Badania Nieniszczące i Diagnostyka

1 - 4 / 2022

Kwartalnik Naukowo-Techniczny

Nondestructive Testing and Diagnostics

49. KKBN

www.kkbn.pl

Rok założenia 2016 PLISSN 2451-4462

20-letnie doświadczenie | Sprawdzony dostawca | Wiedza ekspercka
Profesjonalne doradztwo techniczne
Wykwalifikowani pracownicy | Indywidualne podejście do Klienta

NDT

Urządzenia i systemy do badań nieniszczących metodą:

- Penetracyjną
- Magnetyczno – proszkową
- Prądów wirowych
- Radiografii cyfrowej
- Ultradźwiękową
- Dyfrakcji rentgenowskiej
- Szumów Barkhausena

AUTOMATYKA PRZEMYSŁOWA

- Manometry
- Czujniki
- Enkodery
- Przetwornik
- Termometry
- Przepływomierze
- Separatory
- Sterowniki
- Komponenty bezpieczeństwa

Firma Casp System Sp. z o.o. prowadzi sprzedaż urządzeń i systemów do badań nieniszczących.

Naszymi dostawcami są między innymi Comet Yxlon GmbH, Stresstech, Varex Imaging, ATG, Mitcorp, Binar Handling.

Współpraca z wiodącymi na świecie producentami oraz zdobyte doświadczenie, pozwala oferować najbardziej zaawansowane i innowacyjne rozwiązania zarówno na potrzeby prac badawczych i rozwojowych, jak i dla kontroli produkcji w różnych gałęziach przemysłu.

Oferujemy sprzęt najlepszej jakości, o czym świadczy zadowolenie Klientów oraz liczne wyróżnienia zdobyte w czasie wydarzeń branżowych.

Oferujemy m.in.:

- **systemy radiografii cyfrowej i tomografii komputerowej**
- **urządzenia i systemy ultradźwiękowe**
- **linie FPI**
- **ławy magnetyczne**
- **wiele innych rozwiązań w zakresie badań nieniszczących**

Nasi specjaliści służą swoją wiedzą i doświadczeniem na każdym etapie współpracy. Zapewniamy doradztwo techniczne, projekt oraz montaż urządzeń i systemów do badań NDT.

Naszymi Klientami są firmy m.in. z branży lotniczej, odlewniczej, motoryzacyjnej oraz jednostki badawcze i wojskowe.

Casp System Sp. z o.o.

Przedstawiciel firmy

comet yxlon

stresstech

BINAR | HANDLING

VAREX IMAGING

Advanced Technology Group s.r.o. ATG

Kontakt

ul. Puszkina 2
43-603 Jaworzno

+48 32 614 12 29
+48 728 929 353

ndt@casp.pl
www.caspsystem.pl

Nasze serwisy:

www.caspsystem.pl | www.automatyka24.pl | www.ndt24.pl | www.manometry24.pl | www.czujniki24.pl | www.enkodery24.pl

WYDAWCA/PUBLISHER

Badania Nieniszczące i Diagnostyka
Agenda Wydawnicza SIMP
ul. Sabały 11a, 71-341 Szczecin

e-mail: wydawnictwo@ptbnidt.pl
www.bnid.pl

ZESPÓŁ REDAKCYJNY / EDITORIAL BOARD

REDAKTOR NACZELNY / EDITOR-IN-CHIEF
Tomasz Chady

Z-CY REDAKTORA NACZELNEGO / DEPUTES EDITOR-IN-CHIEF
Adam Sajek
Ryszard Pakos

CZŁONKOWIE REDAKCJI / MEMBERS OF THE BOARD
Jacek Grochowalski
Ryszard Łukaszuk

REDAKTORZY DZIAŁOWI / SECTION EDITORS

METODOLOGIA BADAŃ / RESEARCH METODOLOGY
Sławomir Mackiewicz, Marek Śliwowski
CERTYFIKACJA W BADANIACH / CERTIFICATION IN RESEARCH
Bogdan Piekarczyk
URZĄDZENIA I SYSTEMY BADAŃ
/ EQUIPEMENT AND SYSTEMS FOR RESEARCH
Grzegorz Jezierski, Marek Lipnicki
PRAKTYKA PRZEMYSŁOWA BADAŃ
/ PRACTICE OF INDUSTRIAL RESEARCH
Krzysztof Dragan, Darek Wojdała
DIAGNOSTYKA / DIAGNOSTICS
Bogusław Ładecki,

MIĘDZYNARODOWA RADA PROGRAMOWA
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. Ryszard Sikora, *Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Przewodniczący/President*
Prof. Krishnan Balasubramaniam, *Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India*
Prof. Alexander Balitskii, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*
Prof. Gilmar F. Batalha, *University of Sao Paulo, Brasil*
Prof. Leonard J. Bond, *Iowa State University, USA*
Dr Pierre Calmon, *CEA, France*
Prof. Ermanno Cardelli, *Università degli Studi di Perugia, Italy*
Prof. Zhenmao Chen, *Xi'an Jiaotong University, China*
Prof. Leszek A. Dobrzański, *World Academy of Materials and Manufacturing Eng., Polska*
Dr Hubert Drzeniek, *AMIL Werkstofftechnologie GmbH, Germany*
Prof. Antonio Faba, *Università degli Studi di Perugia, Italy*
Prof. Nikolaos Gouskos, *University of Athens, Grece*
Mgr Paweł Grześkowiak, *UDT, Polska*
Prof. Jerzy Hoła, *Politechnika Wrocławska, Polska*
Prof. Jolanta Janczak-Rusch, *Empa, Switzerland*
Mgr Ryszard Jawor, *Ryszard Jawor Usługi NDT, Polska*
Dr Grzegorz Jezierski, *Politechnika Opolska, Polska*
Inż. Sławomir Jóźwiak, *NDT Systems, Polska*
Mgr Pablo Katchadjian, *National Atomic Energy Commission of Argentina, Argentina*
Mgr Jan Kielczyk, *Energomontaż-Północ, Polska*
Mgr Jacek Kozłowski, *TEST PLB, Polska*
Prof. Marc Kreutzbruck, *University of Stuttgart, Germany*
Dr. Jochen Kurz, *DB Systemtechnik GmbH, Germany*
Mgr Marek Lipnicki, *KOLI, Polska*
Prof. Leonid M. Lobanow, *Paton Welding Institute, Ukraine*
Dr Sławomir Mackiewicz, *NDT SOFT, Polska*
Dr Wojciech Manaj, *Instytut Lotnictwa, Polska*
Dr Tadeusz Morawski, *Usługi Techniczne i Ekonomiczne "Level", Polska*
Prof. Zinoviy T. Nazarchuk, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*
Dr Ryszard Nowicki, *GE Energy, Polska*
Prof. Mohachiro Oka, *Oita National College of Technology, Japan*
Dr Jolanta Radziszewska-Wolińska, *Instytut Kolejnictwa, Polska*
Prof. Helena Maria Geirinhas Ramos, *Instituto Superior Técnico, Portugal*
Prof. Joao M A Rebello, *Federal University of Rio de Janeiro, Brasil*
Prof. Artur Lopes Ribeiro, *Istituto Superior Técnico, Portugal*
Prof. Maria Helena Robert, *University of Campinas, Brasil*
Dr hab. Maciej Roskosz, *Politechnika Śląska, Polska*
Prof. Leonard Runkiewicz, *Instytut Techniki Budowlanej, Polska*
Prof. Krzysztof Schabowicz, *Politechnika Wrocławska, Polska*
Prof. Valentyn R. Skalskyy, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*
Prof. Jacek Słania, *Instytut Spawalnictwa w Gliwicach, Polska*
Prof. Jacek Szelążek, *IPPT PAN, Polska*
Dr Marek Śliwowski, *NDTEST Warszawa, Polska*
Prof. Antonello Tamburrino, *University of Cassino and Southern Lazio, Italia*
Prof. Yuji Tsuchida, *Oita University, Japan*
Prof. Andrzej Tytko, *AGH Kraków, Polska*
Prof. Lalita Udpa, *Michigan State University, USA*
Prof. Gábor Vértesy, *Hungarian Academy of Sciences, Hungary*
Dr Grzegorz Wojas, *UDT, Polska*
Prof. Sławomir Wronka, *Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Polska*
Prof. Chunguang Xu, *Beijing Institute of Technology, China*
Prof. Noritaka Yusa, *Tohoku University, Japan*

KWARTALNIK NAUKOWO-TECHNICZNY AGENDA WYDAWNICZA SIMP

Badania Nieniszczące i Diagnostyka

Nondestructive Testing and Diagnostics

NR 1-4/2022 ISSN 2451-4462 (ONLINE: 2543-7755) VOLUMEN 7

SPIS TREŚCI

Bogusław Olech
Informacja o 49. Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących.....4

Wojciech Szymański
Zastosowanie rentgenowskiej metody pomiaru naprężeń
w diagnostyce przyczyny pękania elementu spawanego turbiny gazowej*.....8

Bogusław Ładecki
Badania diagnostyczne torowiska jazdy mostów przeładunkowych
w systemie zasilania wielkiego pieca*.....15

Adrianna Nidzgorska, Jerzy Perczyński, Marek Chalimoniuk, Artur Kułaszka
Diagnozowanie uszkodzeń BVID w materiałach kompozytowych
metodą tomografii komputerowej (CT)*.....23

Wojciech Dziewiecki, Barbara Ostrowska, Axel Sańczuk
Radiografia w bezpieczeństwie granic prezentacja wyników projektu
pt „CANIS pierwszy polski skaner rtg do bezinwazyjnej inspekcji ładunków
wielkogabarytowych na przejściach granicznych"*.....31

