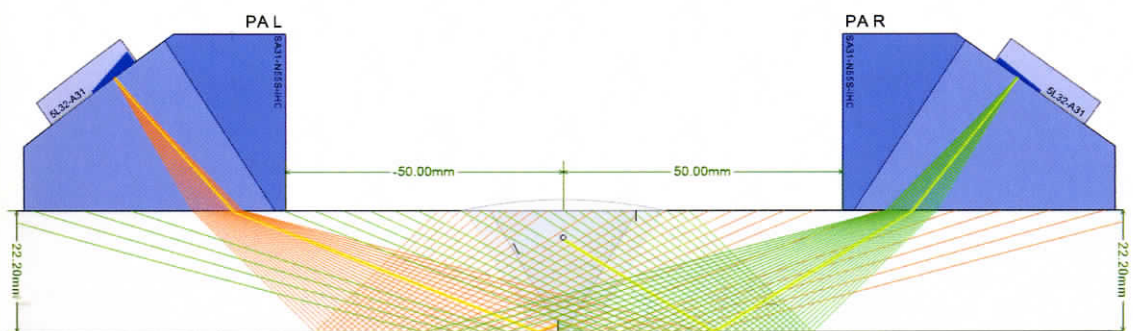
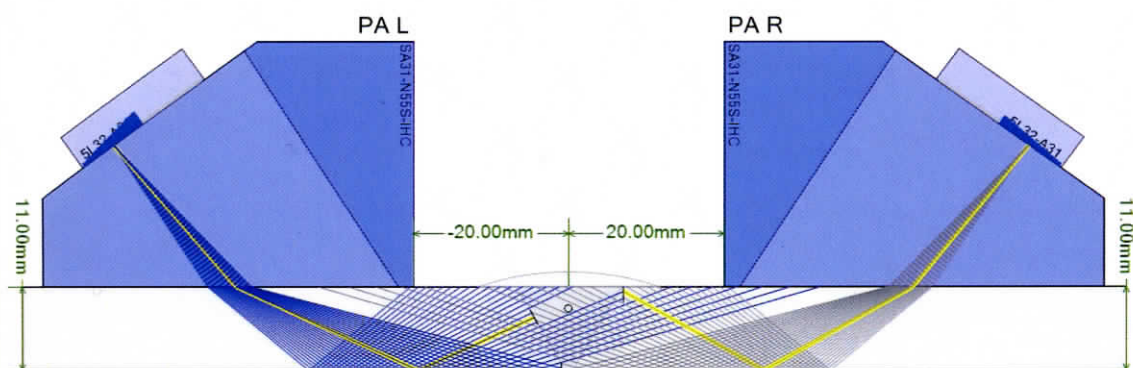


PODSTAWY ZAAWANSOWANEJ TECHNOLOGII PHASED-ARRAY



MAREK ŚLIWOWSKI

Ultradźwiękowe metody badań nieniszczących ulegają w ostatnich latach szybkim i znaczącym zmianom. W pierwszych dekadach XXI wieku w praktyce przemysłowej upowszechniły się nowe techniki ultradźwiękowe takie jak TOFD i phased-array (PA). Techniki te, w znacznie większym stopniu niż techniki tradycyjne, wykorzystują zaawansowane aspekty ruchu falowego takie jak interferencja i dyfrakcja. Oznacza to, że zarówno samo zrozumienie zasady działania tych technik, jak też opanowanie ich praktycznego stosowania wymaga znacznego poszerzenia wiedzy na temat badań ultradźwiękowych.

Monografia „Podstawy zaawansowanej technologii phased-array” autorstwa dr inż. Marka Śliwowskiego stanowi kompleksowy przegląd wszystkich zagadnień dotyczących stosowania techniki phased-array w przemysłowych badaniach nieniszczących. Zaczynając od przypomnienia podstaw fizycznych badań ultradźwiękowych autor wprowadza podstawowe koncepcje techniki phased-array takie jak formowanie wiązki ultradźwiękowej za pomocą głowicy wieloprzetwornikowej, prawa opóźnień czy też elektroniczne sterowanie wiązką w badanym materiale. Następnie, na podstawie materiałów udostępnionych przez czołowego producenta aparatury ultradźwiękowej, autor przedstawia szczegółowy przegląd różnych typów głowic ultradźwiękowych stosowanych w badaniach PA wraz z objaśnieniem ich podstawowych

parametrów. W dalszej kolejności opisywana jest budowa i sposób działania aparatury ultradźwiękowej phased-array oraz zasady jej kalibracji i przygotowania do badań.

W kolejnych rozdziałach autor koncentruje się na szczegółowych aspektach badań techniką PA takich jak sposoby wykonywania skanów, rodzaje uzyskiwanych zobrazowań czy też optymalizacja nastaw parametrów badania pod kątem wiarygodności i dokładności wyników badań.

