

Karol Kaczmarek*, Rafał Kaczmarek

Lukasiewicz - Górnoląski Instytut Technologiczny – Centrum Spawalnictwa

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

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

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących wykrywalności gniazd pęcherzy w złączach spawanych przy użyciu ręcznych badań techniką PE oraz zaawansowanych technik ultradźwiękowych: Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT), Time of Flight Diffraction (TOFD), Total Focusing Method (TFM) oraz Phased Coherence Imaging (PCI). Badania przeprowadzono na doczołowych złączach spawanych blach o grubości 10-16 mm ze stali niestopowej z celowo wytworzonymi gniazdami pęcherzy.

W pierwszej części artykułu przedstawiono wyniki związane z amplitudowymi kryteriami akceptacji stosowanymi w technikach PE i PAUT. Przedstawiono wykresy maksymalnej amplitudy od gniazd pęcherzy w funkcji położenia głowicy na długości złącza. Pomiary wykonano dla wybranych gniazd pęcherzy techniką PE z zastosowaniem techniki 1 i 2 nastawiania poziomu odniesienia wg ISO 17640 a także techniką PAUT stosując amplitudowe kryteria akceptacji wg p. 6b normy ISO 19285. Otrzymane wyniki badań porównano z wynikami badań radiograficznych, które traktowano jako referencyjną metodę badawczą. Stwierdzono, że przy zastosowaniu kryteriów oceny opartych na długości i amplitudzie wskazań nawet duże gniazda pęcherzy, niezwiązane z występowaniem nieciągłości płaskich, w większości przypadków nie będą podlegać rejestracji w procesie oceny wyników badań techniką PE i PAUT i tym samym, nie wpłyną na wynik oceny badanego złącza.

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

1. Wprowadzenie

Wykrywanie gniazd pęcherzy w złączach spawanych stanowi jedno z większych wyzwań w badaniach ultradźwiękowych. Trudności te wynikają głównie z niskiej amplitudy sygnałów odbitych od tego typu nieciągłości. Gniazda pęcherzy stanowią grupę reflektorów o charakterze zbliżonym do reflektorów sferycznych i o niewielkich wymiarach. W rezultacie wykazują one silną zdolność do rozpraszania wiązki fali ultradźwiękowej, przy niewielkim wpływie kąta

ABSTRACT

The paper presents the results of research on the detectability of gas pore clusters in welded joints using manual Pulse-Echo (PE) testing and advanced ultrasonic techniques: Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT), Time of Flight Diffraction (TOFD), Total Focusing Method (TFM) and Phased Coherence Imaging (PCI). The tests were conducted on butt-welded joints of plates with a thickness of 10-16 mm, made of mild steel, containing deliberately introduced gas pore clusters. The first part of the paper presents the results related to amplitude-based acceptance criteria applied in PE and PAUT techniques. Graphs of maximum amplitude from gas pore clusters as a function of probe position along the joint length are presented. Measurements were performed on selected gas pore clusters using PE with reference level setting methods 1 and 2 in accordance with ISO 17640, and PAUT, applying amplitude-based acceptance criteria according to section 6b of ISO 19285. The obtained results were compared with radiographic testing results, considered as the reference method. It was concluded that when applying evaluation criteria based on indication length and amplitude, even large gas pore clusters that do not coexist with planar discontinuities may, in many cases, remain unregistered during the assessment of PE and PAUT test results and will not impact the final evaluation of the welded joint.

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

padania wiązki na amplitudę sygnału odbitego [1]. Niska amplituda wskazań ogranicza wykrywalność tego typu nieciągłości w badaniach ultradźwiękowych. Zagadnienie wykrywania wskazań o niskiej amplitudzie z wykorzystaniem techniki PAUT jest znane i dotyczy również wykrywania nieciągłości płaskich przy niekorzystnym kącie padania wiązki [2]. Badania wykazały, że techniki ultradźwiękowe oparte na analizie fazowej mogą poprawić wykrywalność tego typu defektów [3].

Ręczne badania techniką puls-echo (PE) stanowią klasyczną, szeroko stosowaną technikę badań. W technice tej stosowane są tradycyjne głowice jedno-

*Autor korespondencyjny.

E-mail: karol.kaczmarek@git.lukasiewicz.gov.pl

i dwuprzetwornikowe. Badanie złączy spawanych techniką PE standardowo prowadzone jest z wykorzystaniem ręcznego przesuwu głowicy, obrazowań 1D (A-skan, o formie zbliżonej do wykresu) i oceny bazującej na amplitudzie oraz długości wskazań (np. wg ISO 11666). W określonych przypadkach badanie może być również prowadzone w sposób zautomatyzowany. Technika ta jest znana i szeroko stosowana od wielu dziesięcioleci [4, 5].

Technika PAUT jest najbardziej zbliżona do konwencjonalnej techniki PE spośród rozważanych zaawansowanych technik ultradźwiękowych. Stosuje ona „klasyczne” wiązki ultradźwiękowe, analogicznie jak w badaniach ręcznych PE, z tą różnicą, że wiązki te są generowane z przetworników wieloelementowych, co umożliwia stosowanie sterowania elektronicznego [6]. Sterowanie elektroniczne pozwala na modyfikowanie charakterystyki wiązek, np. poprzez zmianę wielkości części aktywnej przetwornika lub ogniskowanie, mając wpływ na parametry, które w głowicach tradycyjnych mogą być zmienione jedynie poprzez zmianę ich konstrukcji. Ponadto umożliwia ono tworzenie szeregow wiążek wysyłanych kolejno w krótkich odstępach czasowych, równoległe w pewnej odległości od siebie (skan liniowy) lub też tworząc wachlarz wiązek wysyłanych pod różnymi kątami z tej samej części głowicy (skan sektorowy). Ostatnia cecha jest szczególnie istotna, gdyż pozwala na łatwe zebranie danych niezbędnych do utworzenia obrazowania graficznego 2D [7]. W praktyce badawczej najczęściej wykonuje się ruch głowicy z pomiarem przemieszczenia poprzez ruch skanera wyposażonego w enkoder, co pozwala na zebranie danych 3D i w efekcie na tworzenie różnych obrazowań 2D (np. S-skan, B-skan, C-skan), zdecydowanie ułatwiających analizę wyników [8]. W technice PAUT mogą być stosowane zarówno tradycyjne, znane z badań konwencjonalnych, amplitudowe kryteria oceny wskazań, jak również kryteria wymiarowe, zaimplementowane z badań techniką TOFD [6, 9]. Zastosowanie PAUT do wykrywania nieciągłości o orientacji prostopadłej do powierzchni złączy doczołowych również wykazało wysoką skuteczność w identyfikacji przestrzennych defektów [10].

Total Focusing Method (TFM) jest zaawansowaną techniką pozwalającą na ogniskowanie obrazu w każdym jego punkcie. TFM wykorzystuje macierz danych zebraną zgodnie z algorytmem FMC (Full Matrix Capture) lub innym zbliżonym (np. PWI) [11]. Z powodu wysokiej jakości uzyskiwanych obrazowań w TFM zazwyczaj wykorzystuje się wymiarowe kryteria oceny. Technika ta znalazła zastosowanie w detekcji drobnych defektów w materiałach o złożonej strukturze [12]. Jednakże, ze względu na skupienie się w niniejszej części artykułu na amplitudowych kryteriach oceny, technika TFM nie będzie tutaj szerzej analizowana.

