

Marcin Lewandowski^{1*}, Jakub Rozbicki¹, Hanna Smach¹, Piotr Karwat¹, Arkadiusz Szczurek², Jolanta Sala², Alicja Bera²

¹Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, ²Baltic Operator Sp. z o.o.

Modelowe rozwiązania skanerów UTPA do badań spawów dla wież wiatrowych, sekcji płaskich oraz konstrukcji wielkogabarytowych on-shore/off-shore

Model solutions of UTPA scanners for weld testing of wind towers, flat sections, and large-scale on-shore/off-shore structures

STRESZCZENIE

W ramach realizowanego projektu wdrożeniowego (akronim: BalTECH, finansowanie NCBR POIR) opracowano modelowe stanowiska skanerów UTPA do badań nieniszczących spawów dla asortymentu produktów wytwarzanych w Baltic Operator sp. z o.o. Skanery zapewniają prowadzenie i sprzężenie dwóch głowic Phased-Array (badanie dwustronne). Do realizacji badań UTPA wykorzystano komercyjny aparat Olympus-OmniScan™ X3, natomiast dla metody UTPA-FMC (Full-Matrix Capture) badawczą platformę ultradźwiękową us4R-lite™ firmy us4us sp. z o.o.

Wykonano zestaw ok. 170 próbek testowych spawów z różnymi niezgodnościami dla płyt w zakresie grubości 12–65 mm, które zostały przebadane metodami VT, MT/PT, UT, RT, UTPA. Opracowana procedura badania i wzorce testowe pozwoliły na pełną walidację klasycznej metody UTPA do badania sekcji wież wiatrowych. Eksperymentalne zastosowanie i porównanie metody UTPA-FMC pokazało jej duży potencjał oraz nowe możliwości wizualizacji i oceny wad, w stosunku do klasycznej metody UTPA. Zweryfikowano także możliwość zbierania surowych danych FMC z prędkością do 100 mm/s. Kluczowe znaczenie ma wdrożenie nowoczesnych i ekonomicznych rozwiązań badań nieniszczących, które zapewnią ocenę jakości 100% długości spawu. Istotny wkład w rozwój laboratoriów badawczych, w kontekście wiarygodności uzyskiwanych wyników badania.

Słowa kluczowe: ultradźwiękowe badania nieniszczące; spawy; Phased-Array; UTPA; FMC

ABSTRACT

As part of an ongoing project (acronym: BalTECH, NCBR POIR funding), model UTPA scanner stations were developed for nondestructive testing of welds for a range of products manufactured at Baltic Operator Ltd. The scanners provide guidance and coupling of two Phased-Array probes (two-sided testing). A commercial Olympus-OmniScan™ X3 apparatus was used for the UTPA testing, while for the UTPA-FMC method the us4R-lite™ ultrasound research platform from us4us sp. z o.o. was used.

A set of about 170 weld test specimens with various nonconformities for plates in the thickness range of 12–65 mm was prepared and tested by VT, MT/PT, UT, RT, UTPA methods. The developed test procedure and test patterns allowed full validation of the classical UTPA method for testing wind tower sections. The experimental application and comparison of the UTPA-FMC method showed its great potential and new possibilities for visualization and evaluation of defects, compared to the classical UTPA method. The ability to collect raw FMC data at speeds of up to 100 mm/s was also verified. The goal of the project is to implement modern and cost-effective nondestructive testing solutions that will provide quality assessment of 100% of the weld length.

Keywords: ultrasonic nondestructive testing; welds; Phased-Array; PAUT; FMC;

1. Wstęp

Celem projektu BalTECH jest opracowanie i wdrożenie w Baltic Operator Sp. z o.o. modelowego systemu ekspertowego opartego na zaawansowanym systemie UT/Phased-Array (UT/PA) do monitorowania procesu produkcyjnego i diagnostyki wielkogabarytowych spawanych konstrukcji stalowych off-shore i on-shore dla przemysłu morskiego.

