

## Nieniszczące badania ultradźwiękowe złączy spawanych z wykorzystaniem technologii *phased array*

### Non-destructive ultrasonic testing of welded joints using Phased Array technology

Dorota Kluk

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** W artykule przedstawiono metodę badania złączy spawanych przy użyciu cyfrowego defektoskopu OmniScan X3 firmy Olympus oraz dedykowanej sondy PA, umożliwiającej precyzyjne obrazowanie wewnętrznej struktury spoiny i wykrywanie nieciągłości materiałowych. Szczegółowo opisano proces przygotowania próbek, obejmujący ich oczyszczenie, oznaczenie stref pomiarowych oraz dobór odpowiedniej geometrii złącza do badań ultradźwiękowych. Omówiono także dobór parametrów skanowania, takich jak zakres kątowy, głębokość ogniskowania, krok przesuwu i konfiguracja apertury aktywnej, dostosowanych do rodzaju spoiny i oczekiwanej rozdzielczości pomiarowej. Dodatkowo przedstawiono procedury kalibracji układu pomiarowego, obejmujące ustawienia ogniskowania, korekcję prędkości i czułości, a także weryfikację poprawności ścieżki wiązki ultradźwiękowej, co zapewnia wysoką wiarygodność i powtarzalność uzyskiwanych wyników diagnostycznych. W kolejnym etapie przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych na wzorcowych blokach kalibracyjnych wykonanych ze stali węglowej, wyposażonych w standardowe wady referencyjne umożliwiające ocenę parametrów pracy układu PA. Dokonano oceny jakości uzyskanych obrazów ultradźwiękowych, analizując rozdzielczość, stosunek sygnału do szumu, dokładność odwzorowania geometrii reflektorów oraz zdolność detekcji i charakterystykę wskazań. Kalibracja układu pomiarowego defektoskopu i sondy PA posłużyła następnie do wykonania badań złączy rur poeksploatacyjnych, z uwzględnieniem zróżnicowanych własności materiałowych, obecności degradacji eksploatacyjnych oraz geometrii spoin. Zaprezentowano interpretację uzyskanych wyników, identyfikując wykryte nieciągłości, ich lokalizację oraz potencjalny wpływ na integralność konstrukcji. Otrzymane rezultaty potwierdzają wysoką skuteczność technologii *phased array* w diagnostyce złączy spawanych, zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i podczas badań elementów poeksploatacyjnych. Zrealizowany zakres prac pozwolił na wdrożenie systemu inspekcyjnego wykorzystującego technologię *phased array*, umożliwiającego szczegółowe mapowanie spoin oraz obszarów korozji w elementach konstrukcji przemysłowych. Dzięki temu rozwiązaniu możliwe jest skuteczniejsze wykrywanie trudno dostrzegalnych nieciągłości wewnętrznych materiałów, co znacząco zwiększa bezpieczeństwo eksploatacji i umożliwia precyzyjną ocenę stanu technicznego badanych komponentów.

**Słowa kluczowe:** defektoskop OmniScan X3, sonda *phased array*, spoiny.

**ABSTRACT:** This article presents a method for testing welded joints using the Olympus OmniScan X3 digital flaw detector and a dedicated Phased Array (PA) probe, enabling precise imaging of the internal structure of welds and the detection of material discontinuities. The sample preparation process is described in detail, including cleaning, marking measurement zones, and selecting the appropriate joint geometry for ultrasonic testing. The selection of scanning parameters, such as angular range, focal depth, step size, and active aperture configuration, tailored to the type of weld and the desired measurement resolution, is also discussed. In addition, procedures for calibrating the measurement system are presented, including focal settings, velocity and sensitivity correction, and verification of the ultrasonic beam path, ensuring high reliability and repeatability of the diagnostic results. In the next stage, the results of laboratory tests conducted on reference calibration blocks made of carbon steel and equipped with standard reference defects for evaluating PA system performance are presented. The quality of the ultrasonic images obtained was assessed by analyzing resolution, signal-to-noise ratio, accuracy of reflector geometry representation, detection capability, and characteristic responses. The calibrated flaw detector and PA probe were then used to test welded joints of in-service pipes, taking into account diverse material properties, the presence of operational degradation, and weld geometry. The interpretation of the results obtained is presented, identifying detected discontinuities, their location, and their potential impact on structural integrity. The results confirm the high effectiveness of Phased Array technology in welded joint diagnostics, both under laboratory conditions and during the testing of in-service components. The completed scope of work enabled the implementation of an inspection system using Phased Array technology, allowing detailed mapping of welds and corrosion areas in industrial structural components. This solution facilitates more effective detection of difficult-to-identify internal material discontinuities, significantly enhancing operational safety and enabling precise assessment of the technical condition of the inspected components.

**Keywords:** OmniScan X3 flaw detector, Phased Array sensor, welds.

Autor do korespondencji: D. Kluk, e-mail: [kluk@inig.pl](mailto:kluk@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji: 06.05.2025 r. Zatwierdzono do druku: 15.06.2026 r.

## Wprowadzenie

Współczesny sektor konstrukcji stalowych dla przemysłu petrochemicznego w znacznym stopniu opiera się na trwałych i niezawodnych połączeniach elementów, w tym połączeniach spawanych. Zapewnienie ich jakości oraz bezpieczeństwa eksploatacyjnego stanowi jedno z głównych wyzwań inżynierii materiałowej i technologii wytwarzania, zwłaszcza w warunkach pracy instalacji petrochemicznych, w przypadku których wymagania dotyczące szczelności i integralności są szczególnie wysokie. W tym kontekście nieocenioną rolę odgrywają metody badań nieniszczących (ang. *nondestructive testing*, NDT), a wśród nich badania ultradźwiękowe, zwłaszcza ich zaawansowana odmiana oparta na technologii *phased array* (ang. *phased array ultrasonic testing*, PAUT) (Yi i Yun, 1998; Deepak i in., 2021; Shaloo i in., 2022; Kluk, 2025).

