amplituda wskazań od gniazd pęcherzy jest zbyt niska, aby przekroczyć tak przyjęty poziom oceny na całej długości gniazda. Taka sytuacja może wystąpić pomimo dobrej widoczności wspomnianych wskazań na obrazach PAUT (Rys. 3 ÷ 5). Stąd należy wysnuć wniosek, że poziom oceny H0-14dB zdefiniowany dla kryteriów amplitudowych nie jest właściwy w przypadku stosowania wymiarowych kryteriów oceny wskazań.

Poziom oceny dla kryteriów wymiarowych nie jest określony normatywnie (patrz punkty 6a, 7 i 9 normy ISO 19285), zazwyczaj jest on jednak przyjęty w procedurze badania. W związku z tym w dużym stopniu to od zapisów procedury badawczej zależeć będzie wykrywalność gniazd pęcherzy w złączach spawanych w badaniach PAUT.

3.3 Badania techniką TFM

Złącza zawierające gniazda pęcherzy A i B zostały poddane badaniom z wykorzystaniem techniki TFM/FMC. W obu przypadkach na zobrazowaniach graficznych uzyskano wyraźnie widoczne wskazania od gniazd pęcherzy. Na rysunku przedstawiono przykładowe wyniki badań złącza z gniazdem pęcherzy A zarejestrowane z pozycji 90-1 i 270-1 przy użyciu dwóch ścieżek obrazowania: TT-TT oraz T-T (Rys. 7). Przedstawione zobrazowania stanowią przekrój poprzeczny złącza (po prawej) a także rzut złącza z góry (po lewej) na tle ścianek rowka spoiny. Wyniki przeprowadzonych badań jednoznacznie potwierdzają możliwość wykrywania nieciągłości rozważanego typu w oparciu o technikę TFM. We wszystkich wynikach badań zarejestrowanych zarówno z pozycji 90-1, jak i 270-1, gniazda pęcherzy zostały uwidocznione w postaci łatwo rozpoznawalnych wskazań graficznych. Jakość zobrazowań była nieznacznie wyższa niż w przypadku badań PAUT, co przejawiało się lepszą rozdzielczością sygnałów.

Warto zaznaczyć, że do kodowania amplitudy użyto tej samej palety barw („EVDNT_Amplitude”), która jest



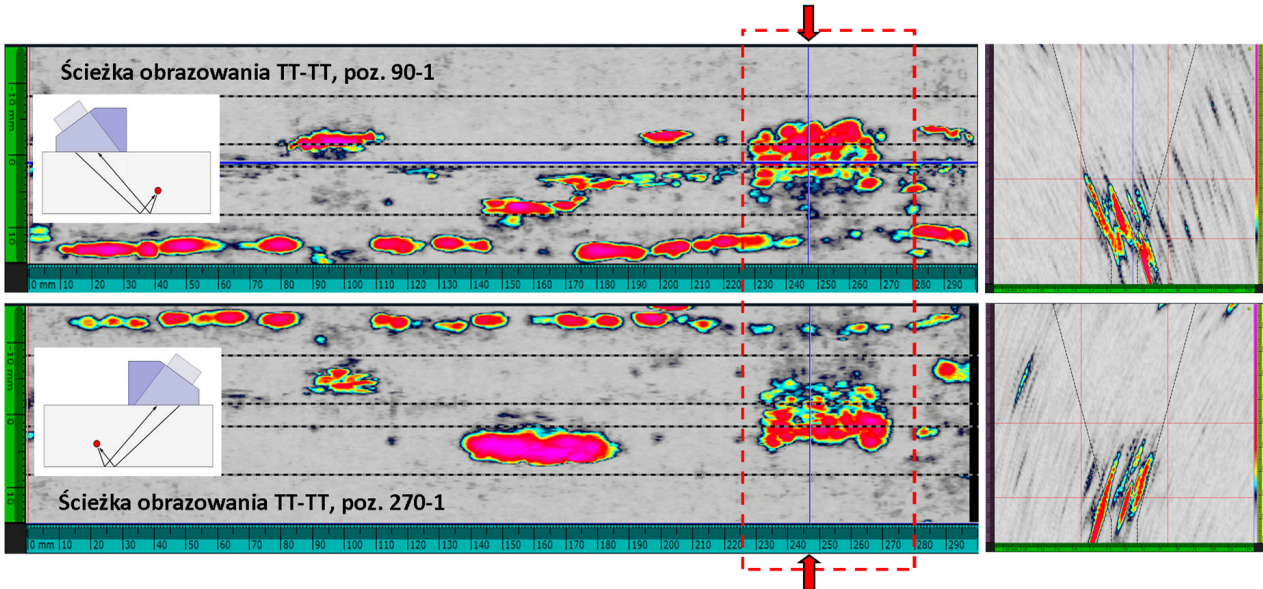
Rys. 7. Zestawienie przykładowych wskazań od gniazda pęcherzy A w badaniach TFM/FMC z pozycji głowicy 90-1 i 270-1 przy zastosowaniu ścieżki obrazowania TT-TT oraz T-T
Fig. 7. Results of joint A examinations using the TFM technique with probe positions 90-1 and 270-1 utilizing TT-TT and T-T imaging paths

