

Badania możliwości zastosowania cyfrowej analizy sygnału ultradźwiękowego do oceny stanu technicznego instalacji kopalnianych

Research on the possibilities of using digital analysis of ultrasonic signals to assess the technical conditions of mine installations

Dorota Kluk

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Wieloletnia eksploatacja instalacji kopalnianych, związanych z transportem i magazynowaniem płynów złożowych, wymaga okresowych kontroli ich stanu technicznego. Obiekty te narażone są na występowanie ubytków materiałowych wywołanych korozją oraz oddziaływaniem mechanicznym transportowanych mediów. Głównymi czynnikami decydującymi o dopuszczeniu rurociągów i instalacji kopalnianych do eksploatacji są: stan materiałów konstrukcyjnych, stopień degradacji struktury oraz obecność wewnętrznych nieciągłości. Ważne jest zatem dysponowanie narzędziami umożliwiającymi ocenę stanu technicznego materiałów konstrukcyjnych. W niniejszym artykule przedstawiono problematykę jakościowej oceny wady, takiej jak pęknięcie czy ubytek związany z korozją w rurach wykonanych ze stopów metali, wykorzystywanych do transportu płynów złożowych. Badania prowadzone były z zastosowaniem defektoskopu cyfrowego OmniScan X3 firmy Olympus, wyposażonego w sondę z układem fazowym PA. W artykule omówiono również metodykę prowadzenia pomiaru defektów materiałów techniką PAUT. Wykonano kalibrację poszczególnych składowych układu, takich jak: prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w materiale, zasięg (mapa akustycznego wpływu), TCG, DAC, DGS, TOFD, wzmocnienie oraz czułość detekcji. Po wykonaniu kalibracji przeprowadzono testy poprawności wykonanych kalibracji, a następnie skanowanie rur poeksploatacyjnych w celu identyfikacji w nich wad materiałowych/korozji. Zaletą badań ultradźwiękowych z wykorzystaniem defektoskopu jest możliwość określenia rozmiarów uszkodzenia, jego precyzyjnej lokalizacji, w tym głębokości, na jakiej występuje. Jest to istotna przewaga w przypadku niewidocznych wewnętrznych nieciągłości materiału. Zakres zrealizowanych prac związanych z ultradźwiękowym pomiarem stanu technicznego elementów konstrukcyjnych instalacji przyczynił się do pozyskania nowego narzędzia inspekcyjnego, umożliwiającego m.in. mapowanie korozji rur i zbiorników, co pozwala na wykrywanie trudnych do stwierdzenia uszkodzeń wewnętrznych materiałów.

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

ABSTRACT: Long-term operation of mine installations related to the transport and storage of reservoir fluids requires periodic inspections of their technical condition. These facilities are exposed to material losses caused by corrosion and mechanical impact of the transported media. The main factors determining the approval of pipelines and mine installations for operation are the condition of construction materials, the degree of structural degradation and the presence of internal discontinuities. It is therefore important to have tools that enable the assessment of the technical condition of construction materials. The paper attempts to solve the problem of qualitative assessment of the type of defect, such as cracks and corrosion-related losses, in metal alloy pipes used for the transport of reservoir fluids. The tests were conducted using the OmniScan X3 digital flaw detector from Olympus, equipped with a PA phased array probe. The paper presents a methodology for measuring material defects using the PAUT technique. Calibration of individual components of the system including ultrasonic wave velocity in the material, range (acoustic impact map), TCG, DAC, DGS, TOFD, gain, and detection sensitivity. After calibration, the accuracy of the performed calibrations was verified, and post-operational pipes were scanned to identify material defects/corrosion. The innovative aspect of ultrasonic testing conducted with the flaw detector lies in the ability to determine the size of damage, its precise location, and the depth at which it occurs, particularly in the case of invisible internal material discontinuities. The scope of the work carried out, related to ultrasonic measurement of the technical condition of structural elements of the installation, contributed to the acquisition of a new inspection tool. This tool enables, among other things, mapping corrosion in pipes and tanks and detecting internal material damage that is otherwise difficult to detect.

Key words: OmniScan X3 flaw detector, phased array sensor, corrosion.

Wprowadzenie

Badania nieniszczące (ang. *non-destructive evaluation*, NDE), powszechnie nazywane testami nieniszczącymi (ang. *non-destructive testing*, NDT), obejmują szeroką gamę technik umożliwiających wykrywanie niejednorodności w materiałach metalowych i niemetalowych w sposób pozwalający na zachowanie ich integralności (Baldev i Jayakumar, 1997; Dubé, 2017). Badania NDE wykonywane są z wykorzystaniem promieniowania elektromagnetycznego (Ali i in., 2017; Kukla i in., 2018; Saffiudeen i in., 2023; Le i in., 2024), dźwięku (Grzyb i in., 2022; Rawicki i in., 2024) lub innych konwersji sygnału (Baniukiewicz, 2014; Mousa i in., 2020; Bajgholi i in., 2023) w celu oceny obecności wad w materiałach, tj. zanieczyszczeń, pęknięć lub korozji. Badania te znalazły zastosowanie w wielu branżach i mogą być wykorzystywane na każdym etapie użytkowania sprzętu, tj. podczas produkcji (weryfikacji prawidłowego przetwarzania materiałów), instalacji czy eksploatacji.