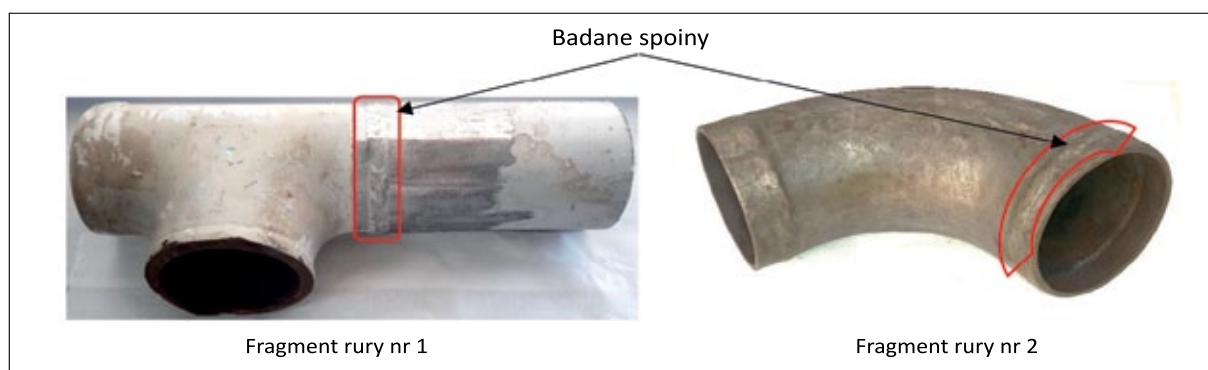
Badania ultradźwiękowe umożliwiają ocenę objętościową materiału, pozwalając na wykrywanie defektów wewnętrznych, takich jak pęknięcia, braki przetopu, niezgodności objętościowe (np. pory, nadtopienia), wtrącenia niemetaliczne czy nieprawidłowości geometryczne (Grzyb i in., 2022; Rawicki i in., 2024). W porównaniu z klasyczną techniką UT technologia PAUT oferuje znacznie większe możliwości diagnostyczne dzięki elektronicznemu sterowaniu wiązką ultradźwiękową. Pozwala to na precyzyjne ogniskowanie, dynamiczną zmianę kąta propagacji oraz skanowanie objętości złącza bez konieczności mechanicznego przemieszczania głowicy (Taheri i Hassen, 2019; Uzun i Gustiani, 2024). Wykorzystanie wielu niezależnie sterowanych elementów piezoelektrycznych umożliwia kształtowanie frontu fali (tzw. *beam steering* i *beam focusing*), a także skupianie jej energii w wybranym punkcie badanego obiektu, co zwiększa rozdzielczość przestrzenną i czułość detekcji (Wooh i Shi, 1998; Schmerr, 2015).

Elastyczność i zaawansowane możliwości obrazowania techniki PAUT umożliwiają uzyskiwanie przekrojów B-scan, skanów sektorowych S-scan oraz – przy odpowiednim oprogramowaniu – rekonstrukcji przestrzennych 3D (Arunprasath

i in., 2023; Evans i in. 2024). Takie podejście pozwala na szczegółową analizę kształtu, orientacji, rozmiaru oraz położenia wykrytych nieciągłości, co ułatwia podejmowanie decyzji dotyczących kwalifikacji złączy spawanych. W wielu zastosowaniach PAUT stanowi nowoczesną i bezpieczniejszą alternatywę dla przemysłowej radiografii (Rana i in., 2001; Alonso i in., 2022; Herceg i in., 2023). Technologia ta znajduje również zastosowanie w branży gazowniczej. Wynika to z rozporządzenia Ministra Gospodarki z 2013 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać sieci gazowe (Dz.U. z 2013 r. poz. 640), zgodnie z którym: „W przypadku gazociągów o maksymalnym ciśnieniu roboczym powyżej 1,6 MPa należy wykonać badania nieniszczące radiograficzne (RT) lub ultradźwiękowe (UT)”. Ponadto podczas eksploatacji gazociągów zaleca się okresową kontrolę jakości spawów z wykorzystaniem inteligentnych tłoków diagnostycznych.

W literaturze fachowej podkreśla się, że skuteczność badań PAUT w decydującym stopniu zależy od właściwej konfiguracji parametrów inspekcji, obejmujących m.in. zakres i charakterystykę kątów odchylenia wiązki, dobór odpowiedniego typu i apertury przetwornika, częstotliwość roboczą oraz głębokość ogniskowania (Kim i in., 2021; Siljama i in., 2021). Równie istotna jest dokładna znajomość właściwości falowych badanego materiału, takich jak prędkości propagacji, anizotropia czy tłumienie, a także precyzyjne odwzorowanie geometrii złącza spawanego w modelu używanym do konfiguracji aparatury. Główną rolę odgrywa ponadto poprawna kalibracja systemu pomiarowego, obejmująca m.in. ustawienie krzywej wzmocnienia (TCG), kontrolę czułości oraz stosowanie odpowiednich procedur referencyjnych, zgodnych z wymaganiami normatywnymi (Qiao i in., 2022; Mohd i Echtermeyer, 2024).

W artykule przedstawiono praktyczne zastosowanie technologii PAUT w badaniach nieniszczących spoin z wykorzystaniem defektoskopu OmniScan X3 wyposażonego w głowicę *phased array*. Zaprezentowane wyniki pokazują potencjał tej metody w diagnostyce złączy spawanych, wspierając proces oceny ich jakości.



**Rysunek 1.** Wylądzone z eksploatacji fragmenty zespawanych rur pochodzące z rurociągu, którym transportowano płyny złożowe  
**Figure 1.** Decommissioned sections of welded pipes from the pipeline used to transport reservoir fluids

### Materiał i metodyka badawcza

Materiał badawczy stanowiły złącza spawane doczołowo z pełnym przetopem, wykonane na rurach ze stali węglowej o średnicach zewnętrznych:

- Ø 115 mm i grubości ścianki 10 mm (rysunek 1, fragment rury 1);
- Ø 115 mm i grubości ścianki 5 mm (rysunek 1, fragment rury 2).

Przedstawione na rysunku 1 fragmenty rur zostały pozyskane z instalacji wyłączonej z eksploatacji, którymi transportowano płyny złożowe wydobywane ze złoża.