*Autor korespondencyjny.

E-mail: mlew@ippt.pan.pl

Projekt jest dofinansowany w Programie Operacyjnym Innowacyjny Rozwój NCBR (POIR.04.01.04-00-0119/19) i realizowany w konsorcjum naukowo-przemysłowym: Baltic Operator Sp. z o.o. (BO), Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN (IPPT) oraz Akademia Górniczo-Hutnicza (AGH).

W artykule ograniczymy się do opisu badań i wyników uzyskanych w zakresie wdrażania ultradźwiękowych badań nieniszczących metodami UTPA i UTPA-FMC [1,2] do badania spoin wykonywanych w praktyce produkcyjnej BO.

Technika ultradźwiękowa Phased-Array (UTPA) jest konwencjonalnie stosowana do badań nieniszczących spoin spawalniczych. UTPA jest w pełni wspierana przez sprzęt klasy przemysłowej i oprogramowanie kontrolne. Wprowadzona w ostatnich latach technika Full-Matrix Capture (FMC) rozszerza metody badania i wizualizacji wad poprzez polepszoną rozdzielczość poprzeczną w całej głębokości badania oraz możliwość obrazowania multimodalnego (tj. z konwersją modów fal). Obie te metody znajdowały się w zakresie zainteresowania realizowanego projektu, natomiast praktycznym celem było wdrożenie i walidacja klasycznej metody UTPA w warunkach przemysłowych.

W projekcie opracowano także modelowe stanowiska skanerów ultradźwiękowych, które mają zapewnić realizację wiarygodnych i powtarzalnych badań spoin. Wyzwaniem było zapewnienie odpowiednio wysokiej prędkości skanowania, tak, żeby badania nie zaburzały naturalnego rytmu produkcji.

2. Wdrożenie metody UTPA

Najważniejszym celem projektu było wdrożenie metody UTPA do badania spoin obwodowych i wzdłużnych sekcji wież wiatrowych, które stanowią jeden z wiodących asortymentów produkcji BO.

W tym celu wyposażono się w aparat OLYMPUS OmniScan X3 (Olympus, USA) z głowicami Phased-Array o podwójnym kącie wiązki do skanowania spoin dwustronnych. System Olympus, w konfiguracji 32:128 kanałów obsługuje dwie 32-elementowe sondy.

W kolejnych punktach opisano proces wdrażania metody UTPA, który obejmował:

- symulacje wiązek ultradźwiękowych, w celu optymalizacji pokrycia spoin;
- opracowanie procedury badań UTPA;
- walidacja metody UTPA na bazie próbek spoin.

Pominięte zostały aspekty związane z opracowaniem stanowisk badawczych UTPA wraz z prowadzicami do automatyzacji procesu skanowania spoin.

2.1 Symulacje wiązek ultradźwiękowych

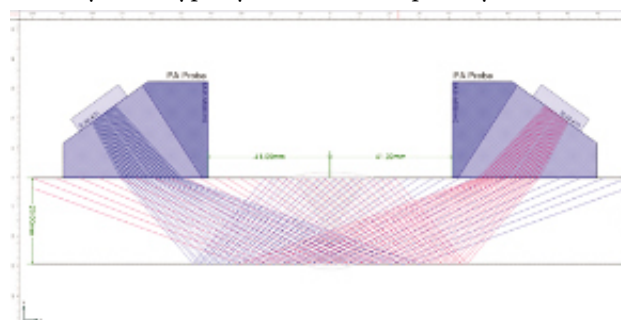
Korzystając z dedykowanego oprogramowania BeamTool v9 do symulacji wiązek ultradźwiękowych w badaniach nieniszczących, przeprowadzono badania mające na celu określenie pokrycia badania spoiny za pomocą typowych głowic Phased-Array z klinem o kącie 55°.