Jerzy Kozłowski, Jakub Kozłowski
Personel nadzoru i kontroli przy pracach antykorozyjnych i izolerskich –
wybrane aspekty*.....39

Dariusz Mężyk, Bogdan Zając, Grzegorz Olszewski, Marcin Kowal
Określenie stopnia wyczerpania struktury i własności mechanicznych wybranych
elementów głównych rurociągów parowych bloków energetycznych*.....44

Marek Śliwowski
Zautomatyzowane badania systemami PA+TOFD - wdrażanie i zastosowania*..50

Krzysztof Schabowicz, A. E. Menéndez Orellana, N. Andrianos
Analysis of selected non-destructive methods for diagnosis
in new and old buildings*.....63

Marek Śliwowski
Analiza porównań biegłości badania złącza spawanego*.....71

Marcin Lewandowski, Jakub Rozbicki, Hanna Smach, Piotr Karwat, Arkadiusz Szczurek, Jolanta Sala, Alicja Bera
Modelowe rozwiązania skanerów UTPA do badań spawów dla wież wiatrowych,
sekcji płaskich oraz konstrukcji wielkogabarytowych on-shore/off-shore*.....89

Jakub Spytek, Kajetan Dziedziech,Łukasz Ambroziński, Łukasz Pieczonka
Obrazowanie wad w strukturach cienkościennych z wykorzystaniem
ultradźwiękowych fal prowadzonych*.....93

Streszczenia artykułów zgłoszonych na 49. KKBN.....97

Informacje BNID - 70 rocznica urodzin Profesora Zinowija Teodorowicza
Nazarchuka.....107

Informacje dla Autorów i Czytelników.....108

* Artykuł recenzowany

PATRONAT I STAŁA WSPÓŁPRACA
PATRONAGE AND PERMANENT COOPERATION

PTBNiDT

INFORMATOR PTBNiDT SIMP

49. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących

Kołobrzeg, 17-20 października 2022

Witamy w Kołobrzegu na 49. Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących

Szanowni Państwo.

Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących (KKBN) była dotychczas corocznym wydarzeniem gromadzącym w jednym miejscu, podczas jednej imprezy, największą liczbę Koleżanek i Kolegów, reprezentujących naukę, przemysł, firmy prywatne i towarzystwa nadzoru technicznego, zajmujące się badaniami nieniszczącymi i niszczącymi, ale też diagnostyką i jakością w zakresie nadzoru technicznego nad urządzeniami, w całym cyklu ich życia od wytworzenia do wycofania z eksploatacji. Tak miało być też z 49. KKBN planowaną na rok 2020. Pandemia i wynikające z niej obostrzenia sanitarne spowodowały, że zamiast w tym roku uczestniczyć w otwarciu 51. KKBN ciągle uczestniczymy w 49. KKBN.

Dla Oddziału Szczecińskiego PTBNiDT SIMP, Kolegów z Komitetu Organizacyjnego i Komitetu Naukowego jest to trzeci rok społecznej pracy organizacyjnej przy przygotowaniach do tej konferencji. W roku ubiegłym, przypominam, zorganizowaliśmy Prolog Elektroniczny 49. KKBN.

W tym miejscu serdecznie dziękuję tym, którzy pomimo wielu przeciwności dotrwali do otwarcia w dniu dzisiejszym części stacjonarnej konferencji.

Szeroki zakres zagadnień służący ocenie bezpieczeństwa i niezawodności pracy urządzeń i konstrukcji będzie tradycyjnie przedmiotem obrad podczas tegorocznej Konferencji.
W ramach konferencji odbędą się:

- sesje wykładowe i sesja plakatowa,
- dwie sesje specjalne po których decyzją Komitetu Naukowego wręczymy nagrody im. Profesora Pawłowskiego i Instytutu Spawalnictwa oraz konkurs organizowany przez TÜV Thüringen Polska Sp. z o.o.,
- wystawa sprzętu, aparatury i wyposażenia badawczego,
- warsztaty

Wieczory będziecie mogli Państwo spędzić na konstruktywnych dyskusjach podczas towarzyskich spotkań przy kolacjach a Członków i Sympatyków Polskiego Towarzystwa Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP serdecznie zapraszamy na zebranie. Szczegółowy program znajdziecie Państwo na stronie konferencji **www.kkbn.pl**

Serdecznie życzę Państwu owocnych obrad i miłego pobytu w Kołobrzegu

Przewodniczący Komitetu Organizacyjnego 49. KKBN

Bogusław Olech

INFORMATOR PTBNiDT SIMP

49. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących

Kołobrzeg, 17-20 października 2022

PTBNiDT

ORGANIZATOR GŁÓWNY:
- **Polskie Towarzystwo Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP Oddział w Szczecinie**

WSPÓŁORGANIZATORZY
- Zarząd Polskiego Towarzystwa Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP
- Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich Oddział w Gorzowie Wielkopolskim
- Polskie Towarzystwo Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP Oddział w Poznaniu
- Wydział Elektryczny, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

KOMITET ORGANIZACYJNY

Przewodniczący Komitetu Organizacyjnego
Bogusław Olech, PTBNiDT SIMP o/Szczecin

Wiceprzewodniczący Komitetu Organizacyjnego
Bogdan Piekarczyk, PTBNiDT SIMP o/Szczecin, członek ZT PTBNiDT SIMP, NDT-doradztwo

Komisarz wystawy
Ryszard Bartz, PTBNiDT SIMP o/Szczecin, PUH TEST Gorzów Wlkp.

Sekretarz Komitetu Organizacyjnego
Rafał Syc, PTBNiDT SIMP o/Szczecin, PGE GiEK SA Oddział ZEDO

Członkowie Komitetu Organizacyjnego
Adam Sajek, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

KOMITET NAUKOWY

Przewodniczący Komitetu Naukowego
dr hab. inż. Grzegorz Psuj, prof. ZUT, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Sekretarz Komitetu Naukowego
dr hab. inż. Przemysław Łopato, prof. ZUT, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Członkowie Komitetu Naukowego
prof. dr hab. inż. Piotr Bielawski, Akademia Morska w Szczecinie
prof. dr hab. inż. Tomasz Chady, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
płk dr hab. inż. Krzysztof Dragan, prof. ITWL
dr Barbara Grochowalska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
dr inż. Jakub Kowalczyk, Politechnika Poznańska
dr hab. inż. Ryszard Krawczyk, prof. Politechniki Częstochowskiej
dr hab. inż. Maciej Roskosz, prof. AGH, Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie
prof. dr hab. inż. Krzysztof Schabowicz, Politechnika Wrocławska
prof. dr hab. inż. Jacek Słania, Sieć Badawcza ŁUKASIEWICZ – Instytut Spawalnictwa Gliwice
dr inż. Dariusz Ulbrich, Politechnika Poznańska

Radiografia przemysłowa

www.ndt-system.com.pl

Waygate Technologies
a Baker Hughes business

DXR140P-HC

Duży system obrazowania o wysokim kontraście do radiografii ogólnego przeznaczenia

Idealny do monitorowania korozji w przemyśle naftowym i gazowym oraz w energetyce, detektor DXR140P-HC daje wysoki kontrast. A dzięki zwiększonej czułości dawki pozwala na krótsze czasy ekspozycji i większą przepustowość.

DXR140P-HC może być używany z promieniowaniem rtg lub gamma i jest odpowiedni do ogólnych zastosowań radiograficznych, takich jak:

- **kontrola eksploatacyjna w przemyśle naftowym i gazowym oraz w energetyce:**
  - badanie korozji pod izolacją
  - pozycjonowanie zaworów
  - pomiar grubości ścianki
  - badanie podpór rurociągów
  - badanie rur kotłowych
- **kontrola odlewów**
- **konserwacja, naprawa i przeglądy w lotnictwie**
- **przemysł zbrojeniowy i bezpieczeństwo**
- **kontrola konstrukcji:**
  - beton, mosty, podpory, …
- **nauka, sztuka i archeologia**

kontrola linii energetycznych, kontrola

www.ndt-system.com.pl

DXR100P-HP

Duży system obrazowania o wysokiej wydajności do większości zastosowań

Detektor DXR100P-HP daje wysoką rozdzielczość pikseli 100 µm, dlatego może obejmować oba światy: kontrole w przemyśle naftowym i gazowym, ale też kontrolę spoin klasy B według ISO 17636-2.

DXR100P-HP może być używany z promieniowaniem rtg lub gamma i nadaje się do szerokiego zakresu różnych zastosowań, takich jak:

- **kontrola spoin w przemyśle naftowym i gazowym oraz w energetyce i lotnictwie:**
  - rurociągi transportowe
  - złożone konstrukcje (odcinki rurociągu)
  - rury kotłowe i ciśnieniowe
  - przewody paliwowe
  - zbiorniki ciśnieniowe i magazynowe
- **kontrola spoin w okrętownictwie**
- **kontrola eksploatacyjna w przemyśle naftowym i gazowym oraz w energetyce:**
  - badanie korozji pod izolacją i pomiar grubości ścianki
  - pozycjonowanie zaworów
  - badanie podpór rurociągów
- **kontrola odlewów**
- **konserwacja, naprawa i przeglądy w lotnictwie**
- **przemysł zbrojeniowy i bezpieczeństwo**
- **kontrola konstrukcji**

Wojciech Szymański*
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Metali Nieżelaznych Oddział w Skawinie

Zastosowanie rentgenowskiej metody pomiaru naprężeń w diagnostyce przyczyny pękania elementu spawanego turbiny gazowej

Application of the X-ray method of stress measurement in the diagnosis of the cause of cracking of the welded element of the gas turbine conveyor after a fire

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono metodykę diagnostyki przyczyn pękania detalu turbiny gazowej w miejscu połączenia spawanego dwóch stopów żarowytrzymałych. Wykonano rozkład naprężeń w okolicy złącza spawanego po wykonaniu elementu, co pozwoliło określić przyczynę pękania. Próby wyżarzania i odprężania wibracyjnego, nie przyniosły spodziewanych efektów. W dalszej części pracy przeprowadzono pomiary naprężeń łączonych spoiną elementów detalu na kolejnych etapach jego wytwarzania, co pozwoliło na określenie, w którym momencie produkcji powstają krytyczne naprężenia będące przyczyną przedwczesnego pękania w czasie pracy turbiny. Poprawa technologii produkcji eliminująca niekorzystny rozkład naprężeń pozwoliła na uzyskanie oczekiwanego czasu pracy turbiny bez awarii.