### Zastosowany sprzęt pomiarowy

Badania obrazowania spójności fazowej spoin wykonano z wykorzystaniem defektoskopu OmniScan X3 (rysunek 2), wyposażonego w głowicę wieloelementową typu 5L32-19-2X10-A31-P-2.5-OM zamontowaną na klinie SA31-N55S (rysunek 3). Klin SA31-N55S jest przeznaczony dla sondy



Rysunek 2. Defektoskop OmniScan X3

Figure 2. OmniScan X3 flaw detector



Rysunek 3. Głowica: Array, 5L32-19-2X10-A31-P-2.5-OM:

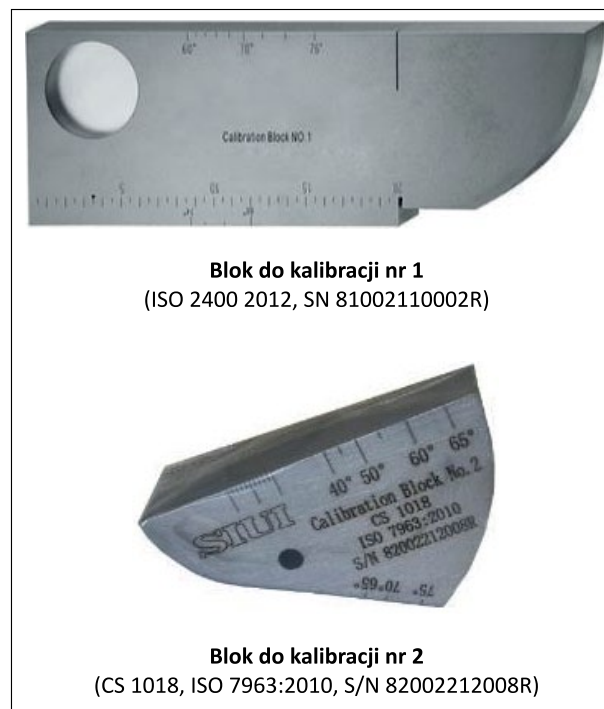
5L – częstotliwość: 5 MHz, fala podłużna; 32 – liczba elementów: 32; 19-2X10 – wymiary aktywnego obszaru: 19 mm × 2 × 10 mm (2 rzędy po 10 mm szerokości); A31 – typ złącza (Olympus, A31); P – Phased Array; 2.5 pitch – rozstaw elementów: 2.5 mm; OM – Olympus

Figure 3. Phased Array Ultrasound Transducer, 5L32-19-2X10-A31-P-2.5-OM. 5L – frequency:

5 MHz, longitudinal wave; 32 – number of elements: 32; 19-2X10 – active aperture dimensions: 19 × 2 × 10 mm (two rows, each 10 mm wide); A31 – connector type (Olympus, A31); P – Phased Array; 2.5 – pitch (element spacing): 2.5 mm; OM – Olympus

typu A31 z kątem refrakcji 55° i możliwością stosowania w zakresach kątów od 40° do 70°.

Do przeprowadzenia kalibracji defektoskopu OmniScan X3 i sondy PA 5L32-19-2X10-A31-P-2.5-OM na klinie SA31-N55S wykorzystano bloki kalibracyjne przedstawione na rysunku 4. Wykonane są one z tego samego materiału co element poddawany inspekcji.



Rysunek 4. Bloki kalibracyjne

Figure 4. Calibration blocks

Metodyka pomiaru defektów i nieciągłości materiałów ultradźwiękowym defektoskopem OmniScan X3 wymaga postępowania wg schematu:

#### I. Przygotowanie do pomiaru

1. Wybór sondy ultradźwiękowej w zależności od rodzaju badanego materiału i charakteru wykrywanych defektów, podłączenie jej do defektoskopu OmniScan X3 i skonfigurowanie z urządzeniem;
2. Wykonanie planu pomiaru;
3. Przeprowadzenie kalibracji urządzenia:
  - a) kalibracja prędkości fali ultradźwiękowej w materiale,

- b) kalibracja zasięgu (mapa akustycznego wpływu) i wzmocnienia,
- c) ustawienie czułości detekcji.

**II. Przygotowanie próbek**

- 4. Oczyszczenie badanej powierzchni w celu zapewnienia dobrego sprzężenia ultradźwiękowego;
- 5. Nałożenie żelu sprzęgającego na powierzchnię materiału w celu zminimalizowania straty sygnału ultradźwiękowego.

**III. Wykonywanie pomiarów**

- 6. Ustawienia parametrów pomiarowych: częstotliwości ultradźwięków, kąta nachylenia sondy oraz głębokości penetracji, a następnie przeprowadzenie skanowania materiału, monitorując wyniki na ekranie OmniScan X3 w czasie rzeczywistym;
- 7. Identyfikacja i zlokalizowanie defektów.

**IV. Omówienie wyników przeprowadzonych pomiarów**

**Badania defektoskopowe metalowych materiałów poeksploatacyjnych**

Po przeprowadzeniu kalibracji poszczególnych parametrów defektoskopu OmniScan X3 wyposażonego w głowicę *phased array* wykonano pomiar defektów osadzonych w blokach

kalibracyjnych. Badanie powadzono przy prędkości dźwięku 5920 m/s dla fali podłużnej i 3250 m/s dla fali poprzecznej, co odpowiada prędkości rozchodzenia się dźwięku w stali węglowej (Poradnik fizykochemiczny, 1974).

Badanie defektów w blokach kalibracyjnych wykonano w celu sprawdzenia poprawności wykonanych kalibracji. Na rysunku 5 zobrazowano położenie szczytu maksymalnej amplitudy w bramce.