W obszernym rozdziale 8 autor opisuje praktyczne przykłady zastosowania techniki phased-array do badań różnych obiektów przemysłowych. Przedstawione są przykłady szczególnie trudnych zastosowań dotyczących, m. innymi, badań rur cienkościennych i grubościennych, turbin energetycznych, złączy spawanych oraz ubytków korozyjnych. Szczególną uwagę autor poświęca badaniom spoin obwodowych rurociągów dalekosiężnych, które osobiście prowadził i nadzorował przez wiele lat swojej pracy zawodowej.

Książka przeznaczona jest dla wszystkich specjalistów NDT zajmujących się wykonywaniem badań ultradźwiękowych jako niezastąpione kompendium wiedzy na temat techniki phased-array. W szczególności powinna być ona podstawową lekturą dla operatorów badań ultradźwiękowych przygotowujących się do certyfikacji w zakresie techniki phased-array.

Monografia została zredagowana i przygotowana w języku polskim za przyzwoleniem firmy OLYMPUS na podstawie serii jej opracowań NDT:

The monograph is assembled and prepared in polish language under permission of OLYMPUS group on the base advanced practical NDT series:

“Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications” – second edition 2017

“Introduction in Phased Array Ultrasonic Technology Applications” – fourth edition 2017

Na stronie przedniej okładki zamieszczono plany skanowania głowicami phased-array, wygenerowane przy pomocy oprogramowania Beam Tool 9, za przyzwoleniem firmy ECLIPSE Scientific.

On the front cover are placed scan plans of phased array probes, generated by Beam Tool 9 software, under permission ECLIPSE Scientific.

MAREK ŚLIWOWSKI

**PODSTAWY ZAAWANSOWANEJ
TECHNOLOGII
PHASED-ARRAY**

Podstawy i zastosowania

Korekta techniczna, redakcyjna i doradztwo:

Dr hab. inż. Jacek Szelażek, prof. w IPPT PAN

Dr Sławomir Mackiewicz, specjalista techniczny w IPPT PAN

Mgr inż. Tomasz Katz, specjalista techniczny w IPPT PAN

Recenzent – nota wydawnicza

Dr Sławomir Mackiewicz, specjalista UT3

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej publikacji nie może być powielana i rozpowszechniana w jakiegokolwiek sposób, włącznie z fotokopowaniem, bez pisemnej zgody autora

Współpraca edytorska i wydawnicza

Firma Agata Śliwowska

Skład druk i oprawa:

druk-24h.com.pl

DRUKARNIA CYFROWA

Grabówka, ul. Szosa Baranowicka 77

15-523 Białystok; tel. 85 653-78-04

e-mail: biuro@partnerpoligrafia.pl



15.762

Wydanie I,

Warszawa 2021

www.ksiazka-phased-array.pl

Spis treści

Słowo wstępne	14
Podziękowania	16
Wstęp	18
1. Podstawy konwencjonalnych ultradźwięków w kontekście zastosowań PA-UT	25
1.1. Wstęp	25
1.2. Definicje w ruchu falowym ultradźwiękowym.	25
1.3. Prędkości i długości fal w podstawowych materiałach	26
1.4. Ciśnienie akustyczne fal	28
1.5. Wpływ temperatury na właściwości fal ultradźwiękowych.	33
1.6. Pole ultradźwiękowe	35
1.6.1. Przetworniki kołowe	36
1.6.2. Przetworniki prostokątne	40
1.6.3. Rozbieżność wiązki	42
1.6.4. Ogniskowanie pola wiązki	45
1.6.5. Tłumienie	48
1.7. Interakcje wiązki UT z obiektem/reflektorem	50
1.8. Zależności czasowo-częstotliwościowe	55
1.9. Klasyfikacja głowic w oparciu szerokość pasma BW (charakterystyka tłumienia głowicy)	57
1.10. Wymiarowanie wad z wykorzystaniem technik dyfrakcyjnych oraz konwersji modu	59
1.11. Badanie elementów zakrzywionych	75
1.12. Pomiar długości małych wad	76
1.13. Wiarygodność badania UT	78
2. Główne koncepcje ultradźwiękowej technologii phased-array	82
2.1. Wstęp	82
2.2. Historyczny rozwój i wymagania przemysłowe	82
2.3. Podstawy technologii PA	84
2.4. Formuły opóźnienia lub formuły ogniskowania	91