W przypadku pozostałych technik ultradźwiękowych, takich jak TOFD i PCI, nie stosuje się oceny amplitudowej. W pierwszym przypadku amplituda może być stosowana w ograniczonym zakresie na potrzeby interpretacji wskazań, jednak z powodu braku korelacji pomiędzy wysokością amplitudy a istotnością nieciągłości nie jest stosowana jako

kryterium ich oceny. Natomiast obrazowania tworzone w PCI, w przeciwieństwie do wszystkich innych rozważanych technik ultradźwiękowych, nie bazują na amplitudzie (kolor na obrazie nie jest związany z wartością amplitudy), lecz na koherencji fazowej sygnału [13, 14, 15]. Technika PCI pozwala na efektywne wykrywanie i wymiarowanie nieciągłości o złożonej morfologii, dotyczy to również gniazd pęcherzy [16].

W niniejszym artykule podjęto temat porównania zdolności różnych technik ultradźwiękowych i systemów oceny na możliwość wykrycia wskazań od gniazd pęcherzy. W pierwszej części artykułu skupiono się na problematyce związanej z amplitudową oceną wskazań. Przedstawiono wyniki pomiarów amplitudy wskazań od gniazd pęcherzy w badaniach ręcznych PE i półautomatycznych PAUT, ilustrując je również przykładami otrzymanych obrazowań. Zinterpretowano uzyskane wyniki w świetle normatywnych kryteriów oceny, wskazując na skutki ich stosowania. Wyniki badań ultradźwiękowych porównano z wynikami badań referencyjnych metodą radiografii cyfrowej oraz techniką TOFD, która znana jest z faktu wykazywania wysokiej czułości wykrywania nieciągłości o małych wymiarach [17, 18]. Pozwoliło to na poszerzenie kontekstu prowadzonej dyskusji.

W drugiej części artykułu podjęty zostanie temat oceny możliwości szerszej palety ultradźwiękowych technik badawczych (TOFD, PAUT, TFM i PCI), w których zastosowanie znajdują wymiarowe kryteria oceny wskazań. Ponadto przeanalizowane zostaną możliwości wykrycia dużych gniazd pęcherzy w przypadku stosowania kryteriów wymiarowych oraz przedyskutowane zostaną różnice pomiędzy praktycznymi skutkami stosowania obydwu systemów oceny [4, 9, 10].

2. Materiał i metodyka badań

2.1 Materiał badany

Materiałem badanym były 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, włączając analizowane gniazda pęcherzy (Tab. 1).

Tab. 1. Wykaz próbek do badań i oznaczeń nieciągłości badanych

Tab. 1. List of test samples and designations of tested discontinuities

Oznaczenie złącza	Grubość	Oznaczenie nieciągłości	Rodzaj nieciągłości
A	16 mm	A	gniazdo pęcherzy
		P1	pęknięcie
		P2, P3	przyklejenia brzegowe
B	10 mm	B	gniazdo pęcherzy
C	12 mm	C	gniazdo pęcherzy
D	10 mm	D	gniazdo pęcherzy
E	10 mm	E	gniazdo pęcherzy
F	10 mm	F	gniazdo pęcherzy
		F1	przyklejenia brzegowe

2.2 Wyposażenie do badań

Badania ultradźwiękowe technikami PE, PAUT, TOFD, TFM oraz PCI opisane w obydwu częściach artykułu przeprowadzono za pomocą następującego wyposażenia badawczego:

- defektoskop ultradźwiękowy Omniscan X3 64 z modułem 64:128PR (PAUT, TFM, PCI) oraz Omniscan MX2 z modułem 16:128 (PAUT, TOFD);
- skanery do badań ultradźwiękowych HSTM-Flex oraz HST-Lite;
- głowice wieloelementowe 5L32-A31 z klinem kątowym na falę poprzeczną SA31-N55S-IHC (badania PAUT, TFM oraz PCI);
- głowice C-563-SM i kliny ST1-70L-IHS (badania TOFD).

Badania ultradźwiękowe z użyciem konwencjonalnej techniki PE wykonano za pomocą następującego wyposażenia:

- defektoskop ultradźwiękowy Epoch 650;
- głowice AM4R-8x9-70 oraz AM4R-8x9-60.
- Badania radiograficzne techniką cyfrową (RT/DR) wykonano z użyciem:
- lampy rentgenowskiej GE Inspection Technologies, model Eresco 65 MF3;
- detektora cyfrowego Perkin Elmer XRpad 4336 (scyntylator CsI, wielkość piksela 76 μm , 16-bitowa skala szarości).

2.3 Zastosowane techniki badań oraz plany skanowania

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań wykonanych z użyciem następujących technik ultradźwiękowych:

- PE/DAC: konwencjonalne, ręczne badania ultradźwiękowe PE/DAC przeprowadzono głowicą kątową AM4R-8x9-70 oraz AM4R-8x9-60 zgodnie z wymaganiami norm ISO 17640 oraz ISO 11666 z zastosowaniem techniki 1 nastawiania poziomu odniesienia (poziomem odniesienia H0 jest krzywa DAC dla DSDH = 3 mm). Badanie wykonano zgodnie z wymaganiami poziomu badania B wg ISO 17640 stosując przeszukiwanie L z pozycji A i A' z zastosowaniem 1 lub 2 kątów wprowadzenia wiązki zależnie od grubości złącza t. Przy ocenie wyników stosowano poziom akceptacji 2 wg ISO 11666. W dalszej części artykułu pozycje A i A' oznaczane są jako 90 i 270, odpowiadając badaniu z lewej i prawej strony spoiny, zgodnie z konwencją stosowaną w pozostałych, opisywanych w artykule technikach ultradźwiękowych;
- PE/DGS: konwencjonalne badania ultradźwiękowe PE/DGS przeprowadzono głowicą kątową AM4R-8x9-70 oraz AM4R-8x9-60 zgodnie z wymaganiami norm ISO 17640 oraz ISO 11666 z zastosowaniem techniki 2 nastawiania poziomu odniesienia (poziomem odniesienia H0 jest krzywa DGS dla DDSR = 1,5 mm lub DDSR = 2,0 mm, zależnie od grubości złącza t). Badanie wykonano zgodnie

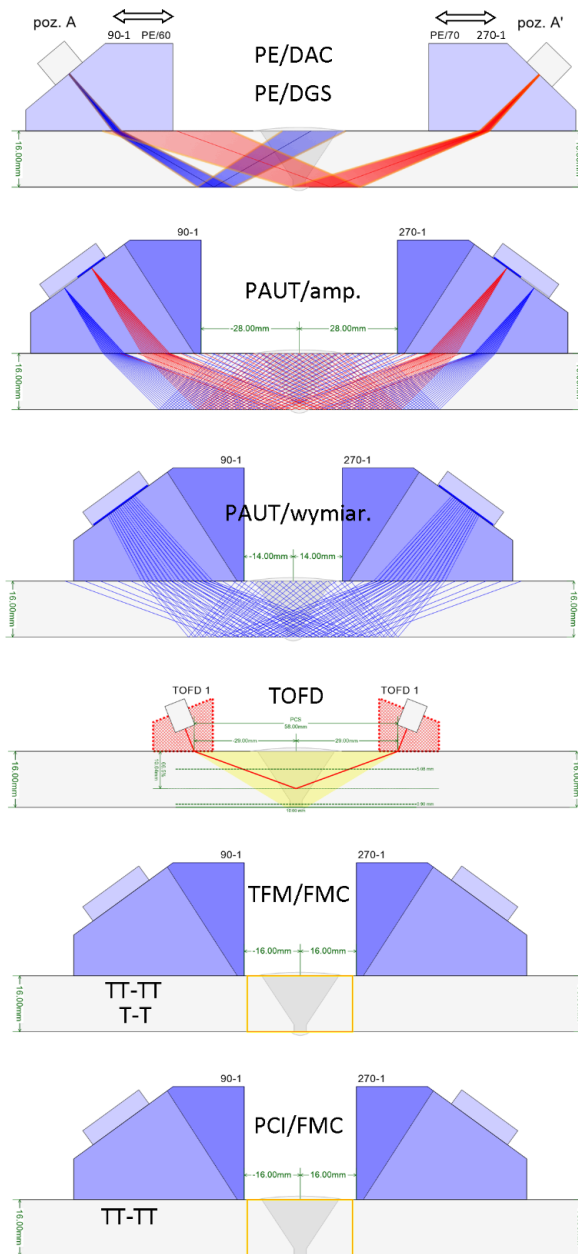
z wymaganiami poziomu badania B wg ISO 17640 stosując przeszukiwanie L z pozycji A i A' z zastosowaniem 1 lub 2 kątów wprowadzenia wiązki zależnie od grubości złącza t. Przy ocenie wyników stosowano poziom akceptacji 2 wg ISO 11666;