Badania ultradźwiękowe (ang. *ultrasonic testing*, UT) należą do szerokiej grupy technik badań objętościowych NDT. Dzięki ich zastosowaniu istnieje możliwość wykrywania wad w całej objętości badanego materiału. Badania UT wykorzystują zjawisko rozchodzenia się fali o wysokiej częstotliwości, powyżej 20 kHz, w badanych materiałach. Te są wprowadzane w fale, które emitowane są przez głowicę ultradźwiękową. Badanie opiera się na obserwacji zarejestrowanych impulsów otrzymanych od nieciągłości materiałowych oraz odbić od dna badanego elementu lub na granicach ośrodków o zróżnicowanej prędkości rozchodzenia się fali. Odbity od powierzchni lub od nieciągłości sygnał wraca do głowicy i po jego przetworzeniu na drgania elektryczne jest rejestrowany jako impuls na ekranie defektoskopu. W zależności od rodzaju zastosowanych fal możliwe jest wykrycie wad wewnętrznych oraz nieciągłości powierzchniowych i podpowierzchniowych.

Współczesne badania nieniszczące UT opierają się na możliwości pełnej rejestracji wyników pomiarów w postaci obrazowań A-, B-, C- i S-skanów (Arunprasath i in., 2023; Evans i in., 2024) oraz na zastosowaniu nowoczesnych technik ultradźwiękowych wykorzystujących głowice wieloprzetwornikowe (mozaikowe) *phased array* (PA) (Shi i in., 2023; Tai i in., 2023; Mills i in., 2024) czy metody opartej na zjawisku dyfrakcji fali (TOFD) (Raczyński i Warnke, 2017; Chen i in., 2022; Beltrão i in., 2024a, 2024b).

Badania UT są stosowane do oceny stanu obiektów wykonanych ze stali ferrytycznych, austenitycznych, aluminium, magnezu, miedzi i jej stopów, ołowiu, niklu, materiałów kompozytowych, takich jak m.in. blachy, odlewy, pręty, odkuwki, oraz do testowania złączy spawanych.

Zaletą tej techniki jest detekcja i ilościowa ocena wad powierzchniowych i podpowierzchniowych z jednostronnego dostępu. Badania ultradźwiękowe doskonale nadają się do pomiaru grubości ścianek urządzeń będących w ciągłej eksploatacji (Aliyev i Aliyeva, 2023). Dzięki prowadzeniu nadzoru materiałów w stałych odstępach czasowych można monitorować stopień zużycia danych podzespołów lub całej maszyny.

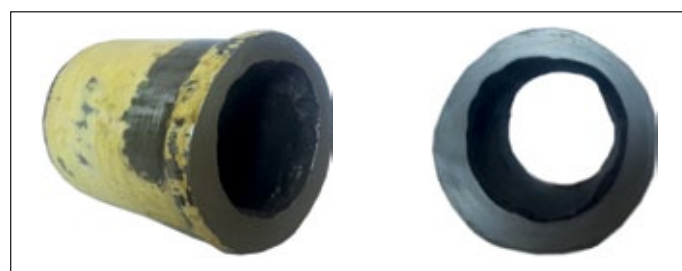
Materiał badawczy

Materiał badawczy stanowiły pocięte fragmenty rurociągów (rysunki 1–2), które zostały wyłączone z eksploatacji. Rurociągi te, wykonane ze stali węglowej, o średnicy zewnętrznej 60,3 mm i grubości ścianki 10 mm, służyły do transportu płynów złożowych – mieszaniny wody, ropy naftowej, gazu oraz często również cząstek stałych.



Rysunek 1. Fragment rury nr 1, którą transportowano płyny złożowe

Figure 1. A fragment of pipe no. 1, used to transport formation fluids



Rysunek 2. Fragment rury nr 2, którą transportowano płyny złożowe

Figure 2. A fragment of pipe no. 2, used to transport formation fluids

Metodyka badawcza

Objętościowe badanie stanu rur przeprowadzono z wykorzystaniem defektoskopu OmniScan X3 firmy Olympus (rysunek 5). Defektoskop wyposażony jest w sondę z układem fazowym *phased array* (PA) (rysunek 6).

Nieniszczące badania ultradźwiękowe prowadzone są w zakresie fal mechanicznych o częstotliwości większej niż 20 kHz i opierają się na zasadach propagacji i odbicia fal w badanym ośrodku sprężystym.

Metodyka badań defektoskopowych obejmuje następujące etapy:

- przygotowanie urządzenia do pomiaru:
 - wybór sondy ultradźwiękowej, podłączenie do defektoskopu OmniScan X3 i skonfigurowanie jej z urządzeniem;
 - wykonanie planu pomiaru;
 - przeprowadzenie kalibracji urządzenia;
- przygotowanie próbki:
 - oczyszczenie badanej powierzchni w celu zapewnienia dobrego sprzężenia ultradźwiękowego,
 - nałożenie żelu sprzęgającego na powierzchnię materiału celem zminimalizowania straty sygnału ultradźwiękowego;
- wykonanie pomiaru:
 - ustawienie parametrów pomiarowych: częstotliwości ultradźwięków, kąta nachylenia sondy oraz głębokości penetracji, a następnie przeprowadzenie skanowania materiału, monitorując wyniki na ekranie urządzenia OmniScan X3 w czasie rzeczywistym,
 - identyfikacja i lokalizacja defektów.