standardowo stosowana w technice PAUT na defektoskopach Omnican X3 (Rys. 3–5). Podczas dokonywania nastaw do badań TFM zastosowano również identyczną czułość badania, tzn. tożsamy poziom odniesienia H0 oraz identyczne wzmocnienie skanowania. Dzięki temu możliwe jest bezpośrednie porównanie charakteru zobrazowań graficznych uzyskanych w badaniach PAUT/wymiar oraz TFM/FMC. Na zamieszczonych zobrazowaniach można zauważyć występującą lokalnie nieco wyższą amplitudę wskazań, co wynika z silniejszego i efektywniejszego ogniskowania obrazu w technice TFM.

Przy użyciu standardowej palety barw „EVDNT_TFM_Amplitude”, uzyskane wskazania od gniazd pęcherzy były mniej intensywne. W rezultacie były one trudniejsze do zauważenia i scharakteryzowania na zobrazowaniach graficznych. Różnica ta wynika z innego rozkładu kolorów w stosowanych paletach barw dla określonej amplitudy sygnałów; w pierwszej z nich jasno niebieski kolor przypisany jest amplitudzie ok. 15% FSH, podczas gdy w drugiej przypisany jest amplitudzie ok. 25% FSH. Oznacza to, że oprócz nastaw czułości badania znaczący wpływ na wykrywalność gniazd pęcherzy w tych technikach będzie miała paleta barw zastosowana do kodowania amplitudy wskazań.

3.4 Badania techniką PCI

W badaniach konfiguracją PCI/FMC wykryto zarówno gniazdo pęcherzy A jak i B. Na rysunku przedstawiono przykładowe wyniki badań PCI złącza spawanego zawierającego gniazdo pęcherzy A (Rys. 8). Potwierdzają one wykrycie wskazań zarówno z pozycji 90-1 jak i 270-1. W tym przypadku wskazania wykazują największą wyrazistość na zobrazowaniach graficznych spośród wszystkich



Rys. 8. Zestawienie przykładowych wskazań od gniazda pęcherzy A w badaniach PCI/FMC z pozycji głowicy 90-1 i 270-1 przy zastosowaniu ścieżki obrazowania TT-TT

Fig. 8. Results of examinations using the PCI technique with probe positions 90-1 and 270-1 utilizing TT-TT imaging paths

stosowanych technik, co powoduje, że były one bardzo łatwe do identyfikacji. Gniazdo pęcherzy A zostało wykryte na obrazach zarejestrowanych z głowic ustawionych po obydwu stronach spoiny, zarówno z pozycji 90-1 jak i 270-1.