2.5. Podstawy skanowania i zobrazowania wyników	94
2.6. Wnioski i rekomendacje – podsumowanie	97
2.6.1. Zalety technologii phased-array	97
2.6.2. Ograniczenia	98
2.6.3. Zastosowania technologii PA w problemach badawczych.	101
2.7. Implementacja technologii PA – dlaczego warto wdrażać	104
3. Głowice PA – rozkład i sterowanie polem wiązki	108
3.1. Wstęp.	108
3.2. Materiały piezokompozytowe	108
3.3. Wytwarzanie piezokompozytów	110
3.4. Rodzaje PA w zastosowaniach przemysłowych	113
3.5. Liniowe głowice PA	117
3.6. Dynamiczne ogniskowanie (DDF) głowicy PA	137
3.7. Głowice PA z klinem	139
3.8. Sterowanie wiązką dla głowic PA z klinem.	142
3.9. Głowice PA z matrycą dwuwymiarową 2-D	148
3.10. Kalkulator formuł ogniskowania dla głowic PA	150
3.11. Standardowe głowice PA	153
3.12. Inne charakterystyki głowic PA	153
3.13. Software symulacyjny głowic PA (PASS)	155
3.14. Projektowanie głowic PA	156
3.15. Detale nastaw UT – głowic PA	161
3.16. Charakterystyki i sprawdzanie głowic PA.	166
3.17. Głowice PA – przemysłowe	169
4. Charakterystyka aparatury ultradźwiękowej phased-array. Kalibracja i techniki badawcze	182
4.1. Wstęp.	182
4.2. Prezentacja aparatury PA	182
4.3. Układ nadawczo – odbiorczy aparatury PA	183
4.4. Digitalizacja.	186
4.5. Kalibracja i sprawdzanie aparatury	197
5. Sposoby skanowania i rodzaje zobrazowań	207
5.1. Wstęp.	207
5.2. Sposoby skanowania	207
5.3. Rodzaje zobrazowań UT.	215
6. Przygotowanie systemu i zamiana aparatury	233
6.1. Wstęp.	233
6.2. Nastawy systemu oraz próbki referencyjne używane do oceny systemu.	233

6.3.	Wpływ parametrów głowicy na wykrywalność i wymiarowanie	242
6.4.	Optymalizacja przygotowania systemu badawczego	253
6.5.	Podstawowe parametry nastaw systemu. Zamiana aparatury. Praktyczne tolerancje	258
7.	Wiarygodność techniki PAUT oraz jej wkład w Krytyczną Ocena Inżynierską -ECA	274
7.1.	Wstęp	274
7.2.	Żyjąc z defektami: Koncepcja Dostosowania do Celu oraz wiarygodność ultradźwięków	274
7.3.	Wiarygodność technik PAUT przy wymiarowaniu pęknięć	284
7.4.	Wiarygodność technik PAUT przy wymiarowaniu pęknięć w prętach	289
7.5.	Porównanie technik PAUT z klasycznymi technikami UT	293
7.6.	Wiarygodność technik PAUT przy inspekcjach elementów turbin	296
7.7.	Podejście EPRI przy stosowaniu technik PAUT w badaniach połączeń metali trudnych	306
7.8.	Badanie rurociągów zautomatyzowanymi technikami (AUT) oparte na strefach dyskryminacji.	312
7.9.	Ograniczenia technik PAUT oraz podsumowanie	326
8.	Studia przypadków – trudne zadania badawcze	337
8.1.	Wstęp	337
8.2.	Zaawansowane techniki wymiarowania wad w rurociągach	337
8.2.1.	Ulepszone techniki ogniskowania dla rur cienkościennych	338
8.2.2.	Modelowanie wiązki dla rur cienkościennych	339
8.2.3.	Symulowanie wiązki – PASS dla rur cienkościennych	339
8.2.3.1.	Wymiary plamki pola wiązki	340
8.2.3.2.	Wymiary ogniska pola wiązki	340
8.2.3.3.	Wnioski	341
8.2.4.	Testowanie głowic PA ogniskowanych cylindrycznie.	342
8.2.4.1.	Eksperymentalne zestawy	342
8.2.4.2.	Kliny	343
8.2.4.3.	Nastawy	343
8.2.5.	Wpływ rozbieżności wiązki.	343
8.2.6.	Podsumowanie ogniskowania wiązki w badaniu rur cienkościennych	345
8.3.	Ulepszone techniki ogniskowania dla rurociągów grubościennych	345
8.3.1.	Sposoby ogniskowania dla rur grubościennych	346
8.3.2.	Modelowanie wiązki dla rur grubościennych.	347
8.3.3.	Podsumowanie wyników dla rur grubościennych	349
8.3.3.1.	Wielkość pitcha głowicy PA	349
8.3.3.2.	Kąt klina	349