Kalibracja defektoskopu OmniScan X3 z sondą PA dotyczy trzech różnych aspektów, a mianowicie:

- kalibracji prędkości/zera, którą należy wykonać za każdym razem, gdy używany jest nowy materiał testowy lub przetwornik;
- kalibracji odniesienia, którą wykonuje się w celu skonfigurowania testu względem wzorca odniesienia – zazwyczaj obejmuje ustalenie poziomu amplitudy sygnału ze wzorca odniesienia w celu porównania ze wskazaniami z badanego elementu;
- certyfikacji kalibracji, która okresowo weryfikuje, czy pomiary dokonywane za pomocą przyrządu są prawidłowe. Certyfikacja kalibracji to proces dokumentowania dokładności pomiaru i liniowości instrumentu ultradźwiękowego w określonych warunkach testowych. W przypadku detektorów wad dostarczane są zarówno certyfikacje poziome (głębokość lub odległość), jak i pionowe (amplituda). Dokładność pomiaru w udokumentowanych warunkach testowych jest porównywana z ustaloną przez producenta tolerancją dla danego przyrządu.

Kalibracja przeprowadzana jest przed rozpoczęciem badania z użyciem sondy, klina i bloku kalibracyjnego (rysunki 3–4) wykonanych z tego samego materiału co badana część.

Kalibracja odbywa się w kreatorze kalibracji PA/UT/TFM defektoskopu i obejmuje:



Rysunek 3. Blok do kalibracji nr 1 (ISO 2400:2012, SN 81002110002R)

Figure 3. Calibration block no. 1 (ISO 2400:2012, SN 81002110002R)



Rysunek 4. Blok do kalibracji nr 2 (CS 1018, ISO 7963:2010, S/N 82002212008R)

Figure 4. Calibration block no. 2 (CS 1018, ISO 7963:2010, S/N 82002212008R)



Rysunek 5. Defektoskop OmniScan X3 firmy Olympus

Figure 5. Olympus OmniScan X3 flaw detector

- kalibrację prędkości;
- kalibrację czułości detekcji;
- kalibrację TCG (ang. *time-corrected gain*);
- kalibrację DAC (ang. *distance-amplitude correction*);
- kalibrację DGS (ang. *distance gain size*);
- kalibrację TOFD (ang. *time-of-flight diffraction*).



Rysunek 6. Głowica Phase Array 5L32-19-2X10-A31-P-2.5-OM, Linear Array, 32 elementy, częstotliwość 5,0 MHz

Figure 6. Phased Array probe 5L32-19-2X10-A31-P-2.5-OM, Linear Array, 32 elements, frequency 5.0 MHz

Charakterystyka fal ultradźwiękowych

Ultradźwięki są to drgania mechaniczne cząstek ośrodka o częstotliwości powyżej 20 kHz. Rozchodzenie się fali mechanicznej polega na drganiu cząstek w zakresie sprężystym i przekazywaniu części energii sąsiadnym cząstkom. Fala dźwiękowa może przemieszczać się tylko w ośrodku sprężystym.

Energia dźwięku używana podczas wykrywania wad przemieszcza się w różnych trybach falowych w zależności od kierunku fali i odpowiadającego mu ruchu cząstek w badanym elemencie. Najczęściej używane są fale podłużne, poprzeczne i powierzchniowe. Różnią się one między sobą kierunkiem drgań cząstek ośrodka w stosunku do kierunku rozchodzenia się fali.

W przypadku fal podłużnych, cząstki ośrodka drgają prostopadłowo, zgodnie z kierunkiem rozchodzenia się fali. Propagacja fali powoduje powstawanie obszarów zagęszczeń i rozrzedzeń. Fale te mogą rozchodzić się we wszystkich typach ośrodków, tj. stałym, ciekłym i gazowym. Jedynym warunkiem uzyskania fali podłużnej jest odpowiednio duży stosunek wymiarów ośrodka do długości fali. Do fal podłużnych zaliczają się słyszalne fale dźwiękowe. Fale podłużne przemieszczają się najszybciej ze wszystkich trybów fal powszechnie stosowanych w ultradźwiękowych badaniach nieniszczących. Szybkość ich rozchodzenia się w stali wynosi 5900 m/s. Fale podłużne mogą przekształcać się w fale poprzeczne poprzez refrakcję lub odbicie.

Fale poprzeczne, zwane też falami ścinania, powstają w wyniku drgań cząstek w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali. Mogą one występować tylko w ciałach stałych oraz cieczach o dużych lepkościach. Aby doszło do rozchodzenia się fali, cząstki muszą wykazywać silne powiązanie jedna z drugą, umożliwiające wzajemne wymuszanie drgań. Powoduje to też niższą prędkość rozchodzenia się fal poprzecznych, która stanowi ok. 50% prędkości rozchodzenia się fal podłużnych. Fale podłużne używane są w testach wiązki kątowej w ultradźwiękowym wykrywaniu wad. Typowa prędkość tej fali w stali wynosi około 3250 m/s. Fale ścinające mogą przekształcać się w fale podłużne poprzez odbicie lub załamanie na granicy.