- PAUT/amp.: badania PAUT/amp. przeprowadzono zgodnie z wymaganiami norm ISO 13588 oraz ISO 19285 z zastosowaniem kryteriów amplitudowych opartych na długości i maksymalnej amplitudzie wskazań zgodnie z punktem 6b normy ISO 19285. Badania PAUT wykonano głowicą kątową z pozycji 90-1 oraz 270-1 z zastosowaniem skanowania elektronicznego sektorowego z dwóch wirtualnych apertur 16-elementowych (z użyciem elementów 1÷16 oraz 17÷32). Stosowana konfiguracja badawcza spełniała wymaganie normy ISO 13588 dotyczące padania wiązki na ściankę rowka pod kątem $0\pm 6^\circ$. Zastosowano poziom badania B wg ISO 13588 i poziom akceptacji 2 wg ISO 19285;
- PAUT/wymiar.: badania PAUT/wymiar. przeprowadzono zgodnie z wymaganiami norm ISO 13588 oraz ISO 19285 z zastosowaniem kryteriów wymiarowych opartych na długości i wysokości wskazań zgodnie z punktem 6a normy ISO 19285. Badania PAUT wykonano głowicą kątową z pozycji 90-1 oraz 270-1 z zastosowaniem skanowania elektronicznego typu "compound". Zastosowano poziom badania B wg ISO 13588 i poziom akceptacji 2 wg ISO 19285;
- TOFD: badania TOFD przeprowadzono jedną parą głowic kątowych fal podłużnych zgodnie z wymaganiami norm ISO 10863 i ISO 15626. Zastosowano poziom badania C wg ISO 10863 oraz poziom akceptacji 1 wg ISO 15626;
- TFM/FMC: badania TFM/FMC przeprowadzono głowicą kątową z pozycji 90-1 oraz 270-1 zgodnie z wymaganiami norm ISO 23864 i ISO 19285 z zastosowaniem skanowania bocznego i dwóch ścieżek obrazowania: T-T oraz TT-TT. Badanie przeprowadzono z użyciem techniki akwizycji danych FMC. Zastosowano poziom badania B wg ISO 23864 oraz poziom akceptacji 2 wg ISO 19285 z wykorzystaniem kryteriów wymiarowych;
- PCI/FMC: badania PCI/FMC przeprowadzono głowicą kątową z pozycji 90-1 oraz 270-1 z zastosowaniem skanowania bocznego i ścieżki obrazowania TT-TT. Badanie przeprowadzono z użyciem techniki akwizycji danych FMC.

Przykładowe plany skanowania dla złącza o grubości 16 mm stosowane w opisanych powyżej badaniach ultradźwiękowych z użyciem technik rozważanych w artykule pokazano na rysunku (Rys. 1).

Dodatkowo, badane złącza poddano następującym badaniom weryfikującym:

- RT/DR: badania RT/DR przeprowadzono zgodnie z normą PN EN ISO 17636-2, klasa badania B; na załączonych obrazach zastosowano filtry cyfrowe.



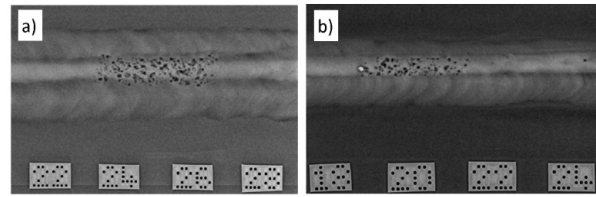
Rys. 1. Plany skanowania zastosowane w badaniach ultradźwiękowych PE/DAC, PE/DGS, PAUT/amp., PAUT/wymiar., TOFD, TFM/FMC oraz PCI/FMC

Fig. 1. Scan plans used in ultrasonic testing PE/DAC, PE/DGS, PAUT/amplitude, PAUT/dimensional, TOFD, TFM/FMC and PCI/FMC

3. Wyniki badań i ich analiza

3.1 Badania radiograficzne

Dla wszystkich opisanych złączy spawanych przeprowadzono badania radiograficzne RT/DR, w każdym przypadku potwierdzając występowanie gniazda pęcherzy deklarowanego przez producenta próbki. We wszystkich próbkach stwierdzono występowanie gniazd pęcherzy o zbliżonym charakterze. Gniazda składały się głównie z dużej liczby drobnych pęcherzy o średnicy do ok. 2 mm



Rys. 2. Radiogram złączy próbnego A i B z widocznymi dużymi gniazdami pęcherzy

Fig. 2. Radiogram of test joints A and B with visible large gas pore clusters

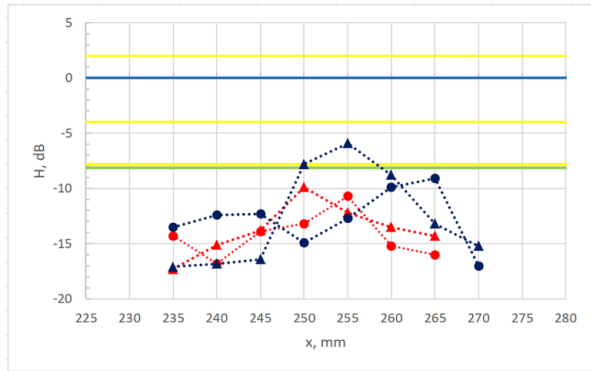
i miały długość w przybliżeniu w zakresie od 20 do 40 milimetrów. W niektórych gniazdach stwierdzono również sporadyczne występowanie pęcherzy o większych wymiarach a także innych nieciągłości przestrzennych (np. wtrąceń wolframu). Na rysunku (Rys. 2) przedstawiono przykłady gniazd pęcherzy analizowanych w pracy. W próbce A stwierdzono występowanie dłuższego gniazda pęcherzy na odcinku ok. 235-270 mm (Rys. 2a), podobnie w próbce B gniazdo pęcherzy stwierdzono na odcinku 190-215 mm (Rys. 2b). Inne próbki analizowane w pracy zawierały wskazania o zbliżonym charakterze (patrz cz. 2 artykułu). W każdym przypadku gniazdo zawierało dużą liczbę drobnych pęcherzy które można uznać za jednoznacznie nieakceptowalne.