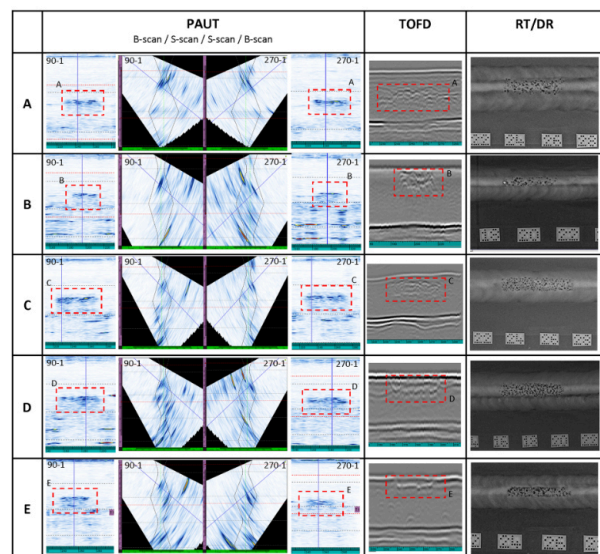
Główną różnicą między wynikami badań PCI a badaniami PAUT i TFM było bardzo wysokie nasycenie kolorów na zobrazowaniach graficznych. Różnica wynika z zastosowania innej palety barw („EVDNT_PC-TFM”) oraz odmiennych metod tworzenia zobrazowań, opartych na koherencji fazowej, a nie – jak w innych technikach ultradźwiękowych – na amplitudzie sygnału. W efekcie sygnały w PCI są wysoko nasycone, często na granicy przesterowania. Biorąc pod uwagę, że technika PCI generuje wyraźne i intensywne wskazania dla dużych gniazd pęcherzy, można przypuszczać, że jest ona zdolna również do wykrywania niewielkich nieciągłości tego typu.

3.5 Zestawienie wyników badań i ich analiza

W celu weryfikacji, czy przedstawione wyniki są reprezentatywne dla szerszej grupy podobnych nieciągłości, wykonano badania uzupełniające. Na ich podstawie zamieszczono zestawienie wybranych zobrazowań dla szerszej grupy gniazd pęcherzy (A–F). Zaprezentowano w nich obrazy nieciągłości uzyskane z badań ultradźwiękowych PAUT i TOFD, a także wyniki badań radiograficznych stanowiące potwierdzenie ich rodzaju i nasilenia. Na rysunku zestawiono wyniki od gniazd pęcherzy od A do E (Rys. 9). Dla wszystkich gniazd uzyskano wyraźne wskazania na zobrazowaniach PAUT zarówno z pozycji 90-1 jak i 270-1, o zbliżonym charakterze i porównywalnym poziomie amplitudy. Zatem wykres amplitudy pokazany na rysunku (Rys. 6) dla gniazda A można traktować jako

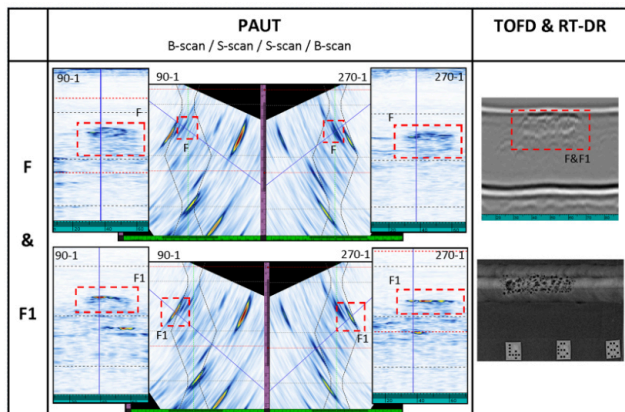
reprezentatywny dla pozostałych gniazd pęcherzy. Ponadto, również w przypadku techniki TOFD możliwe było wykrycie każdej z analizowanych nieciągłości, co wskazuje na wysoką spójność wyników między zaprezentowanymi technikami oraz metodą RT.