8.3.3.3. Rozmiar ogniska na różnych głębokościach	349
8.3.3.4. Rozmiar apertury	349
8.3.3.5. Wzrost liczby aktywnych elementów głowicy PA.	349
8.3.3.6. Kontrola miejsc krytycznych	349
8.3.4. Wnioski z modelowania dla rur grubościennych.	350
8.3.5. Aparatura dla rur grubościennych.	350
8.3.6. Wyniki badania głowicami PA 1,5-D dla rur grubościennych	351
8.3.6.1. Bloki kalibracyjne	351
8.3.6.2. Głowice PA 1,5-D na klinie	352
8.3.6.3. Software	352
8.3.7. Nastawy dla rur grubościennych	353
8.3.7.1. Mechanika skanera	353
8.3.7.2. Geometria i parametry wiązki UT	353
8.3.8. Wpływ rozbieżności wiązki – głowice PA 1,5-D oraz 1-D . .	354
8.3.9. Podsumowanie	356
8.4. Kwalifikowanie ręcznych badań głowicami PA dla rur	357
8.4.1. Podstawy	358
8.4.2. Zasady badania	359
8.4.3. Wady obwodowe	359
8.4.4. Wady osiowe	363
8.4.5. Badanie głowicami PA 2-D	365
8.4.6. Bloki kalibracyjne	365
8.4.7. Skanery manualne dla rur	366
8.4.8. Aparatura phased-array	366
8.4.9. Software PA	367
8.4.9.1. Generacja wiązek ogniskowanych	367
8.4.9.2. Analiza danych	367
8.4.10. Formalna kwalifikacja dla sektora nuklearnego	368
8.4.11. Podsumowanie zasad kwalifikacji technologii PA	369
8.5. Badanie rurociągów głowicami phased-array	369
8.5.1. Standardowa dyskryminacja stref w spoinach rurociągów .	369
8.5.1.1. Problemy i wyzwania NDT	369
8.5.1.2. Rozwiązanie dla głowic PA	370
8.5.1.3. Zalety głowic PA w porównaniu do rozwiązań standardowych wielogłowicowych	372
8.5.2. Badanie złączy obwodowych rur bezszwowych	374
8.5.2.1. Problemy i wyzwania NDT	375
8.5.2.2. Rozwiązanie dla głowic PA	375
8.5.3. Badanie złączy obwodowych rur konstrukcyjnych typu „riser” (pionowa) oraz ściąg.	375
8.5.3.1. Problemy i wyzwania NDT	375
8.5.3.2. Rozwiązanie dla głowic PA	375
8.5.3.3. Zalety głowic PA w porównaniu do rozwiązań standardowych wielogłowicowych	376

8.5.4. Badanie złączy obwodowych rurociągów o małych średnicach.	376
8.5.4.1. Problemy i wyzwania NDT	376
8.5.4.2. Rozwiązanie dla głowic PA	377
8.5.4.3. Rozwiązanie dla głowic TOFD	377
8.5.4.4. Korzyści zastosowanych rozwiązań dla głowic PA	377
8.5.5. Badania rurociągów energetycznych ERW przy pomocy głowic PA	379
8.5.5.1. Problemy i wyzwania NDT	379
8.5.5.2. Rozwiązanie dla głowic PA	379
8.5.5.3. Wymagania dla systemów PA	380
8.5.5.4. Badania na stanowiska badawczym (<i>por. Rys. 8.43 oraz por. Rys. 8.44</i>)	381
8.6. Zaawansowane zastosowania w badaniu rur	382
8.6.1. Badanie głównych rurociągów chłodzenia za pomocą głowic PA – złącza rur walcowanych ze stali stopowych.	382
8.6.1.1. Problemy i wyzwania NDT	382
8.6.1.2. Rozwiązania dla wyboru systemu i nastaw głowic PA	382
8.6.2. Badanie z dużą prędkością – złącza rur ze stali stopowych i węglowych.	383
8.6.2.1. Problemy i wyzwania NDT	383
8.6.2.2. Rozwiązanie dla głowic PA	384
8.6.2.3. Rozwiązania dla systemu PA	384
8.6.2.4. Zalety zastosowanego rozwiązania	386
8.6.3. Badanie eksploatacyjne rurociągu zasilającego – wykrywanie pęknięć zmęczeniowych.	386
8.6.3.1. Problemy i wyzwania NDT	386
8.6.3.2. Rozwiązanie dla głowic PA	386
8.6.4. Badania pełnej objętości rur przy pomocy głowic PA (na linii wytwarzania).	388
8.6.4.1. Problemy i wyzwania NDT	388
8.6.4.2. Rozwiązanie dla głowic PA	388
8.6.4.3. Badania na stanowiska badawczym w zakładzie wytwórczym (<i>por. Rys. 8.55</i>)	391
8.7. Zaawansowane zastosowania w badaniu stali austenitycznych	393
8.7.1. Badanie spoin z stali stopowych.	393
8.7.2. Zasady budowy i projektowania głowic piezokompozytowych PA-TRL	393
8.7.2.1. Projektowanie elektroakustyczne	395
8.7.2.2. Charakterystyki i sprawdzenia głowic PA-TRL.	398
8.7.3. Zastosowania przemysłowe piezokompozytowych głowic PA-TRL – inspekcje spoin austenitycznych	399
8.7.3.1. Badanie połączenia typu „nozzle” (rura w rurę) w obiegu pierwotnym	400
8.7.3.2. Badanie spoin typu X o dużej szerokości	405