Fale powierzchniowe, znane również jako fale Rayleigha, reprezentują ruch oscylacyjny, który przemieszcza się wzdłuż powierzchni badanego elementu na głębokość jednej długości fali. Prędkość i długość fali są podobne jak w przypadku fal ścinających. Fale oceaniczne są przykładem tego rodzaju fal. Fale powierzchniowe można wykorzystać do wykrywania pęknięć powierzchniowych w badanym elemencie.

Ruch drgający wykonywany przez cząstki materii charakteryzuje częstotliwość, tj. liczbę drgań cząstek na sekundę. Fala dźwiękowa rozchodzi się z pewną prędkością, zwaną prędkością dźwięku, która jest charakterystyczna dla danego materiału.

Przemieszczające się przez dane medium fale dźwiękowe, gdy napotykają granicę z innym medium, zostają odbite lub przeniesione zgodnie z prostymi zasadami. Jest to zasada fizyki, która leży u podstaw ultradźwiękowego wykrywania wad. Krótko mówiąc, fale ultradźwiękowe odbijają się od pęknięć lub innych nieciągłości w badanym elemencie, a zatem monitorując parametry odbitych fal, możliwe jest zidentyfikowanie i zlokalizowanie wewnętrznych wad badanego elementu.

Ultradźwiękowy defektoskop OmniScan X3 firmy Olympus jest małym, przenośnym urządzeniem opartym na mikroprocesorach. Generuje i wyświetla przebieg ultradźwiękowy, który jest interpretowany przez operatora w celu zlokalizowania i sklasyfikowania defektów badanego materiału. Urządzenie wyposażone jest w ultradźwiękowy impulsator/odbiornik i oprogramowanie służące do odbioru sygnału i jego analizy, wyświetlacz przebiegu i moduł rejestrowania danych.

Pomiary prowadzone są z użyciem przetworników, które generują fale akustyczne i mierzą czas, jaki zajmuje fali opuszczenie przetwornika, przejście przez materiał, odbicie się od reflektora i powrót do przetwornika. Zaawansowana technologia identyfikacji wad materiałów z wykorzystaniem badań defektoskopowych wymaga opracowania metodyki badawczej. Na rysunku 5 przedstawiono defektoskop OmniScan X3, natomiast na rysunku 6 – głowicę z układem fazowym PA.

Główce z układem fazowym PA są głowicami wieloprzetwornikowymi i wykorzystują technologię piezokompozytową. Powszechnie stosowanymi materiałami piezoelektrycznymi są: kwarc, BaTiO₃, PbNb₂O czy PZT ($Pb[Zr_x Ti_{1-x}]O_3$ ($0 \leq x \leq 1$)) (Kumari i in., 2019). Głowice PA, w stosunku do głowic standardowych, wyróżnia to, że składają się z wielu pojedynczych przetworników (10-, 16-, 32-, 64-, 128-elementowych). Każdy z nich może niezależnie generować i odbierać falę ultradźwiękową, dzięki czemu możliwe jest kształtowanie wiązki falowej, m.in. jej skupianie na dowolnej głębokości badanego elementu lub jej odchylenie o dowolny kąt. Wykorzystanie głowicy PA umożliwia badanie elementów o skomplikowanych kształtach. Standardowa częstotliwość przetwornika ultradźwiękowego z układem PA mieści się w zakresie 1–15 MHz. Defektoskop OmniScan X3 jest wyposażony w linearną głowicę PA oraz wykorzystuje zaawansowany algorytm TFM (ang. *total focusing method*) przetwarzania danych. Dane pozyskiwane są przy użyciu metody FMC (ang. *full matrix capture*). Dzięki zastosowaniu wielokanałowego urządzenia do pozyskiwania danych ultradźwiękowych można ogniskować energię akustyczną we wszystkich punktach strefy badania. Wynikiem jest obraz wysokiej rozdzielczości pokazujący strefę badania.

Zasada działania FMC (ang. *total focusing method*) przetwarzania danych w głowicy PA pracującej z defektoskopem OmniScan X3 jest następująca:

- pierwszy etap:
nadaje pierwszy element, odbierają wszystkie,

nadaje drugi element, odbierają wszystkie,
nadaje trzeci element, odbierają wszystkie,
...

na podstawie uzyskanych danych (w dużej liczbie) budowana jest kompletna macierz;