Na rysunku (Rys. 10) zestawiono analogiczne wyniki badań, tym razem otrzymane dla złącza, w którym w miejscu występowania gniazda pęcherzy (F) stwierdzono również występowanie nieciągłości płaskich na obydwu ściankach



Rys. 9. Zestawienie wyników badań PAUT/wymiar, TOFD oraz RT/DR dla gniazd pęcherzy A ÷ E

Fig. 9. Summary of PAUT/dimensional, TOFD, and RT/DR test results for gas pore clusters A ÷ E



Rys. 10. Zestawienie wyników badań PAUT/wymiar, TOFD oraz RT/DR w miejscu występowania gniazda pęcherzy F i obustronnych przyklejeń brzegowych F1

Fig. 10. Summary of PAUT/dimensional, TOFD, and RT-DR test results at the location of gas pore cluster F, and bilateral edge lack of fusion F1

rowka spawalniczego, tj. obustronnych przyklejeń brzegowych. Gniazdo pęcherzy (F) jest umiejscowione w spoinie na nieco większej głębokości niż znajdujące się nad nimi obustronne przyklejenia brzegowe (F1). Nieciągłości te w badaniach PAUT diametralnie różnią się zarówno amplitudą, obwiednią echa, jak i kierunkową zdolnością odbijania wiązki ultradźwiękowej. Wskazanie od gniazda pęcherzy (F) ma analogiczny charakter jak przedstawione wyżej wyniki z gniazda A÷E. Natomiast nieciągłości współlistniejące w postaci przyklejeń brzegowych (F1) wykazują bardzo wysoką amplitudę maksymalną, dużą

zmienność amplitudy na długości wskazań, jak również wysoką kierunkową zdolność odbijania.

Opisana powyżej sytuacja to typowy przypadek gniazda pęcherzy, które w badaniach PE lub PAUT z użyciem kryteriów amplitudowych zostałyby wykryte niejako „przypadkowo”, z uwagi na towarzyszące mu nieciągłości płaskie generujące wysoką amplitudę echa. O takiej możliwości wspomniano już w pierwszej części artykułu. Jak można zauważyć, z użyciem techniki PAUT i kryteriów wymiarowych wykrywalne są obydwie nieciągłości.

W przypadku wszystkich rozważanych gniazd pęcherzy stwierdzono możliwość ich wykrycia z wykorzystaniem zaawansowanych technik ultradźwiękowych, takich jak TOFD, PAUT, TFM oraz PCI. Biorąc pod uwagę uzyskane rezultaty, można wnioskować, że duże gniazda pęcherzy, zaprezentowane i analizowane w pracy, mogą zostać skutecznie wykryte w złączach spawanych z użyciem ultradźwiękowych technik obrazujących pod warunkiem zastosowania wymiarowych kryteriów oceny wskazań. Istotny jest odpowiedni dobór parametrów badania, w szczególności parametrów ultradźwiękowych gwarantujących dobrą rozdzielczość oraz wysoki stosunek sygnału do szumu jak również ustawień związanych z generowaniem obrazowania graficznego. Podsumowanie wybranych wyników badań opisanych w pierwszej [1] oraz niniejszej, drugiej części artykułu, zamieszczono w tabeli (Tab. 1).

Analiza wyników uzyskanych techniką TOFD pokazała, że choć wykrycie gniazda pęcherzy nie jest trudniejsze niż wykrycie nieciągłości płaskich, to uzyskane obrazowanie daje mniej precyzyjne informacje o wykrytej nieciągłości.