***Słowa kluczowe**: naprężenia własne; pomiar naprężeń; diagnostyka, pekanie.*

ABSTRACT

The paper presents the methodology of diagnostics of the causes of cracking of a gas turbine detail in the place of a welded joint of two heat-resistant alloys. The stress distribution in the area of the welded joint was made after the element was made, which allowed to determine the cause of the cracking. Attempts at annealing and vibration stressing did not bring the expected results. In the further part of the work, measurements of the stresses of the elements connected by welding were carried out at subsequent stages of its production, which allowed to determine at which point in production critical stresses arise, which cause premature fracture during the operation of the turbine. The improvement of the production technology eliminating the unfavourable stress distribution allowed to obtain the expected working time of the turbine without failure.

***Keywords**: residual stresses; stress measurement; diagnostics, cracking.*

1. Wstęp

Jedną z istotniejszych cech materiału pozwalającą określić jego przydatność do określonych zadań, zarówno jako pojedynczego przedmiotu jak i integralnej części konstrukcji, są występujące w nim naprężenia. Naprężenie własne jest rodzajem naprężenia sprężystego, które jest obecne w materiale w stałej temperaturze i braku oddziaływania sił zewnętrznych, pozostają one po ustąpieniu działania przyczyny ich powstawania. Występują z wielu różnych powodów, takich jak np. nieelastyczne deformacje (piaskowanie, kulkowanie), obróbka cieplna, obróbka skrawaniem, obróbka chemiczna (nawęglanie, azotowanie), łączenie elementów konstrukcji i inne. Naprężenia własne, które mogą być rozciągające lub ściskające są zamknięte w materiale w wyniku jego historii. Są one bardzo ważne, ponieważ mogą być duże pod względem wielkości, a jako składowe mogą się dodawać (lub odejmować) do naprężeń spowodowanych przez siły przyłożone.

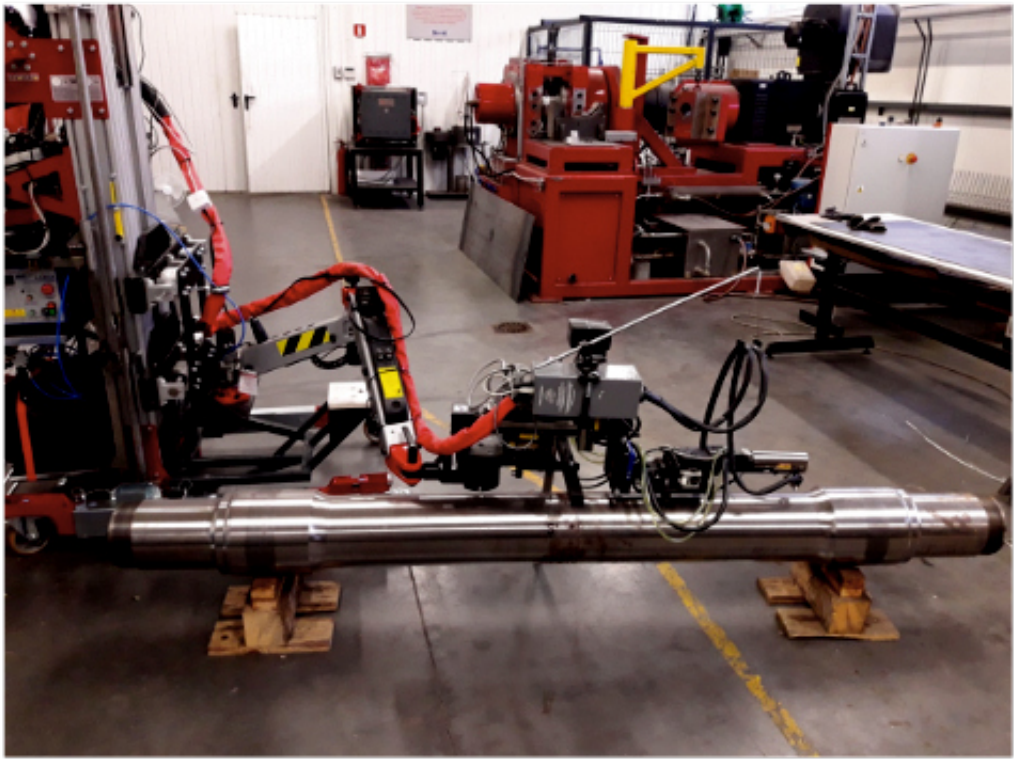
Praktycznie wszystkie metody pomiaru naprężeń własnych, ograniczają się do pomiaru naprężeń w warstwie wierzchniej badanego materiału. Z jednej strony jest to korzystne gdy chcemy określać jakość zabiegów powierzchniowych takich jak kulowanie, czy nagniatanie lub procesów obróbki skrawaniem, z drugiej strony, gdy chcemy poznać stan naprężeń w głębi materiału to musimy usuwać kolejne jego warstwy mając na uwadze, że samo usuwanie może mieć wpływ na stan naprężeń pozostałego materiału.

Spośród wielu metod pomiaru naprężeń, najczęściej wykorzystywanymi do badania części maszyn i konstrukcji są metody nieniszczące. Wśród nich za dające najdokładniejsze wyniki uznaje się metody rentgenowskie.[1]

Metody rentgenowskie opierają się na pomiarze zmian odległości międzypłaszczyznowych. Pod wpływem obciążeń powodujących odkształcenie w materiale dochodzi do przesunięć elementów struktury krystalicznej. Zmiany

*Autor korespondencyjny.
E-mail: Wojciech.Szymanski@imn.lukasiewicz.gov.pl

Published by „Badania Nieniszczące i Diagnostyka" Publishing Agenda of SIMP
DOI: 10.26357/BNID.2022.001



Rys. 1. Dyfraktometr rentgenowski PROTO iXRD w trakcie pomiaru naprężeń w osi kolejowej [18].
Fig. 1. The X-ray diffractometer PROTO iXRD during stress measurement on the railway axis [18].

odstępu płaszczyzn dhkl mogą być miernikiem naprężeń, co stanowi fundament metod rentgenowskich.[2, 3]. Z szeregu metod rentgenowskich obecnie najczęściej stosowana jest metoda $\sin^2\psi$. Jest ona realizowana za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego. Istotą tej metody jest określenie zmian odległości międzypłaszczyznowych w sieci krystalicznej materiału pod wpływem sił w nim występujących.

Metody rentgenowskie mierzą naprężenia w warstwie o grubości około 10-20 µm, nie wymagają stosowania wzorców, a jedynie znajomości stałych materiałowych takich jak moduł Younga i współczynnik Poissona. Pomiar naprężeń dokonywany jest w określonym kierunku, co pozwala na wyznaczanie tensora naprężeń. Rozdzielczość metody to nawet poniżej 0.5 mm^2. Są one znane od wielu lat, jednak nie są zbyt często stosowane, zwłaszcza w przemyśle, gdy z dużą nieufnością podchodzi się do otrzymanych nimi wyników. Próbę walidacji potwierdzającą zgodność wyników pomiaru naprężeń metodą rentgenowską przedstawiono na konferencji Diagnostyka Materiałów i Urządzeń Technicznych [4]. Badania te potwierdziły również zjawisko sumowania się naprężeń pochodzących od różnych sił przyłożonych (szlifowanie i siła rozciągająca).

Instytut Metali Nieżelaznych Oddział Metali Lekkich w Skawinie od lat prowadzi badania naprężeń metodą rentgenowską. Są to zarówno prace o charakterze badawczym [5-11], jak i prace aplikacyjne pozwalające np. na zweryfikowanie stosowanej technologii lub kontrolę wyrobu [12-16]. Ostatnio coraz większym zainteresowaniem cieszą się pomiary naprężeń wykonywane w celu dostarczenia danych do tworzenia modeli matematycznych procesów technologicznych [17].

W niniejszej pracy zostanie przedstawiona metodyka diagnostyki przyczyn pękania detalu turbiny gazowej w miejscu połączenia spawanego dwóch stopów żarowytrzymałych.

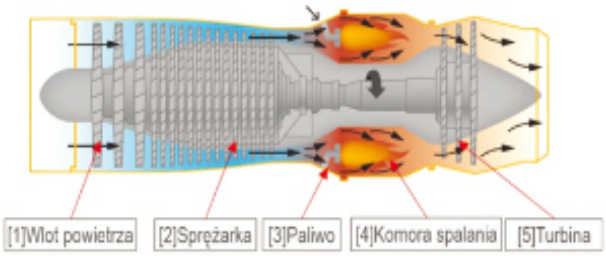
2. Aparatura

Pomiary naprężeń metodą rentgenowską detalu turbiny gazowej przeprowadzono dyfraktometrem rentgenowskim produkcji firmy PROTO Manufacturing Ltd. – Jest to przenośny dyfraktometry rentgenowski, w pełni skomputeryzowany, służący jedynie do pomiaru naprężeń własnych i zawartości austenitu szczątkowego. Został on zintegrowany z manipulatorem przejezdnym (rys. 1). Pomiar i wykorzystana metoda obliczeniowa wykonywane wg własnej procedury badawczej laboratorium (PB-N wyd. III z dnia 08.12.2016) były zgodne ze standardami: SAE J84a i ASTM E915. Wielkość padającej wiązki wynosiła 1mm, a efektywna głębokość wnikania wynosiła około 7 µm.