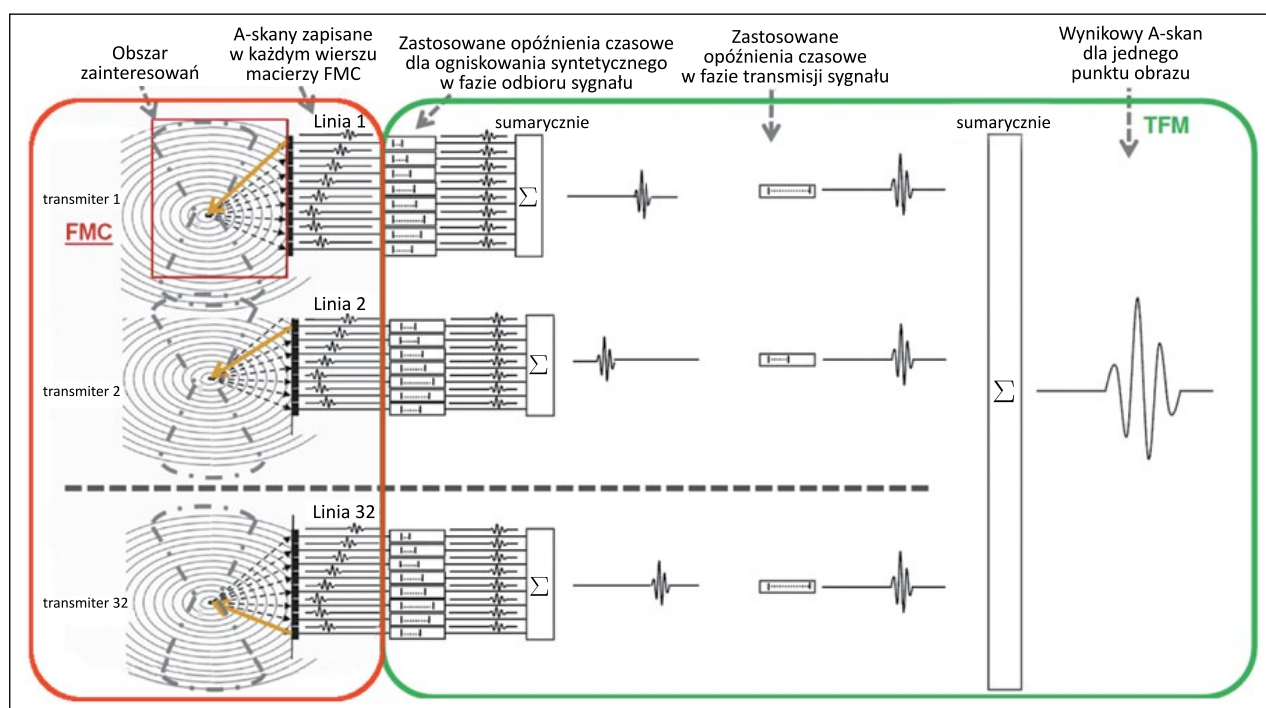
- drugi etap:
przetwarzanie danych na obraz punktów;
- używa wielu kanałów do nadawania (i odbierania) w celu formowania wiązki UT;
- w PAUT A-skany są sumowane i przetwarzane cyfrowo, a pokazywane są jako pojedynczy A-skan dla danego kąta.

Na rysunku 7 przedstawiono graficznie schemat tworzenia obrazu z wykorzystaniem głowicy PA emitującej i odbierającej sygnał za pomocą 32-elementowej sondy.

Rodzaje zobrazowań

Informacje uzyskane podczas badań ultradźwiękowych można przedstawić w postaci: A-, B-, C- oraz S-skanów.

Zobrazowanie typu A-skan przedstawia ilościową zależność pomiędzy amplitudą sygnału a czasem przejścia, uzyskaną w pojedynczym punkcie powierzchni próbki badanej. Ten typ zobrazowania – najczęściej stosowany – może być wykorzystany do analizy rodzaju, rozmiaru i położenia wady. Jest to wykres, w którym amplituda echa i czas przejścia są nanoszone na prostą siatkę, przy czym oś OY reprezentuje amplitudę, a oś OX – czas.



Rysunek 7. Zasada działania TFM w głowicy PA emitującej i odbierającej sygnał za pomocą sondy wieloelementowej

Figure 7. Principle of operation of TFM in a PA probe emitting and receiving signals using a multi-element array

Zobrazowanie typu B-skan stanowi obraz 2D zarejestrowanych danych ultradźwiękowych. Przedstawia on wykres czasu (oś OX) w funkcji odległości położenia głowicy wzdłuż linii skanowania w stosunku do położenia początkowego (oś OY). Format ten jest powszechnie używany z konwencjonalnymi detektorami wad i grubościomierzami korozji do kreślenia głębokości reflektorów względem ich położenia liniowego. Korelacja danych ultradźwiękowych z rzeczywistą pozycją przetwornika umożliwia kreślenie widoku proporcjonalnego i umożliwia korelację i śledzenie danych w określonych obszarach kontrolowanej części.

Zobrazowanie typu C-skan opisuje amplitudy sygnałów uzyskanych przy skanowaniu górnej powierzchni badanej próbki. Rejestrowane są więc echa jako funkcja położenia każdej odbijającej powierzchni w objętości próbki. Jedną z osi jest oś skanowania, druga – oś indeksu.

Zobrazowanie typu S-skan (skanowanie sektorowe lub azymutalne) przedstawia dwuwymiarowy obraz wszystkich A-skanów z określonego kanału, skorygowanych o opóźnienie i kąt załamania. Oś OX odpowiada rzutowanej odległości (szerokości badanej próbki) od punktu wyjścia dla skorygowanego obrazu, a oś OY – głębokości.

Wybór układu zobrazowania na defektoskopie może łączyć najbardziej przydatne widoki. Za pomocą przyrządu OmniScan X3 istnieje możliwość zobrazowań skanowanych elementów w różnych konfiguracjach widoków skanów, a mianowicie: A, C, A-C, A-C-C, A-S, A-B-S, B-S-A, A-C-S i A-B-C-S.

Urządzenie to posiada wbudowane analityczne oprogramowanie AIM (ang. *acoustic influence map*), które umożliwia tworzenie mapy akustycznego wpływu. Opiera się ono na takich zjawiskach jak: odbicie, transformacja, rozbieżność wiązki, pole bliskie itp.