Symulacje przeprowadzono dla próbek złączy spawanych o grubościach: od 15 mm do 29 mm oraz złącza doczołowego typu kołnierzonego CW1 21–23mm. Celem tego etapu było zaprojektowanie tzw. „scan-planów”, które są podstawą do realizacji badań klasyczną metodą UTPA za pomocą aparatury OLYMPUS OmiScan X3. Pokrycie całej spoiny można uzyskać przez optymalizację następujących parametrów:

- apertury głowicy Phased-Array,
- trybu skanowania,
- odchylenia wiązki (zakres kątów).

Obecnie, metodą state-of-the-art do skanowania spoin jest tryb „Compound”, który realizuje jednoczesne przesuwanie apertury nadawczej oraz odchylenie wiązki. Po zdefiniowaniu typu głowicy, klina i parametrów skanowania, oprogramowanie automatycznie wylicza i optymalizuje prawa ogniskowania przy nadawaniu (tzw. focal-law). Dzięki temu możliwe jest uzyskanie 100% pokrycia spoiny przy pojedynczym przyłożeniu głowicy (jednej odległości czoła głowicy od osi spawu). W zależności od grubości blachy należy dobrać optymalną odległość głowicy od osi spoiny, co jak wykazano w symulacjach, było wystarczające do osiągnięcia pokrycia (Rys. 1).

Opracowane scan-plan-y są elementem przygotowanej procedury badań UTPA, która po akceptacji przez klienta, staje się oficjalną instrukcją, wg której prowadzone są badania ultradźwiękowe. W trakcie opracowywania tej oficjalnej procedury, BO przeprowadził niezbędne symulacje dla wszystkich typowych elementów spawanych.



Rys. 1. Symulacja pokrycia wiązkami ultradźwiękowymi przy skanowaniu UTPA typu Compound dla kątów 40°–70° dla głowicy OLYMPUS 5L32 z klinem SA31 55°, aktywna apertura 16-elem (płyta o grubości 29 mm).

Fig. 1. Simulation of ultrasonic beam coverage with Compound PAUT scanning for angles of 40°–70° for OLYMPUS 5L32 probe with SA31 55° wedge, 16-elem active aperture (plate thickness 29 mm).

2.2 Opracowanie procedury badań UTPA

Procedura dotyczy badań pół-automatyzowanych metodą ultradźwiękową z wykorzystaniem techniki wieloprzetwornikowej Phased-Array złączy spawanych pełno-przetopowych stali niskostopowych w zakresie grubości od 6 mm zgodnie z normą EN-ISO-13588.

Przed opracowaniem procedury wykonano następujące prace przygotowawcze:

- Dokonano pełnego przeglądu wymagań i norm technicznych w zakresie badań nieniszczących metodą UTPA, w szczególności:
 - ISO-13588 — Badania nieniszczące spoin. Badanie ultradźwiękowe. Stosowanie zautomatyzowanej techniki głowicy mozaikowej.
 - ISO-18563-1÷3 — rodzina norm: Badania nieniszczące. Charakteryzowanie i weryfikacja aparatury ultradźwiękowej z głowicami wieloprzetwornikowymi.
 - ISO-15626 — Badanie nieniszczące spoin. Technika czasu przejścia wiązki dyfrakcyjnej (TOFD).

Poziomy akceptacji.

- ISO-23279 — Badania ultradźwiękowe. Charakterystyka nieciągłości w spoinach.
- ISO-19285 — Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe techniką głowicy mozaikowej (PAUT). Kryteria akceptacji.
- ISO-17640 — Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe. Techniki, poziomy badania i ocena.
- ISO-11666 — Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe. Poziomy akceptacji.
- Opracowano wstępne wersje procedur sprawdzenia sprzętu oraz badań wyrobów metodą UTPA.
- Opracowano procedury badań wybranych wyrobów wież wiatrowych – tzw. scan-plany.