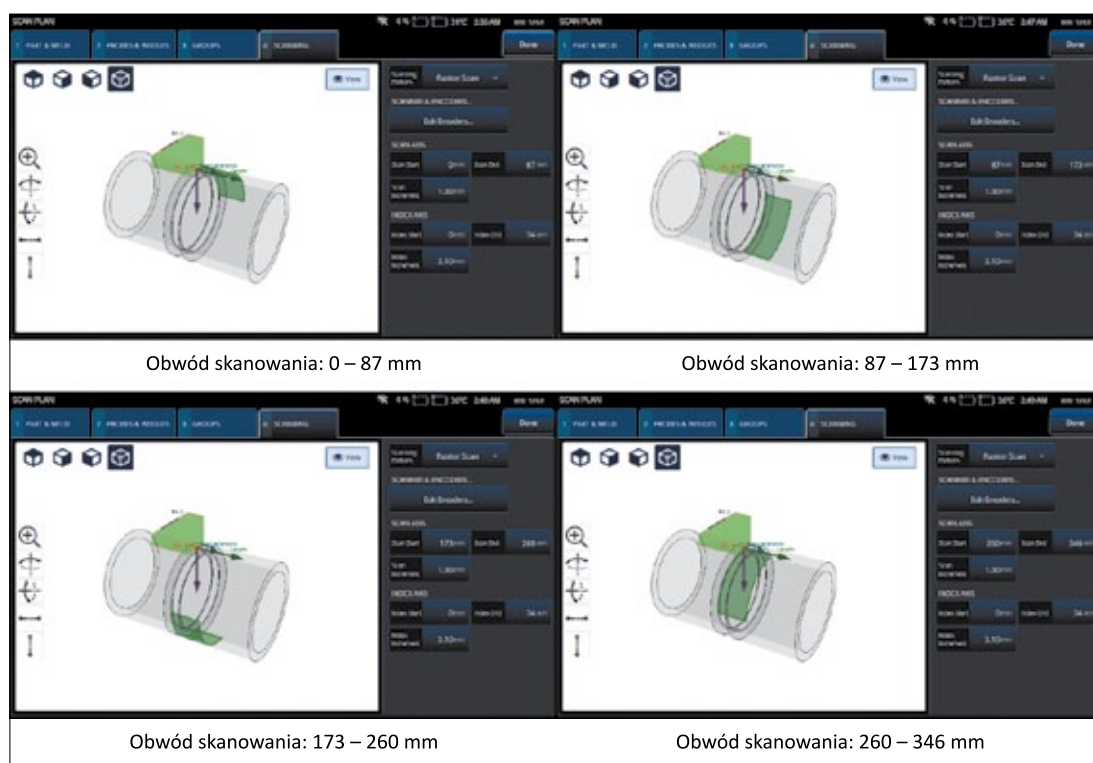
Po przeprowadzeniu kalibracji defektoskopu z przypisaną sondą PA wykonano plan skanowania rzeczywistych elementów (rysunek 1). Efektem wykonanych prac było uzyskanie obszaru skanowania spoiny obwodowej wykonanej na obwodzie rury. W celu zapewnienia odpowiedniej jakości i powtarzalności pomiarów obwód rury podzielono na cztery odcinki pomiarowe, które następnie przebadano oddzielnie. Długości obwodów skanowania poszczególnych odcinków wynosiły: 0–87 mm, 87–173 mm, 173–260 mm oraz 260–346 mm. Ich graficzne przedstawienie zamieszczono na rysunku 6. Fragmentacja długości skanowania została zastosowana dla obu badanych rur ze spoinami obwodowymi (fragmenty rur 1 i 2 – rysunek 1).

Na rysunkach 7 i 10 zilustrowano obrazy B-scanów badanych odcinków rur 1 i 2. Dzięki skali na osiach OX i OY w milimetrach, wskazujących odległość od sondy, można oszacować głębokość i przybliżone położenie źródła sygnału, co pozwala na ocenę jego pochodzenia.



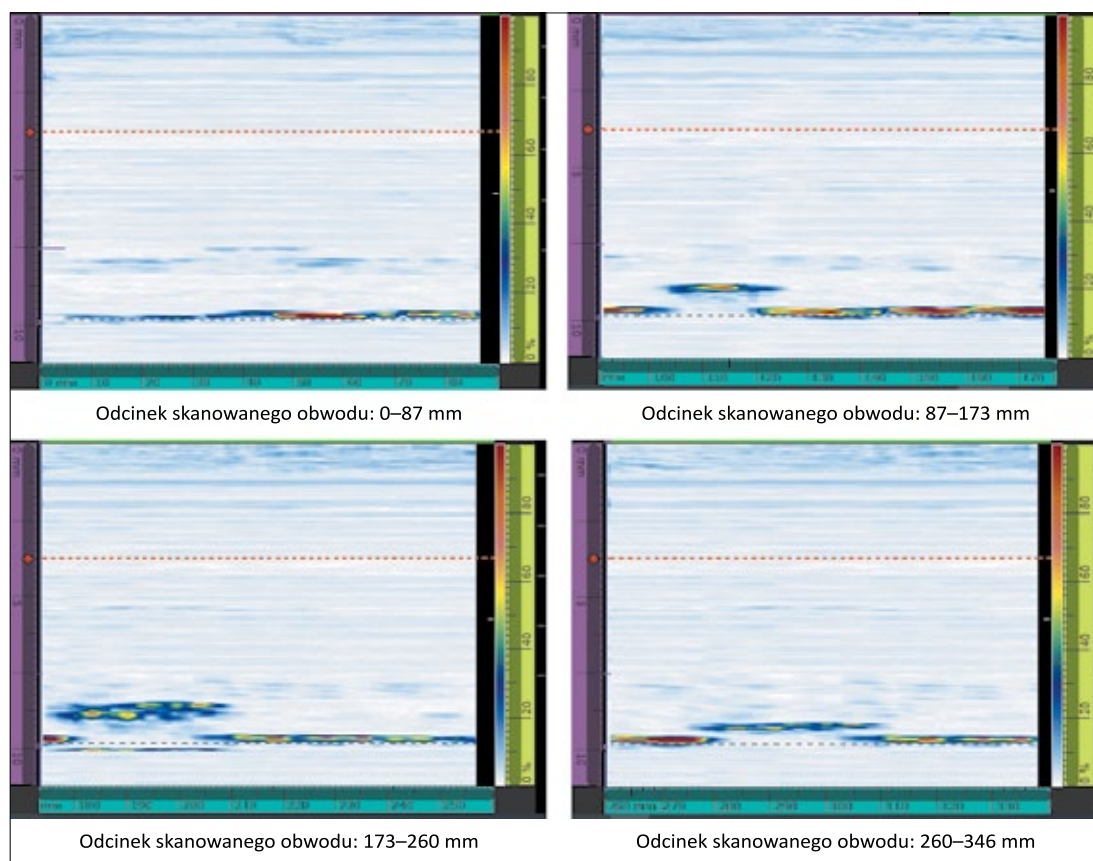
Rysunek 5. Obraz defektoskopu podczas kalibracji opóźnienia klina oraz regulacji wzmocnienia