Tab. 1. Podsumowanie wyników badań z wykorzystaniem wszystkich konfiguracji badawczych oraz gniazd pęcherzy A i B

Tab. 1. Summary of test results using all testing configurations and gas pore clusters A and B

Stosowana konfiguracja badawcza	Rezultaty oceny	Gniazdo pęcherzy A	Gniazdo pęcherzy B	Uwagi
PE/DAC	Rejestracja?	NIE	NIE	Wykrywalność dużych gniazd pęcherzy ograniczona z uwagi na niską amplitudę wskazań
	Akceptacja?	TAK	TAK	
PE/DGS	Rejestracja?	NIE	NIE	Wykrywalność dużych gniazd pęcherzy ograniczona z uwagi na niską amplitudę wskazań
	Akceptacja?	TAK	TAK	
PAUT/amp.	Rejestracja?	NIE	NIE	Wykrywalność dużych gniazd pęcherzy ograniczona z uwagi na niską amplitudę wskazań
	Akceptacja?	TAK	TAK	
PAUT/wymiar.	Rejestracja?	TAK	TAK	Wykrywalność dużych gniazd pęcherzy dobra, zależy jednak od ustalonych w procedurze parametrów badania PAUT
	Akceptacja?	NIE	NIE	
TOFD	Rejestracja?	TAK	TAK	Wykrywalność dużych gniazd pęcherzy dobra, ograniczona zdolność charakteryzowania nieciągłości
	Akceptacja?	NIE	NIE	
TFM/FMC	Rejestracja?	TAK	TAK	Wykrywalność dużych gniazd pęcherzy dobra, zależy jednak od ustalonych w procedurze parametrów badania TFM
	Akceptacja?	NIE	NIE	
PCI/FMC	Rejestracja?	TAK	TAK	Wykrywalność dużych gniazd pęcherzy bardzo dobra. Mogą występować wskazania o bardzo wysokim nasyceniu, zmniejszającym ich czytelność
	Akceptacja?	NIE	NIE	

Dokładniejszą analizę tego zagadnienia można odnaleźć w literaturze [4, 10, 11].

Badania techniką PAUT wykazały, że mimo różnic w konfiguracji badawczej, amplituda wskazań od gniazd pęcherzy była zbliżona do wyników uzyskanych dla konfiguracji stosowanej na potrzeby oceny amplitudowej (tj. PAUT/amp.). Niezależnie od tego faktu, zastosowanie kryteriów wymiarowych umożliwiło skuteczne wykrycie omawianych nieciągłości.

Bazując na otrzymanych wynikach badań można przyjąć, że wskazania od gniazd pęcherzy analizowanego typu wykazują na całej swojej długości - z wyłączeniem spadków amplitudy na ich zakończeniach - sygnał o amplitudzie powyżej H0-24 dB (Rys. 6). Przyjmując zgodnie z ISO 13588 założenie, że do wykrycia wskazań na obrazowaniach graficznych 2D niezbędny jest stosunek sygnału do szumu (SNR) co najmniej 6dB, można oszacować maksymalny poziom szumu nie ograniczający wiarygodności badania na poziomie H0-30 dB. Powyższe stwierdzenie może być traktowane jako obiektywny i weryfikowalny warunek zagwarantowania możliwości wykrycia dużych gniazd pęcherzy w badaniach PAUT.

Poza uzyskaniem odpowiedniej jakości danych w PAUT wymagana jest ponadto właściwa ich wizualizacja na tworzonych obrazowaniach, która powinna zapewnić możliwość uwidocznienia wskazań graficznych o amplitudach powyżej H0-24dB.

Skuteczność wykrywania gniazd pęcherzy przy użyciu techniki TFM była zbliżona do PAUT, i związana była z lepszą rozdzielczością obrazowań. Z kolei technika PCI zapewniła najwyższą wyrazistość uzyskiwanych obrazowań, co ułatwiło identyfikację wskazań od gniazd pęcherzy.