W procedurze określono: wymagane uprawnienia personelu, poziomy akceptacji badań, wymagania dot. aparatury i głowic oraz ich kalibrację i sprawdzenie, przygotowanie powierzchni i kwestie sprzężenia akustycznego. Procedura jest szczegółowa i liczy ponad 50 stron.

2.3 Walidacja na bazie próbek spoin

Na potrzeby wdrożenia metody UTPA do badań spoin opracowano bazę 172 próbek testowych spawów z różnymi niezgodnościami dla płyt w zakresie grubości 12–65 mm, które zostały przebadane metodami VT, MT/PT, UT, RT, UTPA. Wszystkie próbki z modelowymi wadami/niezgodnościami zostały sklasyfikowane zgodnie z normą ISO-6520 na sześć następujących grup

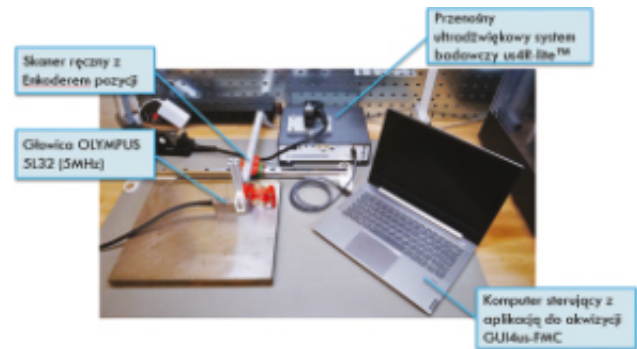
- 1) pęknięcia,
- 2) pustki,
- 3) wtrącenia stałe,
- 4) braki przetopu, przyklejenia,
- 5) niezgodności odchylenia kształtu,
- 6) pozostałe niezgodności spawalnicze.

W każdej z sześciu grup wad/niezgodności znalazło się od 28 do 30 modelowych próbek. Przy tworzeniu grup uwzględniono: 3 grupy asortymentowe x3 najczęściej stosowane metody w każdej grupie asortymentowej x3 najczęstsze rodzaje i grubości materiałów dla każdej metody spawania. Wobec tego według grup asortymentowych liczba skompletowanych próbek modelowych wyniosła: wieże wiatrowe (57), sekcje płaskie jednostek pływających (58), inne konstrukcje typu off-shore (57). W typoszeregu uwzględniono 27 zróżnicowanych grubości stosowanego materiału od 10 mm do 65 mm z analizą liczby wystąpień grubości i rodzajów materiałów specyficznych dla każdej grupy asortymentowej.

Analiza i porównanie wyników badań nieniszczących różnymi metodami z metodą UTPA pozwoliła na jej weryfikację i walidację. Do walidacji użyto także specjalnie wykonanych wzorców (próbek odniesienia zgodnych z normą ISO-13588).

3. Badania metody UTPA-FMC

Do badań metodą UTPA-FMC zastosowano przenośny ultrasonograficzny system badawczy us4R-lite™ (us4us, Polska) w konfiguracji 64:256 kanałowej [3]. System ten



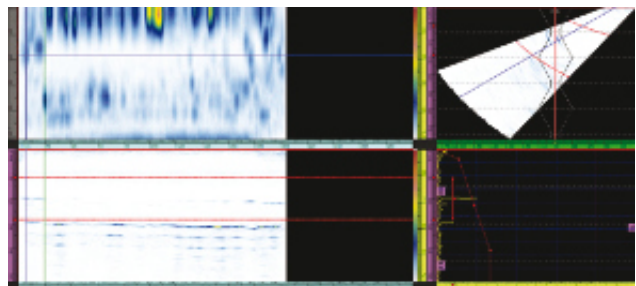
Rys. 2. Laboratoryjny skaner badawczy us4R-lite do badań próbek spoin spawanych dla sekcji płaskich metodą UTPA-FMC.