Figure 5. Defectoscope display during wedge delay calibration and gain adjustment



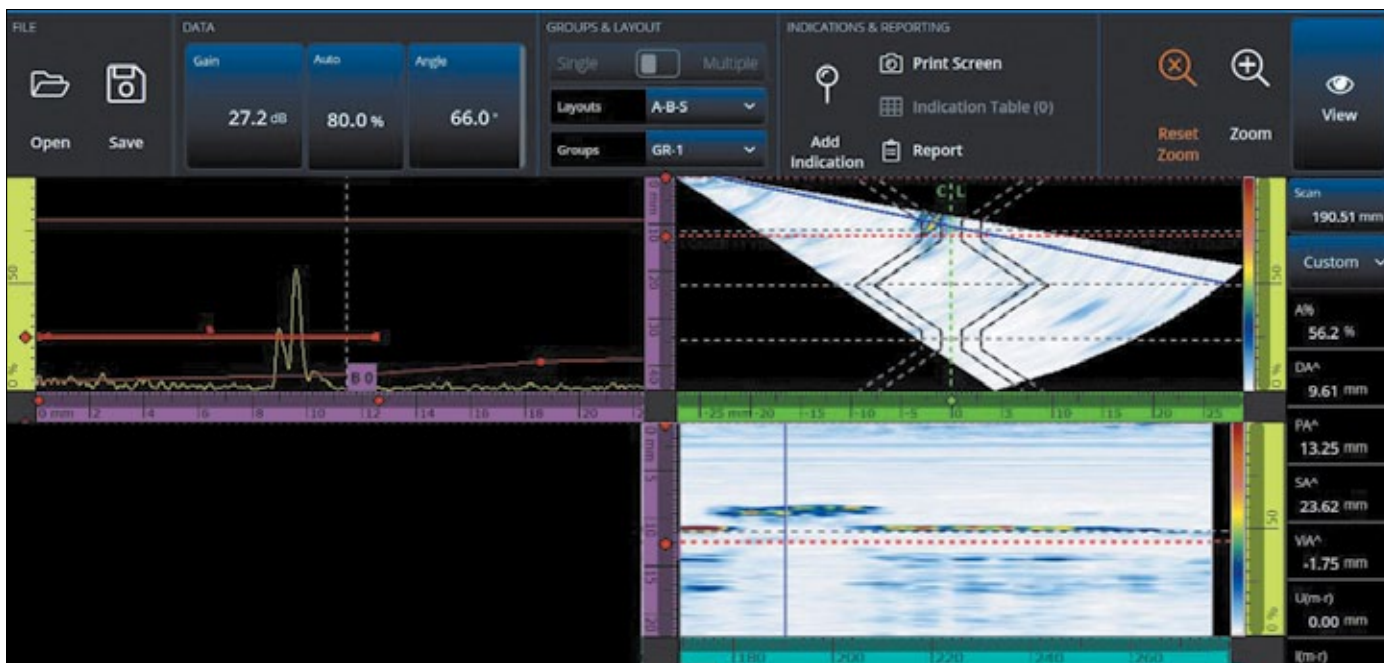
**Rysunek 6.** Interfejs defektoskopu OmniScan X3 podczas planowania skanowania – wybór skanowanych odcinków: spoina obwodowa wykonana na obwodzie rury

**Figure 6.** OmniScan X3 defectoscope interface during scan planning – selection of scanned sections: circumferential weld performed around the pipe circumference