Podsumowanie

Podsumowując wyniki badań należy pamiętać, że dotyczą one gniazd o dużych wymiarach i znacznym nasileniu występowania pęcherzy gazowych. Wykrycie niewielkich gniazd może być znacznie trudniejsze niż wykrycie gniazd pęcherzy o rozważanej w niniejszym artykule wielkości i nasileniu. Należy również zwrócić uwagę na parametry badania, które mogą istotnie wpływać na wykrywalność tego rodzaju nieciągłości. Biorąc pod uwagę powyższe zastrzeżenia można następująco podsumować wyniki przedstawionych badań:

4. Podsumowanie

Podsumowując wyniki badań należy pamiętać, że dotyczą one gniazd o dużych wymiarach i znacznym nasileniu występowania pęcherzy gazowych. Wykrycie niewielkich gniazd może być znacznie trudniejsze niż wykrycie gniazd pęcherzy o rozważanej w niniejszym artykule wielkości i nasileniu. Należy również zwrócić uwagę na parametry badania, które mogą istotnie wpływać na wykrywalność tego rodzaju nieciągłości. Biorąc pod uwagę powyższe zastrzeżenia można następująco podsumować wyniki przedstawionych badań:

- badania ultradźwiękowe techniką PAUT, przeprowadzone zgodnie z wymaganiami ISO 13588 i ISO 19285,

z zastosowaniem kryteriów oceny opartych na długości i wysokości wskazań według punktu 6a normy ISO 19285, umożliwiają skuteczne wykrywanie gniazd pęcherzy. W tym przypadku wskazania nieciągłości są wyraźnie widoczne na obrazowaniach graficznych PAUT, a wymiarowe kryteria akceptacji umożliwiają uwzględnienie tych wskazań w ocenie dokonywanej zgodnie z wymaganiami punktu 7 i 9 normy ISO 19285. Jest to jednak możliwe pod warunkiem zastosowania parametrów badania dostosowanych do wykrywania wyżej wymienionych nieciągłości wykazujących niskie amplitudy echa;

- badania ultradźwiękowe techniką TOFD przeprowadzone zgodnie z wymaganiami ISO 10863 oraz ISO 15626 umożliwiają skuteczne wykrywanie gniazd pęcherzy, oferując mniejsze w stosunku do pozostałych analizowanych technik, możliwości w zakresie charakteryzowania wykrytych nieciągłości;
- badania ultradźwiękowe techniką TFM przeprowadzone zgodnie z wymaganiami ISO 23864 oraz ISO 19285 z zastosowaniem kryteriów oceny opartych na długości i wysokości wskazań wg punktu 6a normy ISO 19285 umożliwiają skuteczne wykrywanie gniazd pęcherzy. Uzyskanie wyraźnych, łatwych do detekcji wskazań na obrazowaniach graficznych zależy jednak od zastosowanej palety barw oraz wartości wzmocnienia skanowania;
- badania ultradźwiękowe techniką PCI umożliwiają skuteczne wykrywanie gniazd pęcherzy. W przypadku tej techniki badawczej wyżej wymienione nieciągłości generują najbardziej jednoznaczne wskazania ze wszystkich analizowanych ultradźwiękowych technik badawczych.

5. Literatura

- [1] K. Kaczmarek, R. Kaczmarek, „Wykrywalność gniazd pęcherzy w złączach spawanych przy użyciu zaawansowanych technik ultradźwiękowych – część pierwsza”, *Badania Nieniszczące i Diagnostyka Techniczna*, 2024.
- [2] J.P. Charlesworth, J.A. Temple, *Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction*, Research Studies Press, Baldock, 2001.
- [3] R. Kaczmarek, „Kryteria wykrywalności przyklejów brzegowych w badaniach ultradźwiękowych złączy spawanych techniką Phased Array”, *Rozprawa doktorska*, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska, 2019.
- [4] R. Kaczmarek, K. Kaczmarek, „Ocena wyników badań złączy spawanych techniką Phased Array wg PN-EN ISO 19285”, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 90, nr 2, s. 10–15, 2018.
- [5] S. Zhang, M. Drinkwater, P. Wilcox, „Efficient total focusing method for ultrasonic non-destructive testing”, *NDT & E International*, vol. 43, 2010, s. 542–551.
- [6] Y. Xiang, M. Cherfaoui, „Phase Coherence Imaging Applied to Ultrasonic Nondestructive Testing”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 65, nr 2, s. 299–310, 2018.
- [7] X. Wang, W. Li, Y. Li, Z. Zhou, J. Zhang, F. Zhu, Z. Miao, „Phased Array Ultrasonic Testing of Micro-Flaws in Additive Manufactured Titanium Block”, *Journal of Manufacturing*