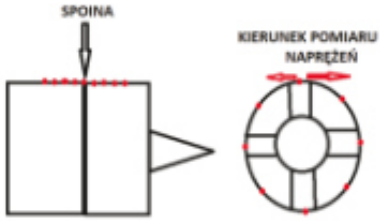
3. Opis zagadnienia

Turbina gazowa (rys. 2) swoją konstrukcją i zasadą działania przypomina znany z samolotów i śmigłowców silnik turbowałowy.

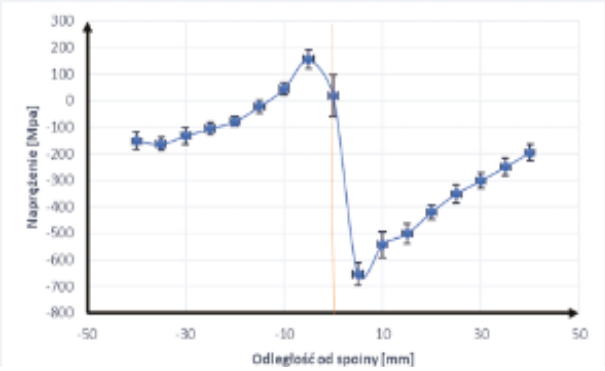
Problemem, który wystąpił u producenta jednego z detali turbiny gazowej było występujące po krótkim czasie prób (około 10% założonego czasu po którym detal powinien być nadal sprawny) pękanie w pobliżu połączenia spawanego dwóch stopów żarowytrzymałych.



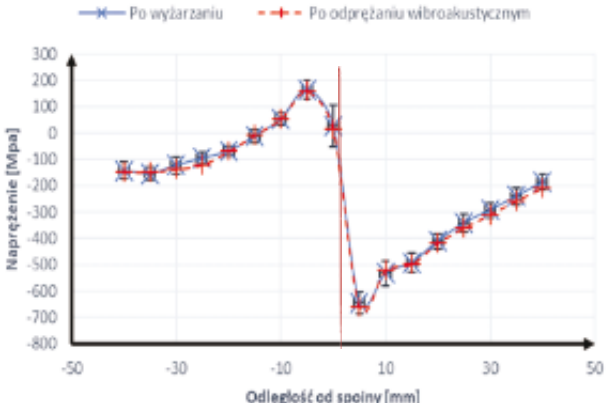
Rys. 2. Przykładowy schemat turbiny gazowej [19].
Fig. 2. An example of a gas turbine diagram [19].



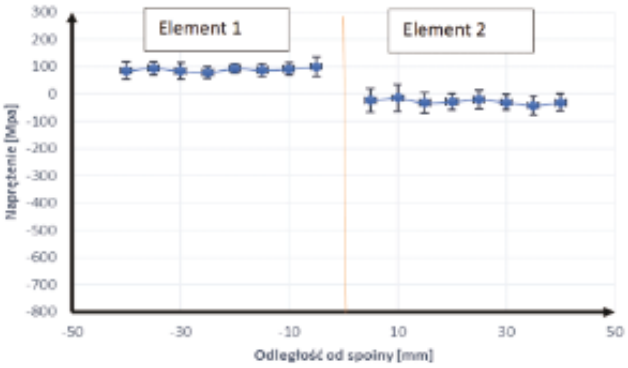
Rys. 3. Schemat położenia punktów pomiaru naprężeń w detalu turbiny gazowej.
Fig. 3. Diagram of the location of the stress measurement points in a gas turbine detail.



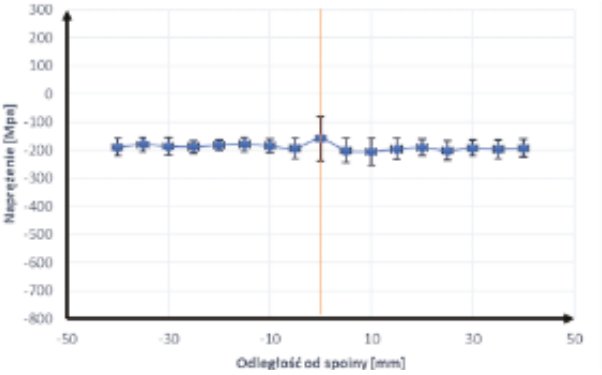
Rys. 4. Rozkład naprężeń w detalu turbiny gazowej. Wyniki uśrednione na obwodzie.
Fig. 4. Stress distribution in a gas turbine detail. Results averaged around the circumference.



Rys. 5. Rozkład naprężeń w detalu turbiny gazowej po wyżarzaniu i po obróbce wibroakustycznej.
Fig. 5. Stress distribution in a gas turbine detail after annealing and after vibroacoustic treatment.



Rys. 6. Rozkład naprężeń w elementach detalu turbiny gazowej przed ich połączeniem.
Fig. 6. Stress distribution in parts of the gas turbine detail before joining them.

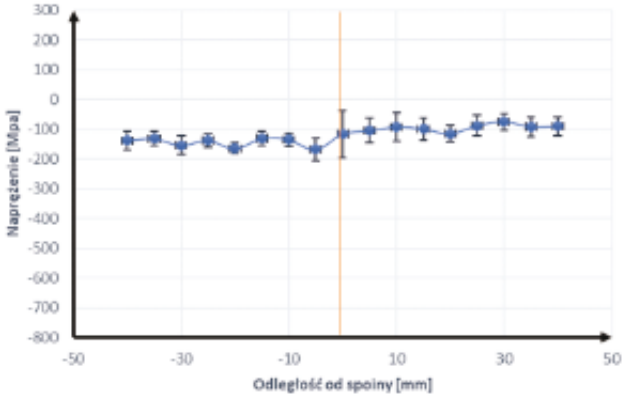


Rys. 7. Rozkład naprężeń w elementach detalu turbiny gazowej po spawaniu i szlifowaniu powierzchni.
Fig. 7. Stress distribution in parts of the gas turbine after welding and surface grinding.

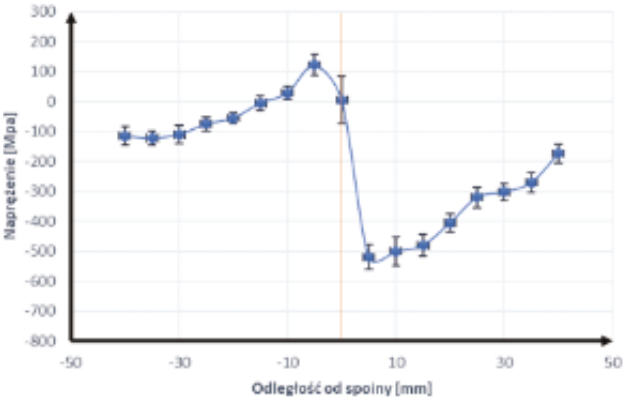
Pierwszy pomiar naprężeń wykonany według rysunku 3 wykazał znaczny gradient naprężeń obwodowych w obszarze przyspoinowym (rys. 4). Uznano, że to właśnie tak wysoki (około 800 MPa) gradient naprężeń jest odpowiedzialny za pękanie detalu. Początkowo podjęto próby zmniejszenia gradientu naprężeń poprzez wyżarzanie i obróbkę wibroakustyczną (rys. 5). Oba te zabiegi nie przyniosły istotnych zmian w rozkładzie naprężeń i ich gradient w obszarze spoiny pozostawał na poziomie około 800 MPa.

4. Badania

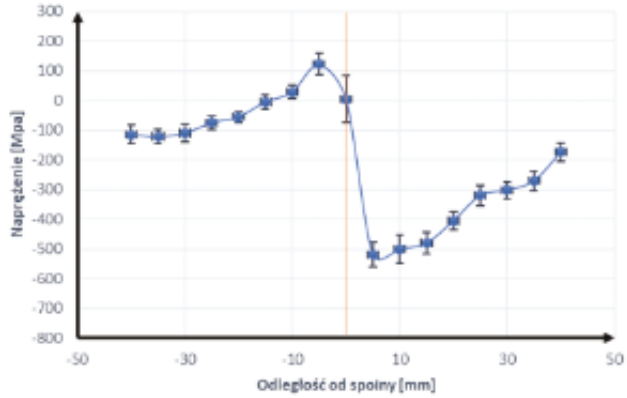
W celu określenia przyczyny powstawania tak wysokiego gradientu naprężeń postanowiono wykonywać pomiary rozkładu naprężeń w elementach detalu turbiny gazowej na kolejnych etapach procesu produkcji. Najpierw zmierzono naprężenia w elementach przed spawaniem i stwierdzono, że nie występują w nich gradienty naprężeń a różnica w poziomie naprężeń pomiędzy elementami wynosi około 100 MPa (rys. 6). Następnie oba elementy zostały ze sobą połączone spoiną, a ich powierzchnię wyszlifowano. Po pomiarze rozkładu naprężeń nie stwierdzono występowania gradientu naprężeń, natomiast zmierzone naprężenia były naprężeniami ściskającymi (rys. 7), co było najprawdopodobnie efektem szlifowania i co jest bardzo korzystne dla konstrukcji.