8.7.3.3. Badanie połączeń materiałów o różnych własnościach – złącza „dissimilar weld”	407
8.7.4. Podsumowanie	409
8.8. Zaawansowane badania turbin niskiego ciśnienia	410
8.8.1. Badanie zamków łopatek energetycznych techniką PAUT.	410
8.8.1.1. Walidacja	411
8.8.1.2. Sterowanie odtwarzalnością – dywersyfikacja	412
8.8.1.3. Sterowanie powtarzalnością – redundancja	412
8.8.2. Inspekcja elementów turbin typu 900 MW.	419
8.8.2.1. Walidacja	421
8.8.2.2. Sterowanie odtwarzalnością – dywersyfikacja	422
8.8.2.3. Sterowanie powtarzalnością – redundancja	422
8.8.3. Badanie eksploatacyjne wirnika i bloku generatora – wykrywanie pęknięć korozji naprężeniowej typu SCC w spoinach wirnika lub pełnego wirnika	434
8.8.3.1. Problemy i wyzwania NDT	434
8.8.3.2. Rozwiązania dla wyboru głowic PA	434
8.8.4. Badanie eksploatacyjne wirnika turbiny niskiego ciśnienia – wykrywanie pęknięć SCC w tarczach prowadzących.	435
8.8.4.1. Problemy i wyzwania NDT	435
8.8.4.2. Rozwiązania dla wyboru głowic PA	435
8.8.5. Badanie eksploatacyjne otworu centralnego wirnika turbiny – wykrywanie pęknięć SCC w wale wirnika	436
8.8.5.1. Problemy i wyzwania NDT	436
8.8.5.2. Rozwiązania dla wyboru głowic PA	436
8.8.6. Badanie eksploatacyjne elementów turbiny niskiego ciśnienia – wykrywanie i wymiarowanie pęknięć SCC.	437
8.8.6.1. Problemy i wyzwania NDT	437
8.8.6.2. Rozwiązania dla wyboru głowic PA	437
8.8.7. Badanie eksploatacyjne wirnika turbiny niskiego ciśnienia – wykrywanie i wymiarowanie pęknięć SCC na krędcach łopatek (zamków)	439
8.8.7.1. Problemy i wyzwania NDT	439
8.8.7.2. Rozwiązania dla wyboru głowic PA	440
8.8.8. Badanie eksploatacyjne wirnika turbiny niskiego ciśnienia – wykrywanie i wymiarowanie pęknięć zmęczeniowych w zamkach łopatek	441
8.8.8.1. Problemy i wyzwania NDT	441
8.8.8.2. Rozwiązania dla wyboru głowic PA	441
8.9. Inspekcja spoin zbiornika ciśnieniowego	442
8.9.1. Kody inspekcyjne dla zbiorników ciśnieniowych	442
8.9.1.1. Ogólne problemy i wyzwania NDT.	444
8.9.1.2. Ogólne uwagi dla wyboru głowic PA	445
8.9.2. System PV-100: skanowanie liniowe techniką TOFD+PE.	445
8.9.2.1. Problemy i wyzwania NDT	445

8.9.2.2. Rozwiązania dla wyboru głowic PE (PA)	446
8.9.2.3. Ograniczenia	446
8.9.3. System PV-200: Wielofunkcyjny system TOFD+PA	446
8.9.3.1. Problemy i wyzwania NDT	446
8.9.3.2. Rozwiązania dla wyboru głowic PA	446
8.9.4. System PV-300: Hipersystem inspekcyjny wykorzystujący klasyczne ultradźwięki oraz układy wieloprzetwornikowe UT i prądów wirowych	448
8.9.4.1. Problemy i wyzwania NDT	448
8.9.4.2. Rozwiązania dla wyboru głowic PA	449
8.9.4.3. Zalety systemu PV-300 (<i>por. Rys. 8.144</i>)	450
8.9.5. Typowe rozwiązania mechaniki przy inspekcji zbiorników ciśnieniowych	451
8.9.6. Badanie zbiornika reaktora atomowego za pomocą głowic PA – złącze króciec – powłoka zbiornika	452
8.9.6.1. Problemy i wyzwania NDT	452
8.9.6.2. Rozwiązania dla wyboru głowic PA	452
8.9.6.3. Korzyści zastosowanych rozwiązań głowic PA	454
8.10. Technika ogniskowania objętościowego dla głowic PA	454
8.10.1. Eksperymentalne porównanie techniki ogniskowania objętościowego z konwencjonalnym ogniskowaniem w strefie	455
8.10.2. Badanie rozdzielczości poprzecznej	457
8.10.3. Badanie próbek referencyjnej w postaci pręta kwadratowego	460
8.10.4. Wnioski	462
8.11. Zastosowania różne	463
8.11.1. Badania eksploatacyjne rurociągów na obecność SCC	463
8.11.2. Badanie złączy kątowych typu T w konstrukcjach mostowych	464
8.11.2.1. Problemy i wyzwania NDT	464
8.11.2.2. Rozwiązania dla wyboru głowic PA	464
8.11.3. Badania pełnej objętości prętów przy pomocy głowic PA	464
8.11.3.1. Problemy i wyzwania NDT	464
8.11.3.2. Rozwiązania dla wyboru głowic PA	465
8.11.3.3. Wymagania dla systemów PA	465
8.11.3.4. Zastosowania na linii produkcyjnej (<i>rys. 8.168, Rys. 8.169, Rys. 8.170</i>)	467
8.11.4. Transport szynowy	468
8.11.4.1. Badanie osi (w zestawie z kołami lub bez)	468
8.11.4.2. Badanie szyn	469
8.11.4.3. Badanie kół	470
Literatura	473

Słowo wstępne

Wiarygodność i pewność technik NDT jest priorytetem stosowanym w inspekcjach, jak też w badaniach o podwyższonych wymaganiach odbiorowych, dotyczących określania resursów czasu pracy obiektów lub ich krytycznych elementów. Dotyczy to między innymi elementów energetycznych o ograniczonym dostępie, konstrukcji z materiałów austenitycznych i trudnospawalnych, itp..