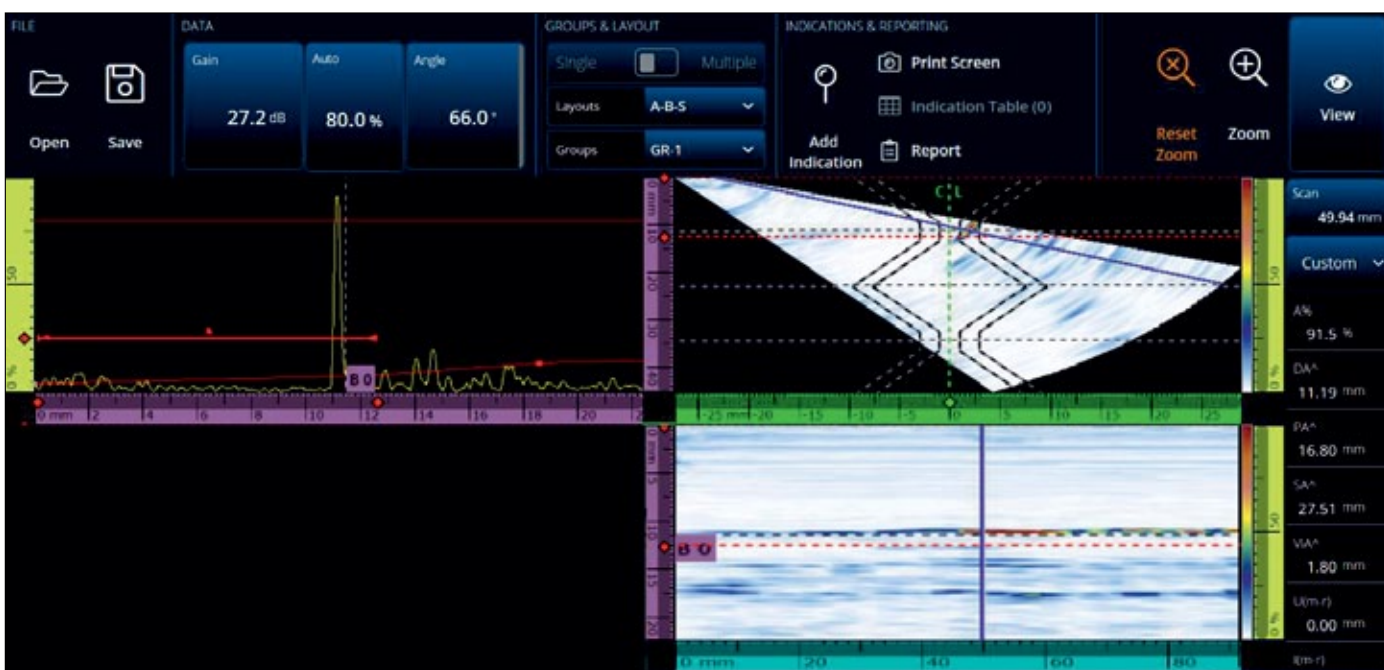


**Rysunek 7.** B-scan'y skanowanych fragmentów rury 1

**Figure 7.** B-scans of the scanned sections of pipe No. 1



**Rysunek 8.** Badanie defektoskopowe fragmentu rury 1 (A-, B- i S-scany) – defekt przy grani spoiny  
**Figure 8.** Defectoscopic examination of a section of pipe No. 1 (A-, B-, and S-scans) – defect at the weld root



**Rysunek 9.** Badanie defektoskopowe fragmentu rury 1 (A-, B- i S-scany) – defekt na dnie spoiny  
**Figure 9.** Defectoscopic examination of a section of pipe No. 1 (A-, B-, and S-scans) – defect at the bottom of the weld

Parametry prowadzenia badań defektoskopowych:

Fragment rury 1:

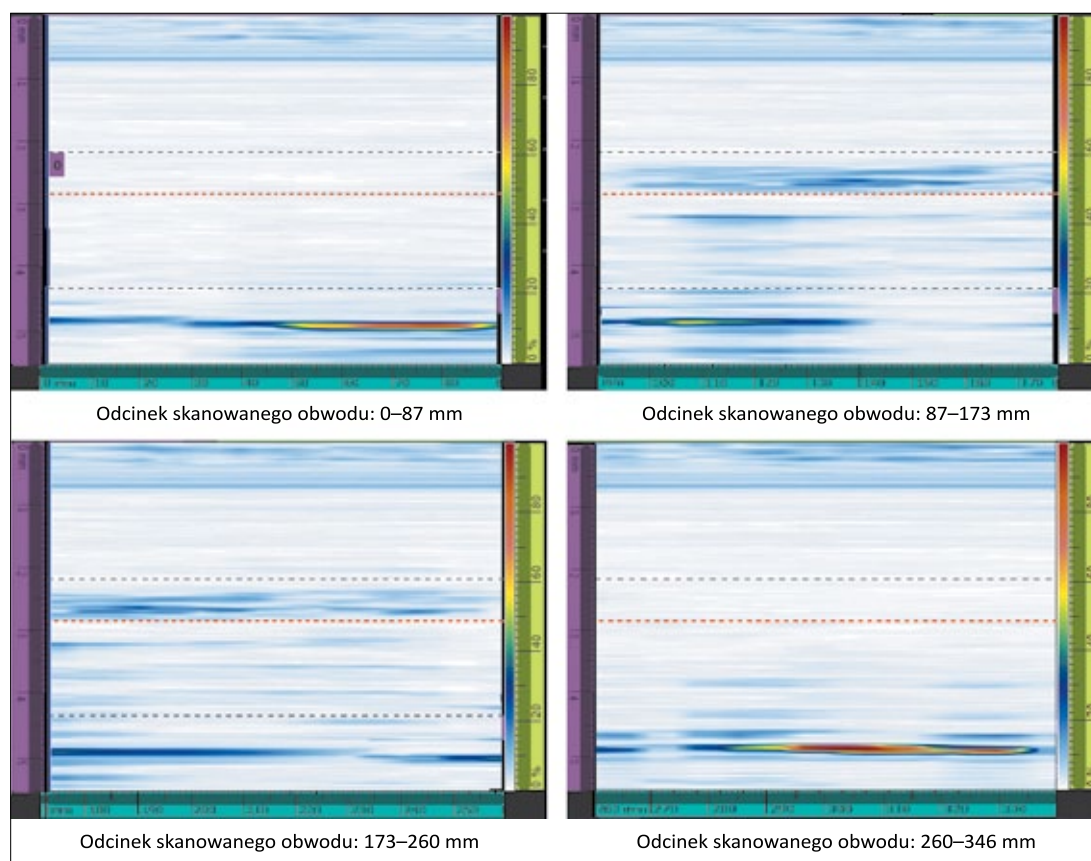
- a) rodzaj materiału: stal węglowa;
- b) wymiary rury: średnica zewnętrzna  $\varnothing$  110 mm, grubość ścianki: 10 mm;
- c) częstotliwość ultradźwięków: 10–40 dB;
- d) rodzaj skanowania: sektorowe;
- e) rodzaj fal: poprzeczne;

f) kąt nachylenia sondy:  $66^\circ$ ;

g) głębokości penetracji: 0–10 mm.

Fragment rury 2:

- a) rodzaj materiału: stal węglowa;
- b) wymiary rury: średnica zewnętrzna  $\varnothing$  110 mm, grubość ścianki: 5 mm;
- c) częstotliwość ultradźwięków: 10–40 dB;
- d) rodzaj skanowania: sektorowe;



**Rysunek 10.** B-scany skanowanych fragmentów rury 2

**Figure 10.** B-scans of the scanned sections of pipe No. 2

- e) rodzaj fal: poprzeczne;
- f) kąt nachylenia sondy: 45°;
- g) głębokości penetracji: 0–5 mm.

Po wykonaniu badań defektoskopowych wybrane echa z każdej akwizycji danych zostały zdigitalizowane i zapisane w pamięci urządzenia. Dane te są następnie przetwarzane za pomocą cyfrowych filtrów pasmowych w celu optymalizacji stosunku sygnału do szumu. W razie potrzeby stosowane jest wzmocnienie różnicowane w czasie (ang. *time varied gain*, TVG). Dodatkowo funkcja czasowej korekty wzmocnienia (ang. *time-corrected gain*, TCG) umożliwia zwiększenie wzmocnienia sygnału w zależności od czasu, jaki potrzebuje echo, by powrócić do sondy. W efekcie szczyty echa (pochodzące od wad o tej samej wielkości) pojawiają się na tej samej wysokości ekranu, niezależnie od ich położenia w badanym elemencie. TCG wykorzystuje podobne zasady co funkcja DAC (ang. *distance-amplitude correction*), która dokonuje korekty amplitudy w zależności od odległości.