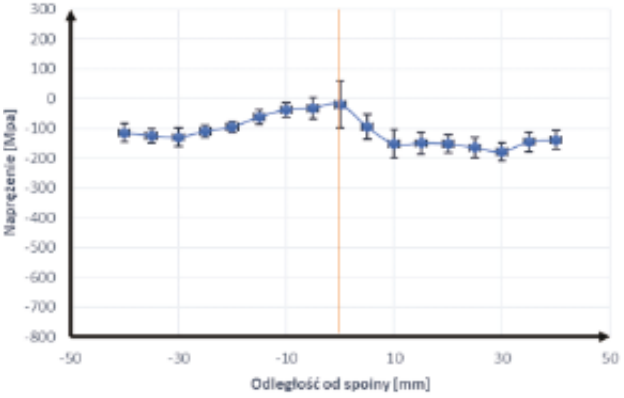
Rys. 8. Rozkład naprężeń w elementach detalu turbiny gazowej po pierwszej operacji technologicznej po spawaniu i szlifowaniu powierzchni.
Fig. 8. Stress distribution in gas turbine detail elements after the first technological operation after welding and surface grinding.



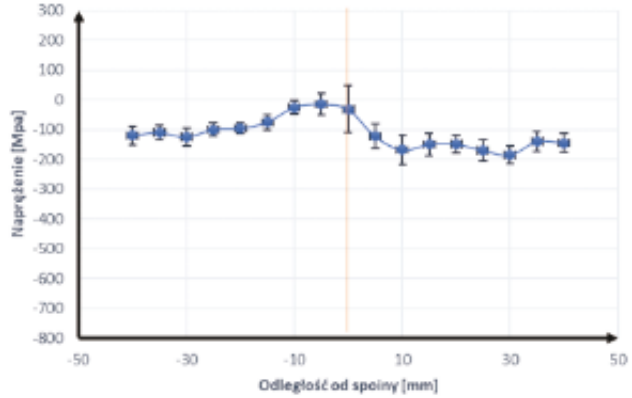
Rys. 9. Rozkład naprężeń w elementach detalu turbiny gazowej po drugiej operacji technologicznej po spawaniu i szlifowaniu powierzchni.
Fig. 9. Stress distribution in gas turbine detail elements after the second technological operation after welding and surface grinding.



Rys. 10. Rozkład naprężeń w elementach detalu turbiny gazowej po trzeciej operacji technologicznej po spawaniu i szlifowaniu powierzchni.
Fig. 10. Stress distribution in gas turbine detail elements after the third technological operation after welding and surface grinding.



Rys. 11. Rozkład naprężeń w elementach detalu turbiny gazowej po skorygowaniu drugiej i trzeciej operacji technologicznej po spawaniu i szlifowaniu powierzchni.
Fig. 11. Stress distribution in parts of the gas turbine after correcting the second and third technological operations after welding and surface grinding.



Rys. 12. Rozkład naprężeń w gotowym detalu turbiny gazowej po poprawie.
Fig. 12. Stress distribution in parts of the gas turbine detail before joining them.

Kolejne operacje technologiczne procesu produkcyjnego polegające na wycinaniu otworów i dodawaniu kolejnych elementów konstrukcji detalu turbiny gazowej spowodowały zmianę rozkładu naprężeń przedstawioną na rysunkach 8, 9 i 10. Jak widać na rysunku 8 po pierwszej operacji technologicznej po spawaniu i szlifowaniu nie nastąpiła istotna zmiana w rozkładzie naprężeń.

Natomiast druga operacja technologiczna wytworzyła gradient naprężeń około 700 MPa (rys. 9), który został powiększony po 3 operacji technologicznej do około 900 MPa (rys. 10).

Po przeprowadzeniu szeregu poprawek procesu produkcji detalu na etapach 2 i 3 korygowanych wynikami pomiaru naprężeń uzyskano po etapie trzecim gradient naprężeń w obszarze okołospoinowym w granicy 200 MPa (rys. 11) utrzymany do końcowego etapu produkcji (rys. 12).

5. Podsumowanie

- Pomiar naprężeń metodą rentgenowską okazał się skutecznym narzędziem diagnostycznym do kontroli konstrukcji urządzeń.
- Dzięki bieżącej kontroli stanu naprężeń można sterować procesem produkcyjnym tego typu konstrukcji w celu uzyskania jak najkorzystniejszych jej parametrów.

6. Literatura

[1] E. Kula, V. Weiss, „Residual Stress and Stress Relaxation", 1982 Plenum Press New York.

[2] I.C. Noyan, J.B. Cohen, „Residual Stress Measurment by Diffraction and Interpretation", Springer-Verlag New York 1987.

[3] A. Pszonka, J. Ziaja, „Rentgenograficzne metody pomiaru naprężeń", Prace Naukowe Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1971.

[4] W. Szymański, M. Lech-Grega. „Validation of the X-Ray Stress Measurement Method" Advances In Materials Science (ISSN: 1730-2439), Vol.42, No.4, 2014.

[5] M. Lech-Grega, A. Kłyszewski, „Aparat Strainflex PSF-2M do pomiaru naprężeń własnych i austenitu szczątkowego", Hutnik, lipiec 1991

[6] M. Lech-Grega, W. Szymański, „Zastosowanie rentgenowskiej metody pomiaru naprężeń własnych w badaniach nieniszczących.", XVI Sesja naukowa okrętowców cz. II str.137, Szczecin-Dziwnówek, 1994.

[7] M. Lech-Grega, W. Szymański, „X-Ray Residual Stress Measurement in 7020 Alloy Welded Jionts", 2003 TMS 132nd Annual Meeting & Exhibition, San Diego, California, USA

[8] M. Lech-Grega, K. Mazurkiewicz, W. Szymański, „Zmęczenie materiału a stan naprężeń własnych w obszarze okołospoinowym złącz spawanych ze stopu AlZnMg". Krajowa Konferencja Dobór i eksploatacja materiałów inżynierskich Jurata, 22-25 września 1997.

[9] M. Lech-Grega, J. Kusnerz, W. Szymański, „Naprężenia własne w złączach spawanych ze stopu AlZnMg", VII Ogólnopolska Konferencja pt. Metale Nieżelazne w Przemyśle Okrętowym; Szczecin Międzyzdroje , 12-14 września 1996, Mat. Konf. str. 115-122 .

[10] L. Fajkiel., M. Lech-Grega, W. Szymański, „Naprężenia własne w warstwie wierzchniej formy ciśnieniowej pod wpływem oddziaływań ciekłego stopu aluminiowego", Konf. Naukowa Nowe Materiały – Nowe Technologie Materiałowe w Przemyśle Okrętowym i Maszynowym Szczecin-Świnoujście, wrzesień 1998.

[11] A. Jurcius, A.V. Valiulis, O. Cernasejus, K.J. Kurzydłowski, A. Jaskiewicz, M. Lech-Grega, „Influence of wibratory stress relief on residual stresses in weldment and mechanical properties of structural steel joint", Vibromechanika, Journal of Vibroenergineering, March 2010, vol. 12, str.133-141.

[12] W. Szymański, M. Lech-Grega, M. Gawlik, „Ocena stanu naprężeń szczątkowych w warstwie nawęglanej kół zębatych", Sprawozdanie IMN nr 7066/II/2013.

[13] W. Szymański, „Opracowanie metody oceny skuteczności obróbki wielkogabarytowych odlewów z żeliwa EN-GJS-500-7", Sprawozdanie IMN nr 7255/14.

[14] W. Szymański, M. Lech-Grega, M. Gawlik, „Ocena zmian stanu naprężeń w taśmie ze stali nierdzewnej w trakcie procesu prostowania", Sprawozdanie IMN nr 7254/14.

[15] W. Szymański, „Ocena wpływu obróbki skrawaniem i obróbki cieplnej na stan naprężeń w walcach ze staliwa L 200HNM", Sprawozdanie IMN nr. 7441/15.

[16] Wojciech Szymański, Marzena Lech-Grega, Maciej Gawlik, Adam Kokosza, Adam Chochorowski, „Measurement of residual stresses in hot-rolled steel sheets for laser cutting", Computer Methods in Materials Science, Krynica; 11-15 stycznia 2015, str. 251-257.

[17] A.Milenin, R.Kuziak, M.Lech-Grega, A.Chochorowski, S.Witek, M.Pietrzyk, „Numerical modeling and experimental identification of residual stresses in hot-rolled strips"; Archives of Civil and Mechanical Engineering 16 (2016) 125 – 134.

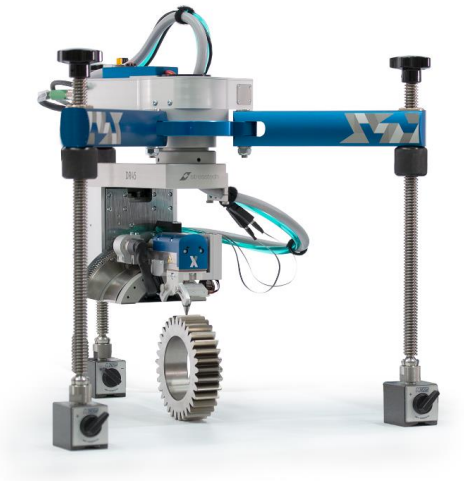
[18] W. Szymański, „Pomiar naprężeń własnych w osiach kolejowych metodą rentgenowską wg PN-EN 13261+A1 2011", Badania nieniszczące i diagnostyka, vol. 4, str. 23-26, 2018.