- Processes, vol. 56, 2020, s. 265–274.
- [8] S. Robert, F. Cartier, L. de Roumilly, R.-O. Mondou, P.-E. Lhuillier, G. Garzino, „Adaptive Ultrasonic Imaging with a Phased-array Probe Equipped with a Conformable Wedge”, *Journal of Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 34, 2019, s. 30–40.
- [9] M. Brown, L. Johnson, „Optimization of Total Focusing Method Parameters for Improved Detection of Volumetric Defects”, *Ultrasonics*, vol. 105, 2020, s. 200–210.
- [10] R. Kaczmarek, K. Kaczmarek, J. Ślania, „Interpretation of indications generated by small welding discontinuities in ultrasonic time of flight diffraction technique”, *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 37, nr 3, 2018.
- [11] R. Kaczmarek, K. Kaczmarek, J. Ślania, „Zalety symultanicznych badań ultradźwiękowych techniką Phased Array i TOFD złączy spawanych”, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 89, nr 4, 2017.
- [12] K. Kaczmarek, P. Irek, Ł. Rawicki, J. Ślania, „Wykrywanie niezgodności w złączach spawanych za pomocą techniki czasu przejścia wiązki dyfrakcyjnej (TOFD)”, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, nr 5, 2016.
- [13] R. Kaczmarek, K. Kaczmarek, J. Ślania, R. Krawczyk, „Wykonywanie badań ultradźwiękowych techniką TOFD w aspekcie wymagań norm przedmiotowych”, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, nr 4, 2016.
- [14] Olympus NDT, *Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications*, Olympus IMS, 2007.
- [15] Olympus NDT, *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications*, Olympus IMS, 2007.
- [16] Y. Fu, J. Wu, Z. Liu, R. Wang, B. Jiang, W. Wen, „Phased Array Ultrasonic Test of Vertical Defect on Butt-Joint Weld of CFETR Vacuum Vessel Port Stub”, *Fusion Engineering and Design*, vol. 132, 2018, s. 60–66.
- [17] S. Smith, A. Jones, „Advancements in Phased Array Ultrasonic Testing for Weld Inspections”, *NDT & E International*, vol. 50, 2020, s. 100–110.
- [18] M. Ingram, A. Gachagan, A. Nordon, A.J. Mulholland, M. Hegarty, „Calibration of Ultrasonic Hardware for Enhanced Total Focusing Method Imaging”, *Ultrasonics*, vol. 96, 2019, s. 76–85.
- [19] R. Spencer, R. Sunderman, E. Todorov, „FMC/TFM Experimental Comparisons”, *Proceedings of the 57th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2020, s. 54–61.
- [20] T. Schmitte, O. Nemitz, N. Chichkov, T. Orth, „Application of the Total Focusing Method for Improved Defect Characterization in the Production of Steel Tubes, Pipes and Plates”, *Materials Evaluation*, vol. 75, 2017, s. 250–259.
- [21] D. Lee, K. Kim, „Application of Machine Learning Techniques in Phase Coherence Imaging for Automatic Defect Classification”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 67, nr 8, 2020, s. 1600–1610.
- [22] G. Dobmann, D. Cioclov, J.H. Kurz, „The role of probabilistic approaches in NDT defect detection, classification and sizing”, *Welding in the World*, vol. 51, nr 5–6, 2007, s. 3–11.
- [23] B. Chapuis, F. Jenson, P. Calmon, G. DiCrisci, J. Hamilton, „Simulation-supported POD curves for automated ultrasonic testing of pipeline girth welds”, *Welding in the World*, vol. 58, nr 4, 2014, s. 487–496.