Uzyskany obraz zależy od typu głowicy i klina, typu i drogi fali, oraz typu i orientacji reflektora. Narzędzie AIM eliminuje konieczność domysłów podczas tworzenia planu skanowania – wizualizuje efekt zestawu fal (tryb TFM), sprawdza, gdzie kończy się czułość, i odpowiednio dostosowuje

plan skanowania. Na rysunku 8 zobrazowano strefę wpływu skanowanego elementu zależnie od wybranej propagacji fali.

Wykrywanie defektów w metalach za pomocą defektoskopu OmniScan X3 i sondy PA

Po przeprowadzeniu kalibracji poszczególnych parametrów defektoskopu OmniScan X3 wyposażonego w głowicę PA (5L32-19-2X10-A31-P-2.5-OM) wykonano pomiar defektów osadzonych w blokach kalibracyjnych. Badanie defektów w blokach kalibracyjnych miało na celu sprawdzenia poprawności wykonanych kalibracji. Przed przystąpieniem do poszczególnych skanowań materiał badawczy przygotowano do badań poprzez oczyszczenie jego powierzchni tak, aby zapewnić dobre sprzężenia ultradźwięków. Następnie na powierzchnię badanych materiałów nałożono żel sprzęgający (WD-40) celem zminimalizowania straty sygnału. Po tym etapie przystąpiono do planowania badania poprzez wyznaczenie strefy wpływu, zależnej od wybranej propagacji fal ultradźwiękowych oraz natężenia dźwięków. Parametry skanowania wad zestawiono w tabeli 1, natomiast na rysunku 9 przedstawiono obraz badań.

Podczas wykrywania defektów w rurach poeksploatacyjnych z wykorzystaniem defektoskopu OmniScan X3 i sondy PA zastosowano parametry przedstawione w tabeli 2. Obraz przeprowadzonych badań zaprezentowano na rysunku 10.

C-skany badanych fragmentów przedstawiają niejednorodną powierzchnię. Jest to związane z przygotowaniem powierzchni rury do badań defektoskopowych polegającym na usunięciu zalegającej na powierzchni rury farby. Proces ten przeprowadzono metodą mechanicznego ścierania za pomocą papieru ściernego, w wyniku czego powstały rysy na powierzchni.

Podsumowując, można stwierdzić, że przeprowadzona ocena fragmentów rur, którą wykonano za pomocą defektoskopu OmniScan X3 wyposażonego w sondę z fazowym układem (PA), podczas której zastosowano propagację fal puls/echo, czyli rejestrowano impulsy z odbicia fali ultradźwiękowej,

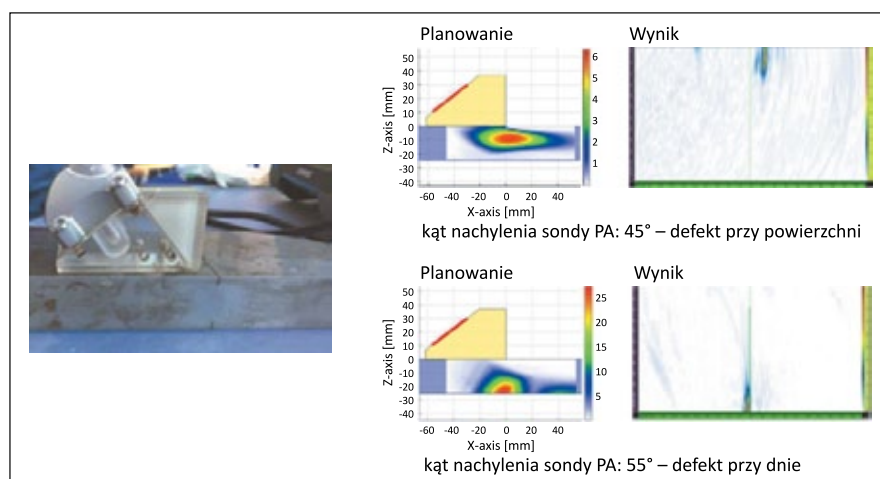


Rysunek 8. Wyznaczanie mapy akustycznego wpływu

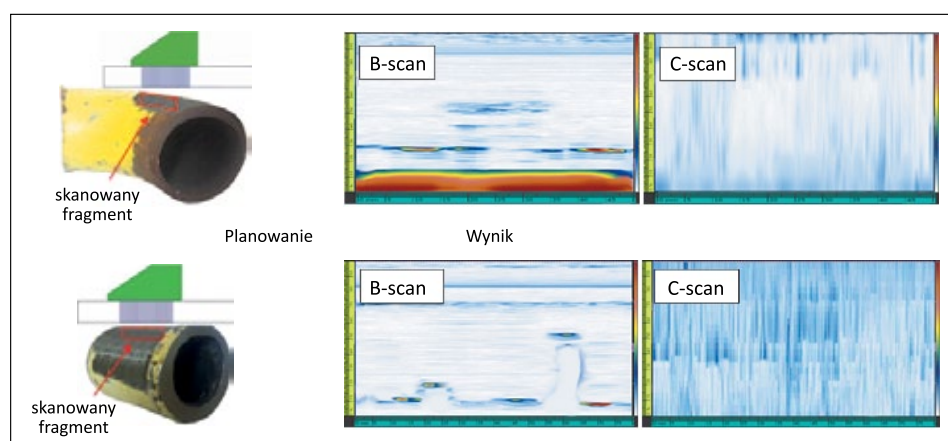
Figure 8. Determining the acoustic impact map