Fig. 2. Laboratory test scanner us4R-lite for testing weld specimens for flat sections by the UTPA-FMC method

umożliwia podłączenie głowic Phased-Array Olympus — tych samych, które były stosowane z aparatem OmniScan X3. Do wczesnej oceny laboratoryjnej został opracowany ręczny skaner mechaniczny z programowalnym koderem położenia (Rys. 2). Metoda akwizycji ultradźwięków jest definiowana programowo i umożliwia zastosowanie różnych metod (m.in.: UTPA, FMC, Plane-Waves). Surowe dane w.cz. są przesyłane i przechowywane na komputerze PC/notebooku w celu ich dalszego przetwarzania.

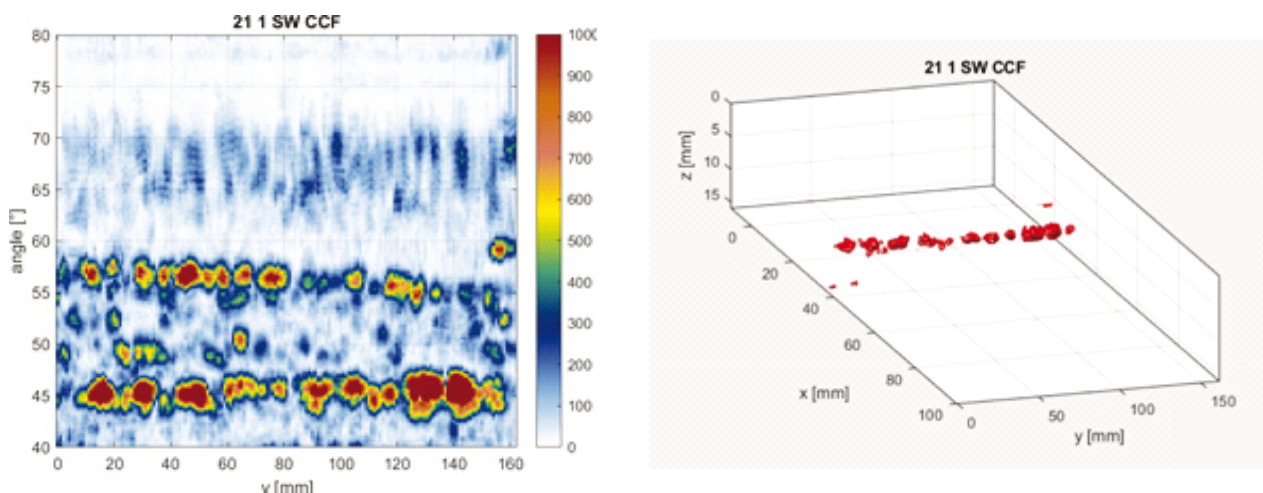
Stanowisko laboratoryjne posłużyło do zebrania zestawu danych FMC dla próbek spawów wykonanych i dostarczonych przez BO. Łącznie zebrano 134 zapisy (67 próbek zapisy dwustronne) o łącznej objętości ok. 350 GB danych surowych. Dane te były wejściem do algorytmów przetwarzania i analizy danych.

Dane FMC pozwalają na zastosowanie metod syntetycznej apertury do rekonstrukcji obrazów — m.in. TFM (Total Focusing Method). Ponadto, w procesie rekonstrukcji można uwzględnić różne mody propagacji i transformacji fal przy odbiciach od powierzchni lub wady. Daje to nowe możliwości obrazowania i analizy niezgodności. Obecnie zaimplementowano jedynie podstawowy tryb propagacji dla fali poprzecznej. Algorytmy zaimplementowano w środowisku MATLAB. Poniżej przedstawiono przykładowe prezentacje wizualizacji uzyskane na próbce testowej (Rys. 3 i 4).



Rys. 3. Wizualizacja wad (A-scan, B-scan, C-scan i S-scan) w oprogramowaniu OLYMPUS OmniPC (dane z aparatu OmniScan-X3) — próbka #21 z pęcherzami gazowymi.