3.2 Konwencjonalne badania ultradźwiękowe techniką PE

W ramach ręcznych badań ultradźwiękowych PE/DAC i PE/DGS wykonano przeszukiwanie złączy A i B wraz z rejestracją amplitudy i długości wskazań. Ponadto wykonano pomiar amplitudy na długości gniazda z ustawieniem głowicy co 5 mm, z pozycji głowicy 90 i 270 (A i A'), tzn. z powierzchni od strony lica z lewej i prawej strony spoiny. Podczas wyszukiwania maksymalnej amplitudy w pierwszym etapie stosowano przeszukiwanie ruchem meandrowym, natomiast podczas właściwego pomiaru w określonym ustawieniu głowicy stosowano ruch obrotowy. Oznacza to, że najwyższa zarejestrowana amplituda wskazania może pochodzić z nieco innego położenia na złączy niż podana pozycja głowicy. Z tego względu uzyskane wykresy amplitudy wskazań nie stanowią standardowej obwiedni echa nieciągłości.

Zgodnie z wymaganiami normy ISO 17640 w przypadku próbki A wykonano przeszukiwanie przy zastosowaniu dwóch kątów wprowadzenia wiązki (60° i 70°), natomiast w przypadku próbki B zastosowano jeden kąt wprowadzenia (70°). Wartości amplitudy na długości gniazd pęcherzy A oraz B zmierzone w badaniach PE/DGS oraz PE/DAC przedstawiono na rysunkach (Rys. 3 ÷ 6).

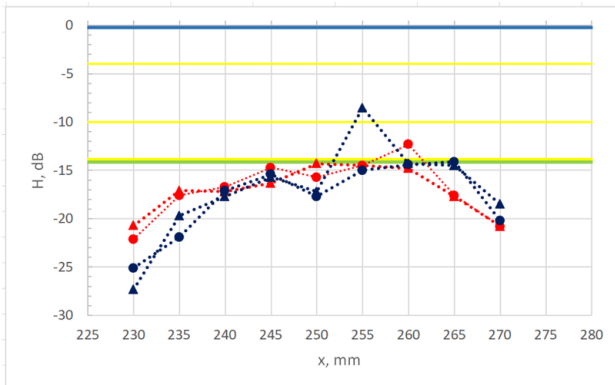
Pomiary na obszarze stwierdzonych gniazd pęcherzy wykazały, że amplituda echa dla przeważającej większości punktów pomiarowych znajduje się poniżej poziomu oceny wskazań i tylko na krótkich fragmentach gniazda pęcherzy przekracza ten poziom. W tym punkcie warto przypomnieć, że w konwencjonalnych badaniach ultradźwiękowych długość wskazań określana jest z użyciem techniki ustalonego poziomu amplitudy zdefiniowanej w p. 4 normy ISO



Rys. 3. Wyniki pomiarów amplitudy wskazań od gniazda pęcherzy A w badaniu PE/DGS; kolor punktów: granatowy – głowica 60°, czerwony – głowica 70°; O – pozycja 90, Δ – pozycja 270. Linie w tle wykresu: niebieska – poziom odniesienia H0, zielona – poziom oceny, żółta – poziomy rejestracji zależne od długości wskazań

Fig. 3. Amplitude measurement results from gas pore cluster A in PE/DGS testing; point colors: blue – 60° transducer, red – 70° transducer; O – position 90, Δ – position 270.

Background graph lines: blue – reference level H0, green – evaluation level, yellow – registration levels dependent on indication length



Rys. 4. Wyniki pomiarów amplitudy wskazań od gniazda pęcherzy A w badaniu PE/DAC; kolor punktów: granatowy – głowica 60°, czerwony – głowica 70°; O – pozycja 90°, Δ – pozycja 270°. Linie w tle wykresu: niebieska – poziom odniesienia H0, zielona – poziom oceny, żółta – poziomy rejestracji zależne od długości wskazań

Fig. 4. Amplitude measurement results from gas pore cluster A in PE/DAC testing; point colors: blue – 60° transducer, red – 70° transducer; O – position 90°, Δ – position 270°.

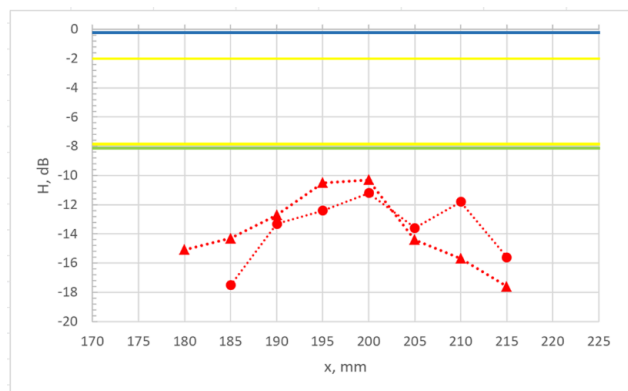
Background graph lines: blue – reference level H0, green – evaluation level, yellow – registration levels dependent on indication length

11666:2018. Zgodnie z jej zapisami, długość wskazań podlegających dalszej ocenie jest mierzona na odcinku, na którym amplituda wskazania przekracza stosowany poziom oceny. Dlatego długość wskazania na części długości gniazda pęcherzy, na której amplituda nie przekracza poziomu oceny (za wyjątkiem przerw między wskazaniami grupowanymi) zgodnie z zapisami normy jest równa 0. Odcinki na których echa od gniazda pęcherzy są zauważalne, ale nie przekraczają poziomu oceny, nie są traktowane jako wskazanie.

Nie każde wskazanie przekraczające poziom oceny jest brane pod uwagę na potrzeby dalszej oceny złącza. W przypadku analizowanych wskazań stwierdzono przekroczenia poziomu oceny tylko na krótkich fragmentach gniazd pęcherzy. Dlatego zgodnie z zapisami normy tego rodzaju wskazania uzyskują niewielką długość i typową dla gniazd pęcherzy, niską maksymalną amplitudę. W efekcie wskazania te, z powodu małej długości i niskiej amplitudy, nie przekraczają poziomu rejestracji określonego w normie ISO 11666. Oznacza to, że nie podlegają rejestracji w protokole badania i nie są brane pod uwagę w grupowaniu oraz obliczaniu skumulowanej długości wskazań akceptowanych na odcinku lw, a tym bardziej nie przekraczają poziomu akceptacji (patrz p. 6.4 oraz 6.5 normy ISO 11666:2018). Dlatego występowanie w złączach analizowanych gniazd pęcherzy nie wpłynęło na końcowy wynik oceny analizowanych złączy spawanych zarówno w przypadku badania PE/DAC jak i PE/DGS.

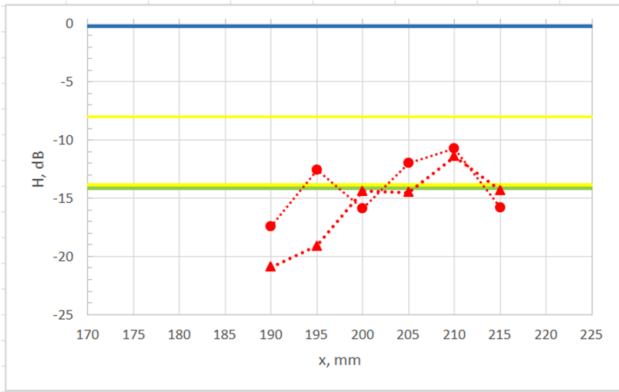
3.3 Badania techniką PAUT z zastosowaniem kryteriów amplitudowych (PAUT/amp.)