Tabela 1. Parametry skanowania wad w bloku kalibracyjnym**Table 1.** Defect scanning parameters in the calibration block

Parametry skanowania wady przy górnej powierzchni	Parametry skanowania wady przy dolnej powierzchni
– Propagacja fali ultradźwiękowej: tryb własny TLT – Natężenie ultradźwięków: 26 dB – Głębokość penetracji: 0–25 mm Wynik: Wykryto nieciągłość materiału na długości 5 mm.	– Propagacja fali ultradźwiękowej: tryb własny TTT – Natężenie ultradźwięków: 32 dB – Głębokość penetracji: 0–25 mm Wynik: Wykryto nieciągłość materiału na długości 5 mm.

**Rysunek 9.** Skanowanie bloku kalibracyjnego defektoskopem OmniScan X3 z głowicą PA**Figure 9.** Scanning the calibration block with the OmniScan X3 flaw detector equipped with PA probe**Tabela 2.** Parametry skanowania rur poeksploatacyjnych**Table 2.** Parameters for scanning post-mining pipes

Parametry skanowania wad we fragmencie rury nr 1	Parametry skanowania wad we fragmencie rury nr 2
Propagacja fali ultradźwiękowej: puls/echo Natężenie ultradźwięków: 10–40 dB Głębokość penetracji: 0–10 mm Kąt nachylenia: 0° Wynik: jednolita korozja na grubości 0,5–1,5 mm Na odcinku 1,5–3,0 mm odnotowano jednostkowe refleksy świadczące o zachodzeniu w tych miejscach korozji.	Propagacja fali ultradźwiękowej: puls/echo Natężenie ultradźwięków: 10–40 dB Głębokość penetracji: 0–10 mm Kąt nachylenia: 0° Wynik: oznaczona grubość badanego fragmentu rury zawiera się w zakresie 5–9 mm, co możemy dostrzec na zobrazowaniu B-skanu. Na wysokości 2–6 mm od dolnej ściany można dostrzec refleksy świadczące o niejednorodności materiału – najprawdopodobniej są to skorodowane miejsca.

**Rysunek 10.** Skanowanie odcinków rur defektoskopem OmniScan X3 z głowicą PA**Figure 10.** Scanning pipe sections with the OmniScan X3 flaw detector equipped with PA probe

umożliwiła zobrazowanie niejednorodności w badanych elementach. Badania prowadzone metodą liniowego skanowania fragmentów rur potwierdziły ich zły stan techniczny. W rurach tych odnotowano zmniejszenie grubości ścianek oraz obecność rdzy zarówno na wewnętrznych powierzchniach, jak i w objętościach.

Przedstawiona metodyka oceny 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 korozji, jak i wykrywania trudnych do stwierdzenia uszkodzeń wewnętrznych materiałów.

Podsumowanie

1. Badania ultradźwiękowe prowadzone techniką układu fazowego PAUT są zaawansowaną metodą badania nieniszczącego (NDT) z możliwością zastosowań przemysłowych. Należą do technik inspekcji jakości materiałów metalowych i niemetalowych zachowujących ich integralność.
2. Opracowana metodyka badań za pomocą defektoskopu zapewnia systematyczne podejście do wykonywania pomiarów, umożliwiając dokładne i wiarygodne wykrywanie defektów w materiałach.
3. Opracowaną metodykę badań przetestowano na próbkach o znanej lokalizacji wad, a następnie przeprowadzono badania na fragmentach rur poeksploatacyjnych.
4. Opracowana metoda ultradźwiękowego pomiaru PAUT stanowi cenne narzędzie detekcyjne, umożliwiające ocenę stanu technicznego metalowych elementów konstrukcyjnych poprzez wykrywanie trudnych do zidentyfikowania uszkodzeń wewnętrznych.
5. W wyniku przeprowadzonych prac dotyczących nieniszczących badań ultradźwiękowych pozyskano nowe narzędzie naukowe, które może być w przyszłości wykorzystane przy realizacji kolejnych prac badawczych.

Artykuł powstał na podstawie pracy badawczej pt. *Badania możliwości zastosowania cyfrowej analizy sygnału ultradźwiękowego do oceny stanu technicznego/uszkodzeń metalowych części na instalacjach kopalnianych*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0028/KE/2024, nr archiwalny: DK-4100-0014/2024.

Literatura

Ali K.B., Abdalla A.N., Rifai D., Faraj M.A., 2017. Review on system development in eddy current testing and technique for defect classification and characterization. *IET Circuits, Devices & Systems*, 11: 338–351. DOI: 10.1049/iet-cds.2016.0327.

Aliyev A.M., Aliyeva S.Y., 2023. Influence of mechanical factors on the performance and aging process of oil pump jack. *Nafta-Gaz*, 79(12): 776–785. DOI 10.18668/NG.2023.12.03.

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.

Bajgholi M.E., Rousseau G., Viens M., Thibault D., Gagnon M., 2023. Reliability assessment of non-destructive testing (NDT) for the inspection of weld joints in the hydroelectric turbine industry. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128(9–10): 4223–4233. DOI: 10.1007/s00170-023-12176-5.