Uzyskane podczas badań echa są następnie analizowane przez oprogramowanie w zgodzie z zaprogramowaniem użytkownika. W razie potrzeby echa są kompresowane w celu łatwiejszego wyświetlenia, a następnie prezentowane na ekranie defektoskopu. Zrzuty ekranu z defektoskopu dla badanego fragmentu rury 1 przedstawiono na rysunkach 7 i 8.

Analiza defektoskopowa spoiny we fragmencie rury 1 wykazała, że wewnętrzna powierzchnia rury jest niemal w całości skorodowana. Odczyty przeprowadzone przy wzmocnieniu 27,2 dB (gain 27,2 dB) wskazują na obecność plam na B-scanie, które świadczą o korozji do głębokości sięgającej 2 mm. W obrębie długości skanowanej w zakresach 110–115 mm oraz 180–200 mm odnotowano głębszą korozję sięgającą w głąb spoiny. Efekty te są widoczne na B-scanach (rysunek 7) oraz na rysunkach 8 i 9, na których przedstawiono kombinację trzech typów skanów: A-scan, B-scan i S-scan. Na rysunku 8 zaobserwować można nieciągłość w rejonie granicy spoiny, natomiast na rysunku 9 uwidoczniono korozję na dnie spoiny. Przeprowadzona analiza wyników umożliwiła ocenę stanu technicznego spoiny badanej rury i lokalizację potencjalnych wad.

Przeprowadzenie badania ultradźwiękowego złącza spawanego fragmentu rury 2, którego wyniki przedstawiono na rysunku 10, wykazało obecność korozji na niewielkich odcinkach dolnej części spoiny, szczególnie w zakresach długości 50–80 mm oraz 290–395 mm. Korozję tę uwidaczniają obrazy B-scanów.

Przeprowadzone badania ultradźwiękowe złączy spawanych na fragmentach rur 1 i 2 pozwoliły na szczegółową ocenę stanu technicznego spoin. W wyniku badań wykryto obecność korozji, która występuje głównie w dolnych partiach

spoiny. Korozja w tych obszarach była widoczna na obrazach B-scanów, co umożliwiło precyzyjne określenie jej lokalizacji oraz głębokości.

Jednak przeprowadzenie badań ultradźwiękowych spoin spawanych wiązało się z pewnymi trudnościami. Ze względu na charakter spoiny, jej zmienną geometrię, obecność nieciągłości oraz różne rodzaje materiałów spawalniczych uzyskanie jednolitych i wyraźnych wyników wymagało precyzyjnego ustawienia sondy i odpowiedniego doboru parametrów badania. Dodatkowo obecność porów, wtrąceń czy zmiany w strukturze materiału na granicy spoiny mogły wpływać na jakość sygnałów ultradźwiękowych, co utrudniało interpretację wyników.

Mimo tych trudności zastosowanie odpowiednich technik analizy, takich jak korekta wzmocnienia czasowego (TCG) oraz filtry pasmowe, pozwoliło na uzyskanie wiarygodnych obrazów, które umożliwiły skuteczną detekcję i ocenę uszkodzeń. Dzięki temu możliwe były zlokalizowanie miejsc potencjalnych wad i ocena stanu technicznego spoin, co stanowi główny element w ocenie bezpieczeństwa i trwałości badanych rur.

Podsumowując, można stwierdzić, że przedstawiona metodyka wykonywania inspekcji stanu technicznego elementów instalacji za pomocą defektoskopu OmniScan X3 wyposażonego w sondę z układem fazowym PA umożliwia dokładne i wiarygodne wykrywanie defektów w materiałach. Dotyczy to zarówno mapowania spoin, jak i wykrywania trudnych do stwierdzenia uszkodzeń wewnętrznych materiałów. Zastosowanie tej technologii pozwala na skuteczną diagnostykę, minimalizując ryzyko niewykrycia istotnych wad, co ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa i niezawodności instalacji przemysłowych.

### Podsumowanie

1. Badania ultradźwiękowe z wykorzystaniem technologii PAUT oferują wysoką czułość w wykrywaniu wewnętrznych uszkodzeń materiałów, takich jak pęknięcia, korozja czy wtrącenia, co sprawia, że jest to jedna z najbardziej precyzyjnych metod nieniszczących detekcji wad w materiałach konstrukcyjnych.
2. Dzięki możliwości sterowania ogniskowaniem wiązki ultradźwiękowej oraz różnym kątom skanowania PAUT pozwala na wykrycie defektów w materiałach o skomplikowanej geometrii, takich jak spoiny, co jest szczególnie istotne w aplikacjach przemysłowych, jak rurociągi w instalacjach kopalnianych.
3. PAUT umożliwia dokładne mapowanie rozmiaru, kształtu oraz głębokości wykrytych uszkodzeń, co pozwala na precyzyjną ocenę stanu technicznego elementów konstrukcyjnych

i dokładne określenie, które obszary wymagają interwencji naprawczej lub monitorowania.

4. Dzięki możliwości jednoczesnego skanowania wielu linii skanowania (A-scan, B-scan, C-scan, S-scan) PAUT znacząco skraca czas inspekcji w porównaniu z tradycyjnymi metodami ultradźwiękowymi, co prowadzi do większej efektywności operacyjnej, szczególnie w dużych instalacjach przemysłowych.
5. Technologia PAUT umożliwia wczesne i precyzyjne wykrywanie uszkodzeń, co potwierdzają wyniki badań wskazujące na jej wysoką skuteczność w identyfikacji różnego rodzaju nieciągłości materiałowych. Dzięki takim właściwościom metoda ta odgrywa główną rolę w zapewnianiu bezpieczeństwa oraz ciągłości eksploatacji infrastruktury krytycznej, m.in. w przemyśle petrochemicznym, instalacjach kopalnianych oraz sieciach gazowych. Zgodnie z obowiązującymi przepisami w gazociągach o ciśnieniu roboczym powyżej 1,6 MPa wymagane są badania RT lub UT, a podczas eksploatacji zaleca się okresową kontrolę jakości spawów. W tym zakresie metoda PAUT stanowi skuteczne narzędzie diagnostyczne wspierające prewencję awarii poprzez ocenę stanu technicznego infrastruktury przesyłowej oraz umożliwienie podjęcia odpowiednich działań naprawczych.