Trendem światowym jest obecnie rozwój technik ultradźwiękowych, w szczególności w oparciu o cyfrową technologię phased-array, która w ostatnich latach zyskała status dobrze dopracowanych rozwiązań aplikacyjnych NDT.

Wymagania dla systemów phased-array dotyczą wykrywania często małych defektów (pęknięć), niezależnie od ich orientacji i przy skanowaniu z dużymi prędkościami. Wiąże się to również z koniecznością optymalnej analizy i raportowania wyników w czasie rzeczywistym badania, często przy obecności inspektorów strony trzeciej. Jest zrozumiałe, że analizowane wyniki muszą charakteryzować dużą wiarygodnością, co wiąże się z kolei z koniecznością prowadzenia prac wdrożeniowych oraz postępowań walidacyjnych samej technologii i specyfikowanych systemów.

Od pewnego czasu polski rynek badań nieniszczących stał się jednym z wiodących w Europie, jeżeli chodzi o wykorzystanie nowoczesnych cyfrowych technik badań nieniszczących – NDT. Dotyczy to w szczególności przemysłu gazowniczego, gdzie inwestor – GAZ-SYSTEM wprowadził wymaganie stosowania cyfrowych technik ultradźwiękowych w 100% (TOFD oraz phased-array) na nowobudowanych rurociągach przesyłowych oraz stacjach gazowych, dla wybranych technologii spawania. Jednocześnie za zgodą inwestora zostały wdrożone zmechanizowane techniki radiografii oparte na rejestracji wyników przy pomocy detektorów cyfrowych.

Z kolei sektor energetyczny i petrochemiczny w Polsce od dłuższego czasu wykorzystuje cyfrowe systemy phased-array w diagnostyce urządzeń (turbiny, generatory pary, reaktory, zbiorniki ciśnieniowe. Itp.), które mają za zadanie zapewnić wiarygodne i szybkie inspekcje, w bardzo napiętych terminach.

Zatem odpowiedź na pytanie czy warto przygotować i opracować w języku polskim stosunkowo obszerną pozycję z zakresu zaawansowanych technologii phased-array oraz stosowanych w świecie rozwiązań aplikacyjnych staje się oczywista.

Autor niniejszego opracowania jest specjalistą stopnia 3-go we wszystkich metodach badań nieniszczących i od ponad 30 lat związany jest z firmą NDTEST, wykonującą usługi badań nieniszczących na rynku polskim. Jest to wiodąca firma NDT w Polsce, skupiająca zespół specjalistów, dzięki którym po raz pierwszy w Polsce wprowadzono zmechanizowane ultradźwięki i radiografię – zarówno w rozwiązaniach analogowych, a później cyfrowych.

Jednocześnie od ponad 20 lat autor zajmuje się szkoleniem i egzaminowaniem personelu NDT w zakresie 1-go i 2-go stopnia, ale przede wszystkim personelu kierowniczego na stopień 3. W czasie tej długoletniej praktyki odczuwa się poważne braki jakichkolwiek nowoczesnych podręczników w języku polskim z zakresu badań nieniszczących, w szczególności w metodzie ultradźwiękowej.

Stąd też płynie nadzieja, że przygotowany materiał będzie pożyteczny w podnoszeniu kwalifikacji specjalistów w cyfrowych technikach ultradźwiękowych, które zaczynają odgrywać pierwszorzędną rolę i znajdują coraz szersze zastosowania w NDT.

Marek Śliwowski

Specjalista Badań Nieniszczących stopnia 3-go w NDT

Wstęp

Rzeczywisty rozwój i zastosowania badań ultradźwiękowych z użyciem aparatury i głowic wieloprzetwornikowych, zwanych w przyjętej nomenklaturze – ultradźwiękową technologią phased-array, osiągnął stan samodzielnej techniki badawczej na początku lat 2000.

Zastosowania przemysłowe technologii phased-array datują się od początku lat 80-tych XX wieku i wywodzą się z obszaru medycyny. W połowie lat 80-tych rozwinięto technologie materiałów piezokompozytowych i pozwoliło to na wytwarzanie głowic phased-array, w bardziej złożonych konfiguracjach.

Zaawansowane rozwiązania technologii piezokompozytów, rozwój mikromechaniki i mikroelektroniki a także mocy obliczeniowej komputerów (pakiety oprogramowania przy produkcji głowic oraz wzajemnej interakcji między elementami matrycy) spowodowały burzliwy rozwój technologii phased-array. Gwałtownie wzrosły też możliwości sterowania interakcyjnego wiązkami phased-array.