[19] https://eneria.pl/blog/turbina-gazowa-czym-jest-i-jak-dziala

NDT DORADZTWO
Bogdan
PIEKARCZYK
Tel.: 601 534 991 E-mail: bogdan.piekarczyk.ndt@gmail.com

Zakres działalności firmy:

- Prowadzenie nadzorów inwestorskich nad badaniami NDT wykonywanymi na gazociągach przesyłowych, gazoportach i innych konstrukcjach
- Szkolenia personelu w metodach badań NDT.
- Przygotowanie personelu do certyfikacji i recertyfikacji wg PN-EN ISO 9712
- Weryfikacja personelu i laboratoriów wg wymagań Zamawiającego
- Doradztwo techniczne w zakresie wykorzystania różnych metod badań NDT
- Zatwierdzanie, opiniowanie, opracowywanie procedur badawczych
- Doradztwo w zakresie wdrażania normy PN-EN ISO/IEC 17025
- Przygotowywanie laboratoriów do akredytacji



XSTRESS

Dyfraktometry Xstress przeznaczone do pomiarów naprężeń i austenitu szczątkowego. Metoda zapewnia użytkownikom wiarygodność danych przy ocenie kontroli jakości.

ANALIZA SZUMU BARKHAUSENA

Rozwiązanie do badań nieniszczących znajduje zastosowanie przy weryfikacji procesów obróbki cieplnej i wykrywania przypaleń szlifierskich.

PRISM 3

System Elektronicznej Interferometrii Plamkowej (ESPI) z układem wiercenia otworów do pomiaru naprężeń szczątkowych.

Casp System jest wyłącznym dystrybutorem firmy Stresstech w Polsce

Kontakt:

Ul. Puszkina 2
43-603 Jaworzno

Tel: 32 614 12 29
ndt@casp.pl
www.ndt24.pl

Bogusław Ładecki*
AGH w Krakowie, KPiEM

Badania diagnostyczne torowiska jazdy mostów przeładunkowych w systemie zasilania wielkiego pieca

Diagnostics tests of the track of transshipment bridges in the blast furnace power supply

STRESZCZENIE

Dążenie do neutralności klimatycznej, a co za tym idzie do ograniczenia emisji CO_2 jest przyczyną znacznego wzrostu kosztów produkcji stali. Wskutek ograniczonych nakładów finansowych na naprawy i modernizacje następuje istotne zużycie infrastruktury przemysłu hutniczego w Polsce. W następstwie powyższego, utrzymanie w zadowalającym stanie technicznych niektórych obiektów technicznych związanych z produkcją stali rodzi szereg problemów eksploatacyjnych. W niniejszej publikacji przedstawiono kompleksowy program badań diagnostycznych, którym poddano torowisko jazdy mostów przeładunkowych w systemie zasilania Wielkiego Pieca zastosowany w jednej z polskich hut. W pracy omówiono wyniki przeprowadzonych kontroli i badań nieniszczących torowisk, belek, oraz podpór wraz z geodezyjnymi pomiarami geometrii torowiska. Uzyskane wyniki badań, w połączeniu z wynikami pomiarów trwałych deformacji torowiska, stanowiły podstawę do zaprojektowania odpowiednich wzmocnień, oraz przeprowadzenia rekonstrukcji rozważanego torowiska jazdy mostów przeładunkowych.

***Słowa kluczowe**: wielki piec; torowisko; badania diagnostyczne; badania nieniszczące.*

ABSTRACT

Striving for climate neutrality, and thus for reducing CO2 emissions, is the reason for a significant increase in the cost of steel production. As a result of limited financial outlays on repairs and modernisation, there is a significant wear and tear on the infrastructure of the metallurgical industry in Poland. As a consequence of the above, the maintenance in a satisfactory technical condition of certain technical facilities related to the production of steel raises a number of operational problems. This publication presents a comprehensive program of diagnostic tests, which was subjected to the track of transshipment bridges in the Blast Furnace power supply system used in one of the Polish steelworks. The paper discusses the results of inspections and non-destructive tests of tracks, beams, and supports along with geodetic measurements of track geometry. The obtained test results, combined with the results of measurements of permanent deformation of the track, were the basis for designing appropriate reinforcements and reconstructing the considered track of transshipment bridges.

***Keywords**: blast furnace; track; diagnostics tests; non-destructive testing*

1. Wstęp

Wzdłuż składowiska surowców i topników Wielkiego Pieca (WP) eksploatowanego w jednej z polskich hut zlokalizowane są torowiska o rozstawie 76,5 m i długości 672 m, po których przemieszczają się mosty przeładunkowe. Aktualny schemat usytuowania torowisk jazdy mostów przeładunkowych, z przyjętym w dalszej części pracy nazewnictwem zilustrowano na rys. 1. Torowisko podpory długiej mostów umiejscowione jest na cokole żelbetowym ściany oporowej kanału rozładowczego – rys. 1, zlokalizowanej od strony południowej. Ściana oporowa ciągnie się na całej długości składowiska i kanału rozładowczego (650 m). Torowisko składa się z dwóch szyn dźwigowych typu SD-100, które są rozstawione w osiach o 760 mm. Na początku dla osi 0-7 szyny ułożone są na podkładach drewnianych, oraz dalej (osie 7-146) stalowych zabetonowanych w cokole żelbetowej ściany oporowej. Rozkład podkładów wynosi 400 mm. Co drugi podkład mocowany jest śrubami do konstrukcji ściany oporowej. Szyny SD-100 mocowane są do podkładów za pomocą śrub, pośrednio poprzez podkładkę stalową, która zwykle przynitowana jest do stopy szyny (niekiedy zamiast nitowania stosowano proces spawania). Podkładka stalowa w postaci taśmy ma zwykle wymiary 15 x 270 mm, oraz długość odpowiadającą długościom odcinków szyn SD-100.

Torowisko podpory krótkiej mostów umiejscowione jest na estakadzie zasobników dozujących surowce i topniki do WP – rys. 1. Torowisko to posadowione jest na konstrukcji wsporczej, różniącej się na trzech odcinkach. Pierwsza część torowiska w osiach 0-46 jest posadowiona na estakadzie żelbetowej, podkłady stalowe na których spoczywają szyny SD-100 zabetonowane są w estakadzie, a co drugi podkład mocowany jest do konstrukcji estakady śrubami kotwowymi. Dla drugiej część torowiska w osiach 46-132 szyny spoczywają na belkach stalowych o długości $L = 4570$ mm, które wsparte

*Autor korespondencyjny.
E-mail: boglad@agh.edu.pl

Published by „Badania Nieniszczące i Diagnostyka" Publishing Agenda of SIMP
DOI: 10.26357/BNID.2022.002

Rys. 1. Schemat usytuowania torowiska jazdy mostów przeładunkowych – na podstawie zdjęcia satelitarnego Google [1].
Fig. 1. Diagram of the location of the track of transhipment bridges – based on Google satellite image [1].

są na konstrukcji żelbetowej zasobników. Trzecia część torowiska w osiach 132-148 spoczywa również na belkach stalowych, które z kolei wsparte są na słupach stalowych o konstrukcji kratowej rozstawionych co 4570 mm. Słupy stalowe na tym odcinku torowiska zastępują żelbetową konstrukcję wsporników estakady zasobników WP. Szyny typu SD-100 drugiej i trzeciej części torowiska mocowane są wraz z podkładką stalową wprost do belek stalowych przy pomocy śrub.

Torowisko wykonano prawdopodobnie w 1959 r., a w trakcie eksploatacji wykonywano wielokrotnie prace remontowe tj.: wykonanie wzmocnień belek jezdnych, wykonanie kompleksowego remontu torowisk i in., jednak długi okres eksploatacji, w połączeniu z dążeniem do neutralności klimatycznej, a co za tym idzie do ograniczenia emisji CO_2 jest przyczyną znacznego wzrostu kosztów produkcji stali, co przekłada się na ograniczanie nakładów finansowych na naprawy i modernizacje urządzeń technicznych. Wskutek tego następuje istotne zużycie infrastruktury przemysłu hutniczego, którego przykładem jest zły stan techniczny rozważanego torowiska pozostającego w eksploatacji, dla którego konieczne było opracowanie niezbędnego zakresu badań diagnostycznych opisanych w dalszej części pracy, które stanowić mogą podstawę do wykonania niezbędnych prac remontowych odnośnie do możliwości dalszego bezpiecznego użytkowania mocno wyeksploatowanego obiektu.

2. Kontrola torowiska podpory długiej

W zakres kontroli torowiska podpory długiej mostów przeładunkowych wchodziło wykonie przeglądu obu szyn SD-100 wraz z pasem podszynowym, oraz mocowaniem śrubowym i nitowym, jak również wykonanie pomiarów szerokości główki szyn, wraz z tzw. „wypływką plastyczną" materiału główki w kierunku poziomym po obu stronach główki szyn – na tej podstawie obliczono efektywną wartość szerokości główki szyn, jako różnicę szerokości główki minus sumaryczna wartość wypływki plastycznej.