Fig. 3. Visualization of defects (A-scan, B-scan, C-scan and S-scan) in OLYMPUS OmniPC software (data from OmniScan-X3 camera) — sample #21 with gas bubbles.



Rys. 4. Wizualizacja wad dla metody UTPA-FMC: (lewy) C-scan, (prawy) rekonstrukcja 3D — próbka #21 z pęcherzami gazowymi.
Fig. 4. Visualization of defects for the UTPA-FMC method: (left) C-scan, (right) 3D reconstruction — sample #21 with gas bubbles.

3.1 Prędkość akwizycji metodą UTPA-FMC

W projekcie przetestowano także maksymalną prędkość skanowania spoin metodą UTPA-FMC. Należy zwrócić uwagę, że akwizycja surowych danych FMC wymaga bardzo wysokiego transferu danych z urządzenia do komputera PC.

W opracowanym zastosowaniu, oszacowana przepustowość danych FMC to ok. 2 GB/s — dla podwójnej 32-elemowych sondy Phased-Array, próbkowanie 50 MSPS, maksymalna grubość materiału 100 mm, rozdzielczość skanowania 1 mm, prędkość skanowania 100 mm/s, ścieżka ultradźwiękowa full-skip. System badawczy us4R-lite™ może zbierać i przysyłać strumieniowo do 3 GB/s surowych danych, co odpowiada danej aplikacji. Wczesne testy laboratoryjne potwierdziły wydajność systemu. Implementacja rekonstrukcji obrazu w trybie B-mode na procesorach GPU umożliwia przegląd pozyskanych surowych danych FMC. Pełna rekonstrukcja obrazów i prezentacja 3D były realizowane w trybie off-line, ale docelowo możliwe będzie uzyskanie obróbki w czasie rzeczywistym.

4. Podsumowanie

Na dzisiaj osiągnięto już w projekcie zakładane cele dotyczące wdrażania klasycznej metody UTPA do badań spoin spawanych sekcji wież wiatrowych. Obecnie trwają prace związane z montażem prototypowego stanowiska badawczego UTPA wraz z przewodnicami do automatyzacji procesu skanowania złączy spawanych dla sekcji płaskich jednostek pływających.

Wstępnie została zweryfikowana możliwość zbierania surowych danych UTPA-FMC przy skanowaniu z prędkością do 100 mm/sek. w warunkach przemysłowych.

Pokazano, że obrazowanie wad z danych FMC pozwala na uzyskanie nowego spojrzenia w prezentacjach 2D i 3D. Akwizycja surowych danych FMC umożliwia aplikację zaawansowanych algorytmów przetwarzania [4] i retrospektywną analizę danych ech ultradźwiękowych. Niestety, wiąże się to z koniecznością składowania i przetwarzania ogromnych zestawów danych (20GB na 1 m spoiny w tej aplikacji). Mimo wszystko, zespół pozostaje w przekonaniu, że nowe rozwiązania techniczne aparatury w równoległego przetwarzania danych pozwolą na praktyczne wdrożenie testowanych metod w praktyce przemysłowej.

5. . Literatura

- [1] R. Spencer, R. Sunderman, E. Todorov, "FMC/TFM experimental comparisons", AIP Conference Proceedings 1949, 020015 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5031512>.
- [2] P. Tremblay, D. Richard, "Development and Validation of a Full Matrix Capture Solution", 9th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, May 22-24, 2012, Seattle, Washington, USA.
- [3] M. Lewandowski, M. Walczak, B. Witek, J. Rozbicki and T. Steifer, "A GPU-Based Portable Phased-Array System with Full-Matrix Capture", 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2018, pp. 1-3, doi: 10.1109/ULTSYM.2018.8579964.
- [4] M. Sutcliffe et al., "Real-time full matrix capture with auto-focussing of known geometry through dual layered media", 51st Annual Conference of the British Institute of Non-Destructive Testing 2012, NDT 2012. 177-184.