Zastosowania ultradźwiękowej technologii phased-array w obszarze badań nieniszczących – NDT były inspirowane różnego rodzaju problemami technicznymi, w inspekcjach obiektów energetycznych:

- Konieczność detekcji pęknięć o różnej orientacji zlokalizowanych na różnych głębokościach przy pomocy pojedynczej nieruchomej głowicy;
- Wymaganie polepszenia stosunku sygnał-szum – SNR oraz możliwości wymiarowania w spoinach z materiałów różniących się oraz stali stopowych (austenitycznych);
- Zapewnienie polepszenia wiarygodności pracy skanerów;
- Zwiększenie możliwości badania trudnodostępnych miejsc elementów reaktorów i zbiorników ciśnieniowych;
- Minimalizacja czasu instalacji zestawu inspekcyjnego oraz czasu badania;
- Możliwość wykrywania małych pęknięć korozji naprężeniowej – SCC w elementach o złożonej geometrii, w turbinach energetycznych;
- Zastąpienie radiografii badaniem ultradźwiękowym, w celu eliminacji wpływu szkodliwego promieniowania na personel badawczy i otoczenie;
- Zwiększone wymagania dokładności wykrywania, lokalizacji, wymiarowania i orientacji krytycznych wad;

- Potrzeba zapewnienia ilościowego raportowania wyników, w ujęciu dostosowanym do celu badania – tzw. FFP (nazywana także w tej książce krytyczną oceną inżynierską -ECA lub strategią oceny „czasu życia” element/obiektu).

Inne rozwinięte sektory przemysłowe w Polsce, takie jak przemysł petrochemiczny, wytwórczy czy obronny wymagają podobnych zabiegów, specyfikowanych dla szczegółowych zastosowań. Jeżeli chodzi o implementację ultradźwiękowej technologii phased-array główne zainteresowania skupiają się wokół podstawowych charakterystyk:

- *Prędkość badania.* Technologia phased-array pozwala na skanowanie elektroniczne, które jest przeważnie o rząd wielkości szybsze niż typowe skanowanie mechaniczne (rastrowe);
- *Elastyczność badania.* Głowice phased-array pozwalają na pokrycie znacznie większego zakresu wprowadzenia i sterowania wiązką ultradźwiękową niż konwencjonalne głowice jedno/dwuprzetwornikowe;
- *Elektroniczne nastawy badania.* Nastawy mogą się odbywać przez proste załadowanie plików kalibracyjnych oraz łatwe sprawdzenie na reflektorach referencyjnych. Dla danego zadania badawczego pliki te mogą być w prosty sposób modyfikowane;
- *Małe wymiary głowic.* Ze względu na dostęp do obiektu użycie głowic phased-array o małych rozmiarach może stanowić dla pewnych zastosowań jedyną alternatywę, w stosunku do jednoprzetwornikowych wielogłowicowych skanerów;

Technologie phased-array charakteryzują się bardzo wysoką wiarygodnością uzyskiwanych wyników i zostały powszechnie uznane jako materiał podstawowy w krytycznej ocenie inżynierskiej – ECA, dla której poświęcono w książce oddzielny rozdział.

Jednocześnie w chwili obecnej obserwuje się burzliwy rozwój produkcji przenośnych, zasilanych akumulatorowo, aparatów phased-array stanowiących jakościowy skok dla zastosowań, jakim stały się aparaty typu OmniScan MX2, a ostatnio X3 wiodącej na tym rynku firmy Olympus. Instrumenty tego typu powoli wchodzić do codziennej praktyki bardziej zaawansowanych inspekcji i pozwalają na szybkie stosowanie również takich specjalnych zastosowań jak mapowanie korozji, szybkie wykrywanie pęknięć, w tym korozji naprężeniowej i międzykrystalicznej. Specjalne rozwiązania przewidziano również do badania materiałów trudnych (duplex) i austenitycznych.

Tym procesom towarzyszyć musi rozszerzony zakres szkolenia i certyfikacji personelu NDT, oparty o zagadnienia zjawisk dyfrakcyjnych (techniki TOFD) oraz phased-array (techniki PA), które stanowią najbardziej nowoczesne trendy

badawcze, w szczególności w zastosowaniach łączenia tych technik oraz w kontekście uzyskiwania jak najbardziej wiarygodnych wyników badania.

Takim celom ma służyć niniejsza monografia, jak się wydaje jedyna w języku polskim, obejmująca tak szeroki zakres wiedzy podstawowej i o zastosowaniach technologii phase-array.