W rozdziale przedstawiono wyniki badań PAUT z zastosowaniem kryteriów akceptacji opartych na długości i amplitudzie wskazań zgodnie z punktem 6b normy ISO 19285. Stosowany plan skanowania spełniał kluczowe wymaganie normy ISO 13588 stawiane konfiguracjom badawczym PAUT w których zastosowano kryteria amplitudowe, a mianowicie dotyczące kąta padania wiązek na ściankę rowka spoiny w granicach $0 \pm 6^\circ$. Zastosowane kryteria amplitudowe w technice PAUT są tożsame z kryteriami stosowanymi w konwencjonalnych badaniach



Rys. 5. Wyniki pomiarów amplitudy wskazań od gniazda pęcherzy B w badaniu PE/DGS; kolor punktów: czerwony – głowica 70°; O – pozycja 90, Δ – pozycja 270. Linie w tle wykresu: niebieska – poziom odniesienia H0, zielona – poziom oceny, żółta – poziomy rejestracji zależne od długości wskazań

Fig. 5. Amplitude measurement results from gas pore cluster B in PE/DGS testing; point colors: red – 70° transducer; O – position 90, Δ – position 270. Background graph lines: blue – reference level H0, green – evaluation level, yellow – registration levels dependent on indication length

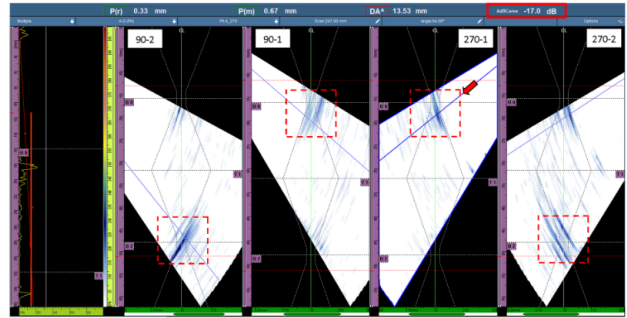


Rys. 6. Wyniki pomiarów amplitudy wskaźników od gniazda pęcherzy B w badaniu PE/DAC; kolor punktów: czerwony – głowica 70°; O – pozycja 90, Δ – pozycja 270. Linie w tle wykresu: niebieska – poziom odniesienia H0, zielona – poziomy rejestracji zależne od długości wskaźników

Fig. 6. Amplitude measurement results from gas pore cluster B in PE/DAC testing; point colors: red – 70° transducer; O – position 90, Δ – position 270. Background graph lines: blue – reference level H0, green – evaluation level, yellow – registration levels dependent on indication length

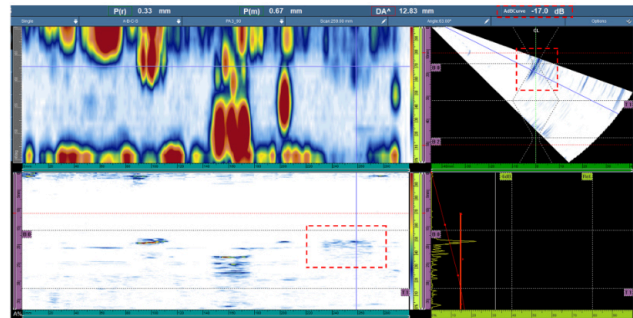
ultradźwiękowych na podstawie normy ISO 11666 dla techniki 1 nastawienia poziomu odniesienia (poziomym odniesienia H0 jest krzywa DAC/TCG dla DSDH = 3 mm).

Na rysunku (Rys. 7) przedstawiono przekrój złącza w miejscu występowania gniazda pęcherzy A ($x = 247$ mm) na czterech obrazowaniach S-skan. Pomimo uzyskania wyraźnie widocznego wskazania na obrazowaniach graficznych, jego maksymalna amplituda na wszystkich czterech przekrojach nie przekracza określonego w normie poziomu oceny i wynosi -17 dB. Oznacza to, że wskazanie zgodnie z zasadami oceny zdefiniowanymi w normie ISO 19285 nie podlega ocenie i jest pomijane. Poniżej pokazano wyniki badań z pozycji 90-1 obrazujące wskazanie od gniazda pęcherzy A na długości złącza (Rys. 8). Pomimo, że wskazanie jest wyraźnie widoczne na długości skanu, to zaobserwowana amplituda wskazania kodowana paletą barw w żadnym punkcie nie jest wyższa niż we wspomnianym powyżej przekroju, a więc nie przekracza -17 dB. W przypadku wyników z pozostałych pozycji (90-2, 270-1, 270-2) charakter oraz amplituda wskazania jest analogiczna w porównaniu z opisaną powyżej dla pozycji 90-1 (Rys. 9). Potwierdzono tym samym typową dla nieciągłości przestrzennych, a zwłaszcza gniazd pęcherzy, zbliżoną zdolność odbijania dla różnych kątów padania wiązki ultradźwiękowej. We wszystkich analizowanych przypadkach wskazania od gniazd pęcherzy były możliwe do wzrokowej identyfikacji na obrazowaniach graficznych PAUT i wykazywały amplitudę ponad 6 dB powyżej poziomu szumów (Rys 8, Rys. 9). Można więc postawić hipotezę, że przynajmniej w pewnych warunkach, istnieje możliwość skutecznego wykrywania tego rodzaju nieciągłości. Zagadnienie to zostanie głębiej przeanalizowane w drugiej części artykułu.



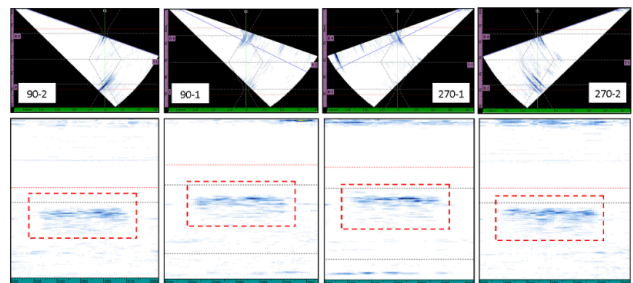
Rys. 7. Zobrazowania S-skan uzyskane w badaniu PAUT/amp. gniazda pęcherzy A z pozycji 90-1, 90-2 oraz 270-1 i 270-2, pokazano przekrój na długości złącza $x=247$ mm. Pomimo widocznych wskaźników graficznych od gniazda pęcherzy nie będą one uwzględnione, gdyż ich amplituda nie przekracza stosowanego poziomu oceny H0-14dB

Fig. 7. S-scan images obtained in PAUT/amplitude testing of gas pore cluster A, from positions 90-1, 90-2, and 270-1, 270-2, showing a cross-section along joint length $x=247$ mm. Despite visible graphic indications of the gas pore cluster, they will not be considered as their amplitude does not exceed the evaluation level H0-14dB



Rys. 8. Zobrazowania A, B, C i S uzyskane w badaniu PAUT/amp. z pozycji 90-1 w miejscu występowania gniazda pęcherzy A ($x=247$ mm)

Fig. 8. A, B, C, and S images obtained in PAUT/amplitude testing from position 90-1 at the location of gas pore cluster A ($x=247$ mm)



Rys. 9. Zobrazowania B i S ($x=247$ mm) uzyskane w badaniu PAUT/amp. z pozycji 90-1, 90-2 oraz 270-1 i 270-2 w miejscu występowania gniazda pęcherzy A

Fig. 9. B and S ($x=247$ mm) images obtained in PAUT/amplitude testing from positions 90-1, 90-2, and 270-1, 270-2 at the location of gas pore cluster A

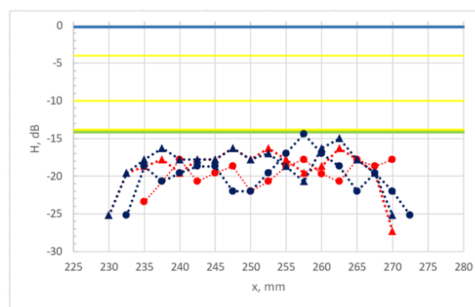
W celu potwierdzenia przedstawionych powyżej analiz jakościowych w dalszej części artykułu - w oparciu o dane zebrane w badaniach PAUT/amp. - przeprowadzono analizy ilościowe na podstawie pomiarów amplitudy wskazań od gniazd pęcherzy wzdłuż ich długości, wykonanych w interwale co 2,5 mm (gniazdo A) lub co 1 mm (gniazdo B). Otrzymane wyniki porównano z kryteriami bazującymi na długości i amplitudzie wskazań zgodnie z p. 6b normy ISO 19285 (Rys. 10 i 11).