Na podstawie przeprowadzonych oględzin torowiska podpory długiej, stwierdzono jego zróżnicowany stan techniczny. Niezadowalający stan techniczny torowiska stwierdzono: w osiach 0-7 gdzie znacznej destrukcji uległa większość podkładów drewnianych, w osiach 144-146 gdzie stwierdzono znaczne nasilenie zjawisk korozyjnych z licznymi perforacjami podkładów stalowych – rys. 2,

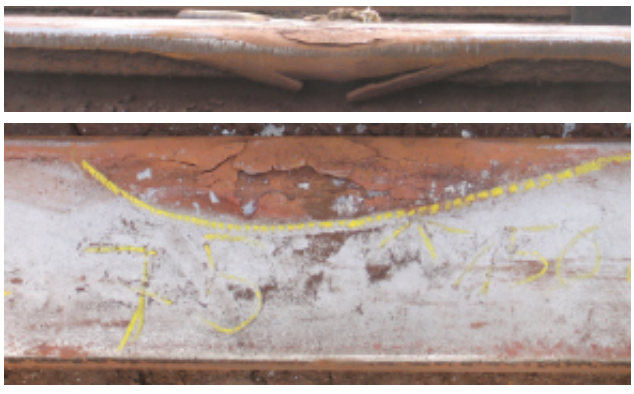
Rys. 2. Liczne perforacje i znaczne pocienienie elementów torowiska podpory długiej w osiach 144-146 [1].
Fig. 2. Numerous perforations and significant thinning of the elements of the long support track in axes 144-146 [1].

w osiach 20-44 stwierdzono znaczny stopień skorodowania bocznych blach stalowych podkładów torowiska osiągający 50-80% grubości nominalnej, oraz dla osi 138-144 stwierdzono znaczny stopień skorodowania w górnej nie zabetonowanej części podkładów stalowych.

Jednocześnie na całej długości torowiska stwierdzono występowanie licznych uszkodzeń takich jak: brak śrub, nitów i wkrętów do drewna, luźne śruby, nity i wkręty, pęknięcia - rys. 3 i wykruszenia szyn – rys. 4, ścięte spoiny, wzajemne przesunięcia pionowe i poziome styku sąsiednich szyn znacznie przekraczające wartości dopuszczalne zgodnie z wymaganiami normy [2] – rys. 5, jak również występowanie kilku rozległych defektów główki szyn, będących prawdopodobnie wadami materiałowymi – rys. 6. Ogółem dla torowiska podpory długiej stwierdzono występowanie 1182 różnych uszkodzeń.

Pomiary stopnia zużycia główki szyn wykonane na podstawie efektywnej wartości szerokości główki wykazały ich zadowalający stan techniczny, przy czym maksymalne zużycie nie przekraczało: dla szyny zewnętrznej +3,0% (103,0 mm) i -4,2% (95,8 mm), natomiast dla szyny wewnętrznej +3,8% (103,8 mm) i -3,4% (96,6 mm).

Rys. 3. Pęknięcie o długości 370 mm główki szyny torowiska podpory długiej po stronie zewnętrznej torowiska pomiędzy osiami 74-75 [1].
Fig. 3. The 370 mm long crack of the long support track rail head on the outer side of the track between axles 74-75 [1].



Rys. 4. Wykruszenia o długości 75 mm z deformacjami trwałymi główki szyny torowiska stwierdzone po stronie wewnętrznej torowiska podpory długiej pomiędzy osiami 75-76 [1].
Fig. 4. The 75 mm long chipping with permanent deformations of the track rail head found on the inner side of the track of the long support between axles 75-76 [1].

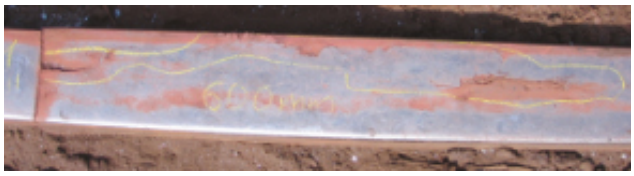
3. Kontrola torowiska podpory krótkiej

W zakres kontroli torowiska podpory długiej mostów przeładunkowych wchodziło wykonanie przeglądu obu szyn SD-100 wraz z pasem podszynowym, oraz mocowaniem śrubowym i nitowym, po przeprowadzeniu demontażu blach osłonowych torowiska. Wykonano również pomiary szerokości główki szyny podobnie jak dla torowiska podpory długiej.

Na podstawie przeprowadzonych oględzin, na całej długości torowiska stwierdzono występowanie licznych uszkodzeń takich jak: braki śrub i nitów, luźne śruby i nity, pęknięcia i wykruszenia szyn, wzajemne przesunięcia pionowe i poziome styku sąsiednich szyn przekraczające wartości dopuszczalne zgodnie z wymaganiami normy [2], jak również występowanie innych uszkodzeń tj. deformacje i pęknięcia płaskowników ustalających szyny torowiska – rys. 7, pęknięcia stopy szyny od nita – rys. 8 i in. Ogółem dla torowiska podpory krótkiej stwierdzono występowanie 1741 różnych uszkodzeń.

Pomiary stopnia zużycia główki szyn wykonane na podstawie efektywnej wartości szerokości główki wykazały, że maksymalne zużycie nie przekraczało: dla szyny zewnętrznej +3,9% (103,9 mm) i -6,5% (93,5 mm), natomiast

Rys. 5. Wzajemne przesunięcie pionowe o $\Delta V = 6$ mm i poziome o $\Delta H = 5$ mm styku szyn z deformacjami główki szyny stwierdzone po stronie wewnętrznej torowiska podpory długiej pomiędzy osiami 51-52 [1].
Fig. 5. Mutual vertical displacement by $\Delta V = 6$ mm and horizontal by $\Delta H = 5$ mm of rail contact with rail head deformations found on the inner side of the long support track between axes 51-52 [1].



Rys. 6. Rozległy defekt o długości 600mm będący prawdopodobnie wadą materiałową ze znacznymi deformacjami trwałymi główki szyny stwierdzony dla torowiska podpory długiej po stronie wewnętrznej pomiędzy osiami 80-81 [1].
Fig. 6. Extensive defect with a length of 600 mm which is probably a material defect with significant permanent deformations of the rail head found for the long support track on the inner side between the 80-81 axes [1]

.

Rys. 7. Deformacja o strzałce *f*=85 mm oraz pęknięcie na ok. 40% przekroju płaskownika ustalającego szyny torowiska podpory krótkiej pomiędzy osiami 28-29 [1].
Fig. 7. Deformation with an arrow *f* = 85 mm and cracking on approx. 40% of the cross section of the flat bar fixing the rails of the short support track between the axes 28-29 [1].

Rys. 9. Trwała deformacja o strzałce f=38mm na długości 800 mm nadmiernie pocienionej górnej półki belki wewnętrznej od strony belki zewnętrznej w środku rozpiętości belki pomiędzy osiami 131-132 [1]
Fig. 9. Permanent deformation with an arrow f=38mm on a length of 800 mm of excessively thinned upper shelf of the inner beam from the side of the outer beam in the middle of the beam span between the axes 131-132 [1].

Rys. 8. Pęknięcie stopy szyny o długości 95 mm od otworu nitu stwierdzone dla wewnętrznej szyny torowiska podpory krótkiej pomiędzy osiami 45-46 [1].
Fig. 8. The 95 mm long rail foot break from the rivet bore found for the inner track rail of the short support track between axles 45-46 [1]

Rys. 10. Deformacje, perforacje i ubytki korozyjne dochodzące lokalnie do 90% stwierdzone dla wszystkich elementów stężających belki torowiska pomiędzy osiami 121-127,5 – obszar belki pomiędzy szynami zasypany skamieniałym pyłem [1].
Fig. 10. Deformations, perforations and corrosion defects of up to 90% locally found for all elements concentrating the track beam between axes 121-127.5 – the area of the beam between the rails covered with petrified dust [1].

dla szyny wewnętrznej +3,1% (103,1 mm) i -6,1% (93,9 mm)

4. Kontrola belek konstrukcji wsporczej torowiska podpory krótkiej

Jako konstrukcję wsporczą dla torowiska podpory krótkiej mostów przeładunkowych w osiach 46-146 zastosowano belki stalowe o konstrukcji blachownicowej. W zakres przeprowadzonej kontroli wchodziły oględziny, oraz pomiary ubytków korozyjnych z wykorzystaniem techniki ultradźwiękowej. Pomiary grubości wykonano dla wszystkich belek w środku ich rozpiętości, ogółem w ośmiu punktach pomiarowych dla każdej belki: po dwa pomiary dla górnych i dolnych półek od ich strony wewnętrznej w przekroju belki w środku połowy półki, oraz po dwa pomiary dla każdego środnika w odległości ok. 1/8 wysokości środników w przekroju belki od górnej i dolnej półki.

Analiza wyników pomiarów grubości półek belek wykazała, że wartości ubytków grubości są zróżnicowane i dla górnych półek w licznych obszarach umiejscowionych pomiędzy osiami 110-131 przekraczają wartość 25% osiągając wartości maksymalne: dla belki zewnętrznej 46,6% dla osi 121-122 i dla belki wewnętrznej 39,4% dla osi 131-132, przy czym w tym przypadku stwierdzono występowanie rozległych trwałych deformacji górnego pasa belki w środku jej rozpiętości o strzałce *f* = 38 mm na długości ok. 700 mm - rys. 9, znacznie przekraczających wymagania normy [3], co może wskazywać na wyczerpanie nośności wzmiankowanego elementu dla ubytków grubości bliskich 40% w środku rozpiętości belki. W przypadku dolnych półek belek nasilenie ubytków grubości jest znacząco niższe niż dla górnych półek i dla obu półek dolnych nie przekraczało 30%.