Baldev R., Jayakumar T., 1997. NDE methodologies for characterisation of defects, stresses and microstructures in pressure vessels and pipes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 73(2): 133–146. DOI: 10.1016/S0308-0161(97)00042-2.

Baniukiewicz P., 2014. Automated defect recognition and identification in digital radiography. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 33: 327–334. DOI: 10.1007/s10921-013-0216-6.

Beltrão B.D., Ferreira C.A.M., Antonio M.M.M.Z., 2024a. Revolutionizing drilling operations: unveiling the power of advanced ultrasound technologies for integrity inspection of drilling risers. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3379838/v2.

Beltrão B.D., Ferreira C.A.M., Musci M., 2024b. Drilling riser integrity inspection: an approach using advanced ultrasound techniques. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 17(1): 1–12. DOI: 10.5281/ZENODO.10860399.

Chen J., Li Y., Place T., Aulin A., Galbraith L., 2022. Assessing Internal Pitting Corrosion With Encoded Ultrasonic Scanning. [W:] Volume 2: Pipeline and Facilities Integrity. *14th International Pipeline Conference, American Society of Mechanical Engineers, Calgary, Alberta, Canada*, V002T03A020. DOI: 10.1115/IPC2022-86884.

Dubé N., 2017. Advances in phased array ultrasonic technology applications. Second printing. *Olympus, Waltham, USA*.

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(1): 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.

Kukla D., Zagórski A., Wonsewicz P., 2018. Analiza sygnałów prądowiowych od niestandardowych defektów w stalowych rurkach austenitycznych wymienników ciepła. *Badania Nieniszczące i Diagnostyka*, 4: 12–18. DOI: 10.26357/BNiD.2018.033.

Kumari N., Monga S., Arif M., Sharma N., Singh A., Gupta V., Vilarinho P.M., Sreenivas K., Katiyar R.S., 2019. Higher Permittivity of Ni-Doped Lead Zirconate Titanate, Pb[ZrxTi1-xO3, Ceramics. *Ceramics International*, 45(4): 4398–4407. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.11.117.

Le M., Pham P.H., Trung L.Q., Hoang S.P., Le D.M., Pham Q.V., Luong V.S., 2024. Enhancing corrosion detection in pulsed eddy current testing systems through autoencoder-based unsupervised learning. *NDT & E International*, 146: 103175. DOI: 10.1016/j.ndteint.2024.103175.

Mills B., Javadi Y., Abad F., Lotfian S., MacLeod C., Mehmanparast A., Pierce G., Gachagan A., 2024. Inspection of wind turbine bolted connections using the ultrasonic phased array system. *Heliyon*, 10(14): e34579. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e34579.

- Mousa T.O., Mohammed M.S., Aljohani M.S., 2020. Optimizing radiographic sensitivity in the in-service testing of pipes. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 56: 92–99. DOI: 10.1134/S106183092001009X.
- Raczyński P., Warnke K., 2017. Ultrasonic diagnostics of main pipelines. *Advances in Materials Science*, 17(4): 37–54. DOI: 10.1515/adms-2017-0020.
- 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.
- Saffiudeen M.F., Syed A., Mohammed F.T., 2023. Failure analysis of heat exchanger using eddy current testing (ECT). *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 23: 1898–1906. DOI: 10.1007/s11668-023-01746-0.
- Shi H., Ebrahimi M., Zhou P., Shao K., Li J., 2023. Ultrasonic and phased-array inspection in titanium-based alloys: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 237: 511–530. DOI: 10.1177/09544089221114253.
- Tai J.L., Grzejda R., Sultan M.T.H., Łukaszewicz A., Shahar F.S., Tarasiuk W., Rychlik A., 2023. Experimental investigation on the corrosion detectability of a36 low carbon steel used in multi-bolted connections by the method of phased array corrosion mapping. *Materials*, 16: 5297. DOI: 10.20944/preprints202306.2120.v1.



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

OFERTA ZAKŁADU PRODUKCJI DOŚWIADCZALNEJ I MAŁOTONAŻOWEJ ORAZ SPRZEDAŻY

- produkcja małowatowa i sprzedaż specyfików naftowych w ilościach od 10 do 25 000 kg/ szarżę:
 - » olejów i środków smarowych,
 - » zaawansowanych technologicznie specyfików dla wojska,
 - » preparatów myjących,
 - » inhibitorów korozji i rdzewienia,
 - » dodatków i pakietów dodatków uszlachetniających (dobieranie do paliw indywidualnie):
 - do przerobu ropy naftowej (procesowe),
 - do benzyn silnikowych,
 - do paliw lotniczych,
 - do olejów napędowych,
 - do olejów opałowych,
 - do paliw alternatywnych (biopaliw),
 - biocydów do paliw naftowych i biopaliw,
 - » opracowywanie kart charakterystyki substancji i mieszanin niebezpiecznych, zgodnie z obowiązującymi przepisami praw.



Kierownik: dr Winicjusz Stanik Adres: ul. Łukasiewicza 1, 31-429 Kraków
 Telefon: 12 617 75 25 Faks: 12 617 75 22 E-mail: winicjusz.stanik@inig.pl



INSTYTUT NAFTY I GAZU
 – Państwowy Instytut Badawczy