W przypadku gniazda pęcherzy A na żadnym z czterech skanów (grup PA) nie zarejestrowano amplitudy przekraczającej założonego poziomu oceny (Rys. 10). Zgodnie ze stosowanymi normatywnymi kryteriami akceptacji (patrz rys. A3 normy ISO 19285) nie podlega ono więc ocenie, a tym bardziej rejestracji do protokołu.

Analizując wyniki otrzymane dla gniazda pęcherzy B tylko w jednym przypadku (pozycja 270-1) w trzech punktach pomiarowych (204 mm, 205 mm i 206 mm) uzyskano amplitudę nieznacznie przekraczającą stosowany poziom oceny H0-14 dB. Na tej podstawie długość wskazania określona techniką ustalonego poziomu amplitudy wynosi zaledwie 3 mm, natomiast jego maksymalna amplituda ma wartość -11 dB. Oznacza to, że wskazanie podlega ocenie, natomiast nie przekracza ono poziomu rejestracji, a zatem nie zostanie zarejestrowane w protokole badania (patrz rys. A1 normy ISO 19285) i tym samym, nie może zostać zgrupowane ani uwzględnione w skumulowanej długości wskazań akceptowalnych na odcinku lw (patrz p. 10.4 i 10.5 normy ISO 19285).

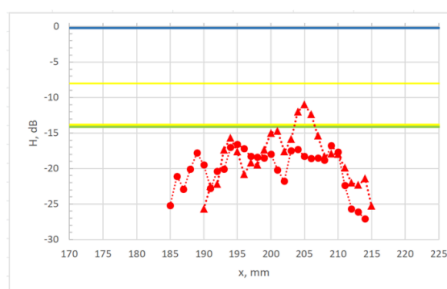
W efekcie przeprowadzonych pomiarów w badaniu PAUT/amp. uzyskano wartości amplitud gniazd pęcherzy zbliżone do wartości uzyskanych w przypadku ręcznych badań ultradźwiękowych PE/DAC. Stanowi to logiczną konsekwencję faktu stosowania w obu badaniach tego samego poziomu odniesienia, w postaci krzywej DAC/TCG wykreślonej z użyciem otworu cylindrycznego SDH o średnicy $\phi 3$ a także braku kierunkowości odbicia wiązki od gniazd pęcherzy.

Podsumowując, pomiary wykazały, że amplituda wskazań na przeważającej części długości analizowanych gniazd pęcherzy utrzymuje się poniżej normatywnego poziomu oceny, wykraczając ponad ten poziom tylko na krótkich fragmentach ich długości (Rys. 10 i 11). Oznacza to, że mimo wyraźnej, wizualnej widoczności wskazań od analizowanych gniazd na obrazach PAUT tylko lokalnie ich amplituda przekroczyła poziom oceny. Tym samym uzyskane zostały krótkie wskazania o niskiej amplitudzie, które nie podlegały rejestracji zgodnie z zapisami normy. Uzyskane wyniki PAUT/amp. są porównywalne do wyników ręcznych badań techniką PE/DAC (Rys. 3 i 4) a pod względem wartości amplitudy w odniesieniu do poziomu oceny również dla PE/DGS (Rys. 5 i 6). Dla pozostałych analizowanych gniazd pęcherzy o oznaczeniu od C do F (patrz Tab. 1) których wyniki zostały zamieszczone w części drugiej artykułu, charakterystyka wskazań zarejestrowana w badaniach PAUT - w tym ich amplituda - była zbliżona do charakterystyki gniazd A i B. Fakt ten potwierdza, że wyniki uzyskanych



Rys. 10. Wyniki pomiarów amplitudy wskazań od gniazda pęcherzy A w badaniu PAUT/amp; oznaczenie punktów: granatowy O – skan 90-2, czerwony O – skan 90-1, granatowy Δ – skan 270-2, czerwony Δ – skan 270-1. Linie w tle wykresu: niebieska – poziom odniesienia H0, zielona – poziom oceny, żółta – poziomy rejestracji zależne od długości wskazań

Fig. 10. Amplitude measurement results from gas pore cluster A in PAUT/amplitude testing; point markers: blue O – 90-2 scan, red O – 90-1 scan, blue Δ – 270-2 scan, red Δ – 270-1 scan. Background graph lines: blue – reference level H0, green – evaluation level, yellow – registration levels dependent on indication length



Rys. 11. Wyniki pomiarów amplitudy wskazań od gniazda pęcherzy B w badaniu PAUT/amp; oznaczenie punktów: czerwony O – skan 90-1, czerwony Δ – skan 270-1. Linie w tle wykresu: niebieska – poziom odniesienia H0, zielona – poziom oceny, żółta – poziomy rejestracji zależne od długości wskazań

Fig. 11. Amplitude measurement results from gas pore cluster B in PAUT/amplitude testing; point markers: red O – 90-1 scan, red Δ – 270-1 scan. Background graph lines: blue – reference level H0, green – evaluation level, yellow – registration levels dependent on indication length

pomiarów są typowe dla gniazd pęcherzy o zbliżonej charakterystyce. Podsumowując, badania radiograficzne RT/DR jednoznacznie potwierdziły występowanie w badanych złączach spawanych nieakceptowalnych gniazd pęcherzy o długości z zakresu od 20 do 40 mm, złożonych głównie z drobnych pęcherzy o średnicy do około 2 mm. Sporadycznie występowały również pęcherze o większych wymiarach.

Badania ręczne techniką PE wykazały, że amplituda echa od gniazd pęcherzy, w obu analizowanych technikach nastawiania poziomu odniesienia (technika 1 i 2), na przeważającej części długości gniazd pęcherzy była niższa od normatywnego poziomu oceny, a jedynie na krótkich fragmentach przekraczała ten poziom (Rys 3, 4, 6). Wskazania osiągające poziom oceny, z powodu niewielkiej długości, nie przekroczyły jednak normatywnego poziomu

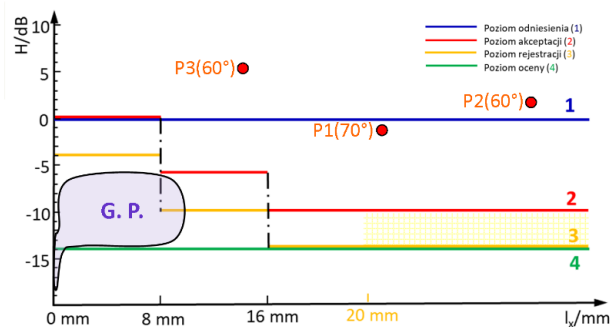
rejestracji, a tym bardziej poziomu akceptacji. W efekcie nie wpłynęły one w żaden sposób na końcową ocenę złącza.