Artykuł zrealizowany na podstawie pracy pt. *Badania obrazowania spójności fazowej materiałów za pomocą defektoskopu OmniScan X3* – praca INiG-PIB; nr zlecenia: 0033/KE/2025, nr archiwalny: DK-4100-0011/2025.

### Literatura

- Alonso J., Pavón S., Vidal J., Delgado M., 2022. Advanced Comparison of Phased Array and X-Rays in the Inspection of Metallic Welding. *Materials*, 15(20): 7108. DOI: 10.3390/ma15207108.
- Arunprasath K., Naresh K., Amuthakkannan P., Manikandan V., Kavitha S., 2023. Study of low velocity impact failure responses of woven basalt fiber reinforced polymer composites using ultrasonic A, B and C scan techniques. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 9: 1356–1379. DOI: 10.1080/2374068X.2022.2118918.
- Deepak J.R., Bupesh Raja V.K., Srikanth D., Surendran H., Nickolas M.M., 2021. Non-Destructive Testing (NDT) Techniques for Low Carbon Steel Welded Joints: A Review and Experimental Study. *Materials Today: Proceedings*, 44: 3732–3737. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.578.
- Evans E.E., Brooks R.A., Liu J., Hall Z.E.C., Liu H., Lowe T.J.E., Withers P.J., Kinloch A.J., Dear J.P., 2024. Comparison of X-ray computed tomography and ultrasonic c-scan techniques and numerical modelling of impact damage in a CFRP composite laminate. *Applied Composite Materials*, 31, 249–264. DOI: 10.1007/s10443-023-10171-3.
- Grzyb K., Drobiec Ł., Blazy J., Zajac J., 2022. The use of NDT diagnostic methods and calculations in assessing the masonry tower crowned with the steel dome. *Materials*, 15(20): 7196. DOI: 10.3390/ma15207196.

- Herceg A., Maglič L., Grizelj B., Marušić V., 2023. Comparison of Ultrasonic Phased Array and Film Radiography in Detection of Artificially Embedded Defects in Welded Plates. *Materials*, 16(9): 3579. DOI: 10.3390/ma16093579.
- Kim Y., Cho S., Park I.K., 2021. Analysis of Flaw Detection Sensitivity of Phased Array Ultrasonics in Austenitic Steel Welds According to Inspection Conditions. *Sensors*, 21(1): 242. DOI: 10.3390/s21010242.
- Kluk D., 2025. Badania możliwości zastosowania cyfrowej analizy sygnału ultradźwiękowego do oceny stanu technicznego instalacji kopalnianych. *Nafta-Gaz*, 81(7): 465–473. DOI: 10.18668/NG.2025.07.05.
- Mohd T.M.F., Echtermeyer A.T., 2024. Phased Array Ultrasonic Testing on Thick Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Composite Pipe Implementing the Classical Time-Corrected Gain Method. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 43(3): 74. DOI: 10.1007/s10921-024-01096-3.
- Poradnik fizykochemiczny, 1974. Praca zbiorowa. PWN.
- Qiao J., Li J., Liu Ch., Li B., Huang X., 2022. Influence of near-field on the TCG calibration of phased array ultrasonic testing. *Nondestructive Testing*, 44(8): 48–53. DOI: 10.11973/wsjc202208009.
- Rana M.D., Hedden O., Cowfer D., Boyce R., 2001. Technical Basis for ASME Section VIII Code Case 2235 on Ultrasonic Examination of Welds in Lieu of Radiography. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 123(3): 338–345. DOI: 10.1115/1.1376719.
- Rawicki Ł., Krawczyk R., Słania J., Peruń G., Golański G., Łuczak K., 2024. Analysis of the suitability of ultrasonic testing for verification of nonuniform welded joints of austenitic–ferritic sheets. *Materials*, 17(17): 4216. DOI: 10.3390/ma17174216.
- Schmerr L.W. Jr., 2015. Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays. *Solid Mechanics and its Applications*, 215: 1–389, Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-07272-2.
- Shaloo M., Schnall M., Klein T., Huber N., Reitingner B., 2022. A Review of Non-Destructive Testing (NDT) Techniques for Defect Detection: Application to Fusion Welding and Future Wire Arc Additive Manufacturing Processes. *Materials*, 15(10): 3697. DOI: 10.3390/ma15103697.
- Siljama O., Koskinen T., Jessen-Juhler O., Virkkunen I., 2021. Automated Flaw Detection in Multi-channel Phased Array Ultrasonic Data Using Machine Learning. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 40: 67. DOI: 10.1007/s10921-021-00796-4.
- Taheri H., Hassen A.A., 2019. Nondestructive Ultrasonic Inspection of Composite Materials: A Comparative Advantage of Phased Array Ultrasonic. *Applied Sciences*, 9(8): 1628. DOI: 10.3390/app9081628.
- Uzun H., Gustiani D., 2024. Review of Phased Array Ultrasonic Testing of Weld Joints. *Journal of Marine and Engineering Technology*, 4(2): 77–92. DOI: 10.58771/joinmet.1525521.
- Woo S.C., Shi Y., 1998. Optimization of Ultrasonic Phased Arrays. [W:] Thompson D.O., Chimenti D.E. (eds.), Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Springer, Boston, MA. DOI: 10.1007/978-1-4615-5339-7\_114.
- Yi W., Yun IS., 1998. The defect detection and non-destructive evaluation in weld zone of austenitic stainless steel 304 using neural network-ultrasonic wave. *KSME International Journal*, 2: 1150–1161. DOI: 10.1007/BF02942589.



Dr inż. Dorota KLUK  
 Adiunkt w Zakładzie Technologii Eksploatacji  
 Płynów Złożowych  
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
 ul. Lubicz 25 A  
 31-503 Kraków  
 E-mail: dorota.kluk@inig.pl