Książka została zredagowana w postaci samodzielnych rozdziałów zawierających:

- **Rozdział 1 – Podstawy konwencjonalnych ultradźwięków w kontekście zastosowań PA-UT**
Rozdział zawiera skrócony przegląd podstaw konwencjonalnych badań ultradźwiękowych dla zaawansowanego wymiarowania. Specjalne tabele i wykresy będą pożyteczne w zastosowaniu do technologii ultradźwiękowej phased-array (szczegóły formuł ogniskowania w zakresie skanowania sektorowego i normalnego, położenie sygnałów po transformacji, osłabienie sygnału, kompensacja kątowa wzmocnienia, rozdzielczość osiowa i poprzeczna wiązki oraz charakterystyki wiązki).
- **Rozdział 2 – Główne koncepcje ultradźwiękowej technologii phased-array**
Rozdział opisuje skróconą historię rozwoju technologii phased-array, zasady dotyczące ultradźwięków w wersji wieloprzetwornikowej, koncepcje czasu opóźnienia (lub formuł ogniskowania) dla głowic phased-array oraz aparaturę PA. Podano techniczne źródła związane z implementacją tej nowej technologii oraz jej zalety.
- **Rozdział 3 – Głowice phased-array (PA) piezokompozytowe**
Rozdział obejmuje zasadnicze aspekty budowy matryc phased-array oraz głowic PA w zastosowaniach do badań ultradźwiękowych. Wyjaśniono sposoby wytwarzania, następnie podano nomenklaturę przetworników typu phased-array i prześledzono fizyczne właściwości wiązek fal realizowanych przy pomocy matryc PA,, a na koniec przedstawione zostały przykłady zastosowań.
- **Rozdział 4 – Charakterystyka aparatury ultradźwiękowej phased-array. Kalibracja i techniki badawcze**
Rozdział zawiera charakterystyki podstawowej aparatury i systemów ultradźwiękowych PA na przykładzie firmy Olympus oraz sposoby jej kalibracji a także różnych technik badawczych z zastosowaniem tych systemów. Określono również szczegółowo tolerancje wyznaczanych cech przyrządów oraz przeprowadzono analizę i objaśnienia.
- **Rozdział 5 – Sposoby skanowania i rodzaje zobrazowań**
W rozdziale omówiono sposoby zautomatyzowanego badania (lub skanowania) oraz typowe modele zobrazowań na przykładzie zastosowań w systemach OLYMPUS.

- **Rozdział 6 – Przygotowanie systemu i zamiana aparatury**

Rozdział przedstawia techniczne elementy związane z przygotowaniem do badania z wykorzystaniem systemu ultradźwiękowego (głowice, aparat i ewentualnie skaner). Szczegółowy podrozdział jest poświęcony próbkom odniesienia (referencyjnym) używanym do oceny przygotowania systemu. Inny podrozdział dotyczy wpływu specyficznych parametrów używanych w kalkulatorze formuł ogniskowania na wykrywanie, lokalizację i wymiarowanie pęknięć. W innej części zajęto się optymalizacją nastaw i analizą wyników. Ostatni podrozdział poświęcony jest tolerancjom przy zamianie aparatów (elementów systemu) ultradźwiękowego.

- **Rozdział 7 – Wiarygodność techniki PAUT oraz jej wkład w Krytyczną Ocenę Inżynierską -ECA**

Rozdział przedstawia techniczne kwestie związane z wiarygodnością ultradźwiękowej technologii phased -array oraz udział PAUT w Krytycznej Ocenie Inżynierskiej (ECA,) stosowany przy tworzeniu wiarygodnych modeli zarządzających długotrwałością pracy konstrukcji z wadami wytwórczymi i/lub nabytymi w czasie eksploatacji. Przedstawiono przykłady z różnych obszarów techniki: nuklearnej (turbiny i elementy turbin) oraz rurociągów.

- **Rozdział 8 – Studia przypadków – trudne zadania badawcze**

Rozdział omawia sposoby rozwiązywania skomplikowanych zadań badawczych (nazywane w nomenklaturze NDT – studiami przypadków), takich jak zaawansowane badania rurociągów ze stali węglowych oraz austenitycznych, badanie połączeń z materiałów różniących się, inspekcje turbin niskiego ciśnienia oraz systemy automatyczne do badania on-line z dużymi prędkościami, badania w kolejnictwie, itp..

Monografia została zredagowana i przygotowana w języku polskim za przyzwoleniem firmy OLYMPUS na podstawie serii jej opracowań NDT:

“Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications” – second edition 2017

“Introduction in Phased Array Ultrasonic Technology Applications” – fourth edition 2017

Z tego powodu autor tej książki zrezygnował z cytowania literatury na końcach poszczególnych rozdziałów. Natomiast na końcu jako pozycje referencyjne literatury przywołano wyżej wymienione pozycje z odwołaniem do literatury cytowanej w tych opracowaniach.

Marek Śliwowski – dr inż. mechanik
Specjalista NDT stopień 3

Literatura

Opracowanie monografii oparto na serii opracowań NDT, przygotowanych przez firmę Olympus:

1. "Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications" – second edition 2017
2. "Introduction in Phased Array Ultrasonic Technology Applications" – fourth edition 2017

Z tego powodu autor tej książki zrezygnował z cytowania literatury na końcach poszczególnych rozdziałów. Natomiast na końcu jako pozycje referencyjne literatury przywołano wyżej wymienione pozycje z odwołaniem do literatury cytowanej w tych opracowaniach.

Ponadto w dobie obecnej informatyzacji nie ma problemu ze znalezieniem wyczerpujących opisów i opracowań dotyczących interesującego tematu poprzez wyszukiwanie internetowe.