Dla zilustrowania wyników badania ultradźwiękowego w kontekście oceny wskazań w odniesieniu do wymagań normatywnych, na przykładzie złącza o grubości $t = 16$ mm wyniki ewaluacji przedstawiono schematycznie na rysunku (Rys. 12); liniami ciągłymi zaznaczono normatywne poziomy odniesienia i oceny, a także przedstawiono poziomy rejestracji i akceptacji w funkcji długości wskazania l_x . Na wykresie w postaci schematu zaznaczono przybliżony obszar w którym występują amplitudy i długości typowych wskazań pochodzących od dużych gniazd pęcherzy (G.P.). Ponieważ uzyskiwane sygnały albo nie przekraczają poziomu oceny, albo przekraczają go w niewielkim stopniu na bardzo krótkim odcinku, zazwyczaj będą one zlokalizowane poniżej poziomu rejestracji oraz akceptacji, uniemożliwiając skuteczną detekcję gniazd pęcherzy w badaniach w których stosowane są kryteria amplitudowe.

Dla zobrazowania różnic między oceną gniazd pęcherzy oraz innych rodzajów niezgodności spawalniczych, na wykresie w postaci czerwonych punktów pokazano wskazania uzyskane w badaniu PE/DAC dla trzech nieciągłości płaskich wygenerowanych w próbce A: jednego pęknięcia P1 oraz dwóch przyklejeń brzegowych P2 i P3 (patrz Tab. 1 i 2). Nieciągłości te wykazują bardzo wysoką amplitudę wskazań przekraczającą stosowany poziom oceny o około 6 do 20 dB. Skutkuje to znacznym przekroczeniem poziomu akceptacji (linia czerwona) i tym samym, brakiem akceptacji złącza już w pierwszej fazie oceny dotyczącej indywidualnych wskazań, bez konieczności sprawdzania warunku skumulowanej długości wskazań akceptowalnych na odcinku l_w .

W celu zaprezentowania przybliżonych wymiarów przywołanych powyżej nieciągłości na rysunku (Rys. 13) pokazano wynik badania TOFD obrazujący wskazania od nieciągłości płaskich P1, P2, P3 a także gniazda pęcherzy A. Zauważmy, że wskazanie P3 pochodzące od bardzo krótkiej nieciągłości (o wymiarach akceptowalnych w badaniu TOFD) przy zastosowaniu kryteriów amplitudowych w PE/DAC jest ewidentnie nieakceptowalne, natomiast znacząco większe wskazanie od gniazda pęcherzy A nie będzie podlegało rejestracji zarówno w badaniu PAUT/amp., PE/DAC jak i PE/DGS.

Amplituda wskazań od gniazd pęcherzy zarejestrowana w badaniu PAUT/amp. była zbliżona do amplitudy uzyskanej w badaniach przeprowadzonych techniką PE/DAC i na przeważającej części długości gniazda amplituda mieściła się poniżej poziomu oceny. Nawet jeśli poziom oceny był przekroczony, miało to charakter lokalny i nie dotyczyło całej długości gniazda. W efekcie występowała sytuacja, gdzie wskazania, chociaż jednoznacznie widoczne na obrazowaniach graficznych PAUT, podlegały ocenie tylko na niewielkich fragmentach długości występującego gniazda. W rezultacie, zastosowanie kryteriów oceny bazujących na długości i amplitudzie wskazań zgodnie z ISO 19285 skutkowało akceptacją wskazań od tych nieciągłości, a także brakiem ich rejestracji w protokole badania.



Rys. 12. Kryteria amplitudowe dla poziomu akceptacji 2 zgodnie z ISO 11666 oraz ISO 19286 (technika 1, grubość $t = 16$ mm): kolor linii: niebieski – poziom odniesienia H0, zielony – poziom oceny, czerwony – poziom akceptacji. P1, P2, P3 – amplituda wskazań od nieciągłości płaskich, GP – obszar typowych wskazań od gniazd pęcherzy

Fig. 12. Amplitude criteria for acceptance level 2 according to ISO 11666 and ISO 19286 (technique 1, thickness $t = 16$ mm): line color: blue – reference level H0, green – evaluation level, red – acceptance level. P1, P2, P3 – indication amplitude from flat discontinuities, GP – area of typical indications from porosity clusters

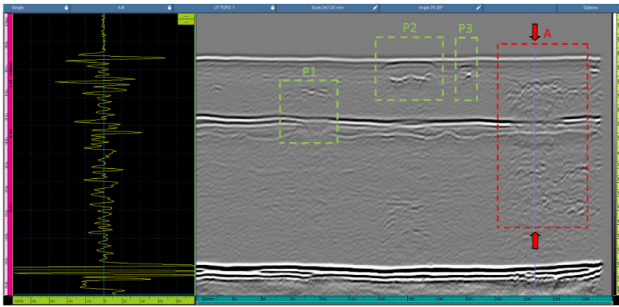
Tab. 2. Wyniki badań PE/DAC złącza spawanego zawierającego nieciągłości płaskie (P1, P2, P3) z użyciem głowic o kątach 60 i 70 stopni

Tab. 2. Results of PE/DAC testing of a welded joint containing flat discontinuities (P1, P2, P3) using probes with angles of 60° and 70°

Oznaczenie nieciągłości	Rodzaj niezgodności	Kąt wiązki / pozycja	Początek wskazania x_p [mm]	Koniec wskazania x_k [mm]	Długość wskazania l_x [mm]	Amplituda H [dB]
P1	pęknięcie	60°/A	91	112	21	-1,0
		70°/A	89	112	23	-0,7
P2	przyklejenie brzegowe	60°/A	145	178	29	2,3
		70°/A	150	183	33	1,5
P3	przyklejenie brzegowe	60°/A	198	212	14	5,5
		70°/A	200	209	9	-8,2

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wykrywalność nawet dużych gniazd pęcherzy w konwencjonalnych badaniach ultradźwiękowych techniką PE, wykonywanych zgodnie z wymaganiami norm ISO 17640 oraz ISO 11666 jest niska. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku badań PAUT opartych na kryteriach amplitudowych. Sferyczne kształty pęcherzy i wynikająca z nich zdolność do rozpraszania wiązki ultradźwiękowej, skutkują niską amplitudą sygnałów odbitych. Prowadzi to do ograniczonej wykrywalności gniazd pęcherzy. W efekcie uzyskiwane wyniki badań PAUT z oceną bazującą na długości i amplitudzie wskazań są zbliżone do wyników



Rys. 13. Wynik badania TOFD złącza A z nieciągłościami płaskimi (P1, P2, P3) oraz gniazdem pęcherzy o oznaczeniu A. Pokazane zobrazowanie A-skan pochodzi z długości $x = 247$ mm

Fig. 13. TOFD examination result of joint A with planar defects (P1, P2, P3) and gas pore cluster A. The shown A-scan image is from position $x = 247$ mm

uzyskiwanych w ręcznych badaniach ultradźwiękowych techniką PE. Ocena wskazań różni się przy tym w stosunku do oceny w badaniach radiograficznych, w których nieciągłości tego typu są łatwo wykrywalne i surowo oceniane.

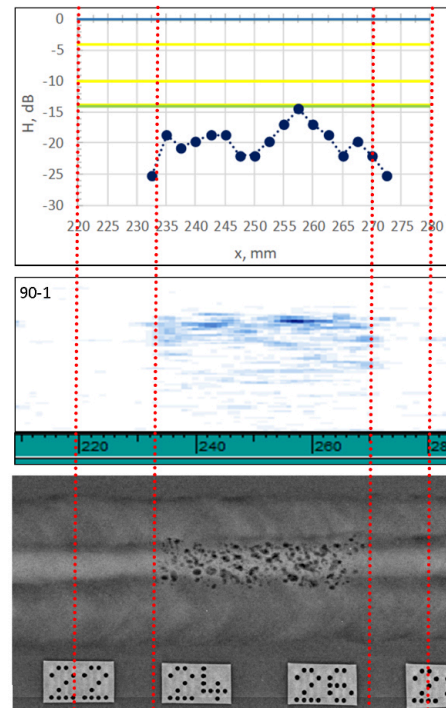
Wyniki pomiaru amplitudy na długości złącza zweryfikowano również na innych gniazdach pęcherzy opisanych w części 2 artykułu, uzyskując w większości wyniki zbliżone do przedstawionych na rysunkach (Rys. 3 do 6).

Należy zwrócić również uwagę na możliwość współistnienia gniazd pęcherzy łącznie z nieciągłościami płaskimi, najczęściej przyklejeniami brzegowymi. Taka sytuacja zmienia całkowicie charakter wskazań z niskoamplitudowych, charakterystycznych dla gniazd pęcherzy, na wskazania wysokoamplitudowe, charakterystyczne dla przyklejeń. Wówczas to nie gniazdo pęcherzy, a współwystępujące z nim przyklejenie w istocie zostaje wykryte w badaniach ultradźwiękowych. W niniejszej części artykułu nie podejmowano tego zagadnienia, skupiono się natomiast na przypadkach gniazd pęcherzy bez współwystępujących przyklejeń.

Niezależnie od wyżej opisanej sytuacji, gniazda pęcherzy są widoczne na uzyskanych zobrazowaniach PAUT. Niestety niewielka długość wskazań i ich niska amplituda powodują, że gniazda pęcherzy bez współistniejących innych nieciągłości płaskich, zazwyczaj nie przekraczają normatywnego poziomu rejestracji. Oznacza to, że w praktyce są one w tych przypadkach w pełni akceptowalne zgodnie z zapisami norm ISO.

Podsumowując, badania przedstawione w artykule dotyczą wykrywalności gniazd pęcherzy bez towarzyszących im nieciągłości innego rodzaju, w złączach o grubości 10-16 mm, ze stali niestopowej. Dla tych założeń na podstawie powyższych analiz można wysnuć następujące wnioski

- wykrywalność gniazd pęcherzy w konwencjonalnych badaniach ultradźwiękowych PE przeprowadzanych zgodnie z wymaganiami ISO 17640 oraz ISO 11666 jest niska. Niezależnie którą techniką nastawiania poziomu



Rys. 14. Zestawienie wyników badania PAUT/amp. (wykres amplitudy i zobrazowanie B-skan z pozycji 90-1) oraz badania RT-DR w miejscu występowania gniazda pęcherzy A

Fig. 14. Comparison of PAUT/amp. results (amplitude plot and B-scan image from position 90-1) and RT-DR examination at the location of gas pore cluster A

odniesienia zastosowano w badaniu PE (technika 1 czy 2 wg ISO 17640) wskazania od gniazd pęcherzy wykazywały amplitudę tylko miejscowo przekraczającą normatywny poziom oceny, co w efekcie obok niskiej amplitudy skutkuje również ich małą długością mierzoną zgodnie z ISO 11666. Stąd wskazania te nie przekraczają nawet poziomu rejestracji. Fakt ten uniemożliwia zaostrenie ich oceny w wyniku grupowania wskazań, jak również wyklucza ich uwzględnienie w skumulowanej długości wskazań akceptowalnych wg wytycznych ISO 11666;

- wykrywalność gniazd pęcherzy w badaniach ultradźwiękowych techniką PAUT przeprowadzanych zgodnie z wymaganiami ISO 13588 oraz ISO 19285 z zastosowaniem kryteriów oceny opartych na długości i amplitudzie wskazań wg punktu 6b normy ISO 19285 jest niska. Przyczyny tego faktu są tożsame jak w przypadku badań ultradźwiękowych techniką PE;
- zastosowanie badań ultradźwiękowych techniką PAUT z zastosowaniem kryteriów akceptacji bazujących na amplitudzie i długości wskazań skutkuje wynikiem oceny zbliżonym do uzyskiwanego w badaniach techniką PE, co zapewnia podobne rezultaty przy ocenie gniazd pęcherzy. W obydwu przypadkach wykrywalność gniazd pęcherzy jest jednak niska;
- przedstawione wyniki badań PE i PAUT nie wykazują spójności z wynikami badań radiograficznych co wynika z dużej różnicy w czułości tych technik w zakresie wykrywania nieciągłości przestrzennych w postaci gniazd pęcherzy.

5. Literatura

- [1] P. Cawley, "Ultrasonic Measurements for NDT," *NDT & E International*, vol. 44, 2011.
- [2] R. Kaczmarek, „Kryteria wykrywalności przyklejeń brzegowych w badaniach ultradźwiękowych złączy spawanych techniką Phased Array,” *Rozprawa doktorska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska*, 2019.
- [3] J. Zhang, T. Barber, A. Nixon, P. Wilcox, "Investigation into Distinguishing between Small Volumetric and Crack-like Defects Using Multi-view Total Focusing Method Images," *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 61, no. 6, 2019, pp. 320-326.
- [4] J. Krautkrämer, H. Krautkrämer, *Ultrasonic Testing of Materials*, Berlin: Springer-Verlag, 1990.
- [5] S. Won, S. Lim, I. Jeong, H. Lee, "Phased Array Ultrasonic Testing for Inspection of LNG Storage Tank," *NDT & E International*, vol. 46, 2019, pp. 66-73.
- [6] E. Ginzel, "Phased Array Ultrasonic Technology," *Eclipse Scientific*, 2012.
- [7] R.D. Thompson, *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications*, ASNT Press, 2013.
- [8] G. Dobie, S.G. Pierce, G. Hayward, "Flexible ultrasonic phased array inspection of aerospace components," *Ultrasonics*, vol. 48, 2008, pp. 560-568.
- [9] R. Kaczmarek, K. Kaczmarek, "Ocena wyników badań złączy spawanych techniką phased array wg PN-EN ISO 19285," *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 90, no. 2, pp. 10-15, 2018.
- [10] 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, pp. 60-66.
- [11] S. Zhang, M. Drinkwater, P. Wilcox, "Efficient total focusing method for ultrasonic non-destructive testing," *NDT & E International*, vol. 43, pp. 542-551, 2010.
- [12] 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, pp. 265-274.
- [13] E. Ginzel, "Ultrasonic Time of Flight Diffraction," *Ontario*, 2013.
- [14] Y. Xiang, M. Cherfaoui, "Phase Coherence Imaging Applied to Ultrasonic Nondestructive Testing," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 65, no. 2, pp. 299-310, 2018.
- [15] 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, no. 3, 2018.
- [16] 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, pp. 30-40.
- [17] J.P. Charlesworth, J.A. Temple, *Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction*, Research Studies Press, Baldock, 2001.
- [18] R. Kaczmarek, K. Kaczmarek, J. Ślania, "Zalety symultanicznych badań ultradźwiękowych techniką Phased Array i TOFD złączy spawanych," *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 89, nr 4, 2017.