Analiza wyników pomiarów grubości środników belek nośnych wykazała, że w górnej części środników ubytki grubości zwykle nie są duże i osiągają lokalnie maksymalne wartości: dla belki zewnętrznej 31,2% dla osi 74-75 i dla belki wewnętrznej 59,3% dla osi 126-127. W dolnej części środników, blisko dolnej półki nasilenie ubytków grubości jest znacznie większe niż w górnej. Dla licznych obszarów pomiędzy osiami 76-119 i 145-146 ubytki przyjmują wartości przekraczające 30% i osiągają maksymalne wartości: dla belki zewnętrznej 48,6% dla osi 98-99, oraz dla belki wewnętrznej 61,3% dla osi 104-105.Przeprowadzone oględziny belek stanowiących konstrukcję wsporczą dla torowiska podpory krótkiej mostów wykazały, że dla większości belek, ich stan techniczny uznać należy jako niezadowalający lub zły. Wykonane oględziny belek, wykazały występowanie: poluzowania lub urwania śrub w połączeniach śrubowych belek, oraz śrub mocowania belek do estakady żelbetowej, skutkujące niekiedy przemieszczeniem poziomym lub opadaniem belek, występowanie licznych uszkodzeń elementów stężających belki tj. brak elementów, perforacje, deformacje i odspojenia – rys. 10, oraz innych uszkodzeń.

Rys. 11. Odspojenie dolnego końca i deformacja krzyżulca od strony wewnętrznej o strzałce f = 33mm pomiędzy słupami w osiach 135-136 [1].
Fig. 11. Detachment of the lower end and deformation of the cross from the inside with an arrow f =33 mm between the columns in axes 135-136 [1].

Rys. 12. Deformacje, perforacje i ubytki korozyjne dochodzące lokalnie do 90% stwierdzone dla wszystkich elementów stężających belki torowiska pomiędzy osiami 121-127,5 – obszar belki pomiędzy szynami zasypany skamieniałym pyłem [1].
Fig. 12. Deformations, perforations and corrosion defects of up to 90% locally found for all elements concentrating the track beam between axes 121-127.5 – the area of the beam between the rails covered with petrified dust [1].

Ogółem dla belek konstrukcji wsporczej torowiska podpory krótkiej stwierdzono występowanie 263 różnych uszkodzeń.

5. Kontrola belek konstrukcji wsporczej torowiska podpory krótkiej

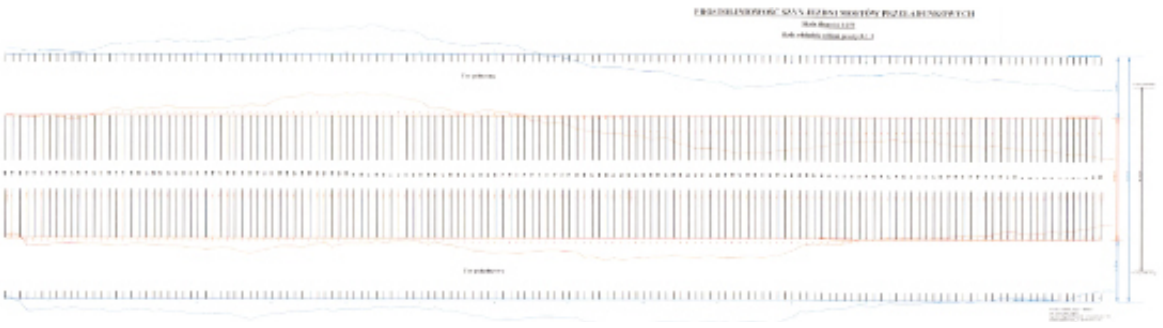
Przeprowadzona kontrola 19 szt. słupów stalowych torowiska podpory krótkiej mostów, dla większości słupów wraz z elementami stężającymi wykazała ich niezadowalający stan techniczny. Dla większości słupów stwierdzono występowanie uszkodzeń tj. trwałe deformacje licznych prętów znacznie przekraczające wymagania normy [3] – rys. 11, odspojenia blach węzłowych – rys. 12, a w jednym przypadku znaczne trwałe deformacje dolnej półki belki słupa. W przypadku elementów stężających słupy, stwierdzono brak licznych poziomych prętów stężających, liczne zdeformowane i odspojone pręty, jak również występowanie perforacji prętów i blach węzłowych. Wykonane oględziny ujawniły również występowanie licznych usterek w obszarze zewnętrznej powierzchni belek stalowych podtorza, gdzie stwierdzono występowanie licznych rozległych perforacji żeberek usztywniających połączenia śrubowe belek, perforacje zewnętrznych żeber usztywniających belki i inne. Ogółem w słupach torowiska podpory krótkiej stwierdzono występowanie 96 różnych uszkodzeń.

6. Pomiary geometrii torowiska

Pomiary geodezyjne kształtu torów jezdni jazdy mostów przeładunkowych wykonano zgodnie z wytycznymi [4].

W trakcie prac przygotowawczych zmierzono rozstaw słupków osiowych (trolei) podpory krótkiej, a następnie rozmierzono torowisko podpory długiej realizując pomierzone rozstawy podpory krótkiej. Niwelację szyn torów podpór długiej i krótkiej dowiązano do reperu zakładowej sieci wysokościowej w układzie odniesienia Amsterdam.

Zmierzone odchyłki szyn toru podpory krótkiej zawierały się w granicach od – 101 mm do + 138 mm, natomiast podpory długiej od + 67 mm do 202 mm. Pomiar prostoliniowości szyn obu torów wykonano metodą tachimetryczną. Pomiar oparto na założonej bazie pomiarowej rozciągniętej wzdłuż podpory długiej torowiska, składającej się z sześciu punktów bazowych i wyznaczonych szesnastu sygnałach zaznaczonych na barierkach pomostu podpory krótkiej. Po wyrównaniu i obliczeniu współrzędnych sygnałów, posłużyły one do nawiązania pomiarów sytuacyjnych ustawienia szyn obu podpór. Na podstawie pomierzonych współrzędnych szyn torów obu podpór obliczono rozstaw szyn wewnętrznych torowiska i odchyłki od linii prostej tychże szyn.



Rys. 13. Prostoliniowość szyn jezdni mostów przeładunkowych [1].
Fig. 13. Straightness of road rails of transhipment bridges [1].

Rys. 14. Niwelacja szyn jezdni mostów przeładunkowych [1].
Fig. 14. Leveling of road rails of transhipment bridges [1].

Wyniki wykonanych pomiarów i obliczeń zestawiono na rysunkach [1]: prostoliniowość szyn jezdni mostów przeładunkowych – rys. 13, oraz niwelacja szyn jezdni mostów – rys. 14.

Zmierzone odchyłki od rozstawu projektowego szyn wewnętrznych zawierały się w granicach od – 124 mm do + 73 mm. Zmierzone odchyłki od linii prostej szyny wewnętrznej podpory krótkiej mieściły się w granicach od – 100 mm do + 58 mm, natomiast szyny wewnętrznej podpory długiej: od + 36 mm do – 54 mm.

7. Podsumowanie

W niniejszej pracy zaproponowano kompleksowy, realny z finansowego punktu widzenia program badań diagnostycznych torowiska jazdy mostów przeładunkowych w systemie zasilania Wielkiego Pieca zastosowany w jednej z polskich hut. W zakres badań diagnostycznych wchodziło wykonanie przeglądu konstrukcji torowiska, przy przeprowadzeniu demontażu blach osłonowych torowiska podpory krótkiej, wraz z pomiarami nieniszczącymi ubytków grubości oraz pomiarami efektywnej szerokości główki szyn. Wykonane zostały również geodezyjne pomiary geometrii torowiska. Na podstawie przeprowadzonych badań, stwierdzono zły stan konstrukcji torowiska.

Uzyskane wyniki przeglądu, pomiarów i badań, w połączeniu z wynikami pomiarów trwałych deformacji torowiska, stanowiły podstawę do zaprojektowania odpowiednich wzmocnień, oraz przeprowadzenia rekonstrukcji rozważanego torowiska jazdy mostów przeładunkowych przy wykorzystaniu zaleceń konstrukcyjnych zawartych w pracach [5, 6, 7, 8 i 9].

Podziękowanie

Artykuł powstał w ramach realizacji pracy statutowej nr 16.16.130.942 w Katedrze Projektowania i Eksploatacji Maszyn WIMiR AGH w Krakowie.

8. Literatura

[1] B. Ładecki, M. Nagięć, A. Burda, R. Janur i in.: Ocena stanu technicznego torowiska mostów przeładunkowych. PREH – praca nie publikowana, Kraków 2017.
[2] PN-M-45495:1995: Dźwignice. Tory jezdne suwnic półbramowych i bramowych. Wymagania.
[3] PN-EN 1090:2018 – Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych. Część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych.
[4] K. Juzwa: Wytyczne wykonania pomiarów geodezyjnych jezdni suwnicowych i suwnic. Ministerstwo Przemysłu Ciężkiego, Warszawa,1973.
[5] N. Dowling: Mechanical Behavior of Materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. Printice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, 1999.
[6] K. Rykulak: Pęknięcia w konstrukcjach stalowych, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2000.
[7] E. Masłowski, D. Spiżewska: Wzmacnianie konstrukcji budowlanych. Arkady, Warszawa 1988.

sp. z o.o.
koli
KONTROLUJ - BADAJ - DIAGNOZUJ - OCENIAJ
TYLKO Z NAJLEPSZYMI
Oferujemy:
Badania NDT: VT, PT, MT, UT, PAUT, ACFM
Pomiary twardości w terenie
Projektowanie i budowa systemów PAUT
Modernizacja i ulepszanie aparatury do badań wytrzymałościowych
Sprzedaż preparatów i wyposażenia do badań NDT
Doradztwo i optymalizacja procesu badań NDT
Szkolenia i egzaminy wg PN-EN ISO 9712
Sonatest
BAUGH & WEEDON
SONASPECTION
Institution of MECHANICAL ENGINEERS
MAGNAFLUX
Koli Sp. z o.o.
80-297 Banino
Ul. Lotnicza 119
mail: kontakt@koli.eu
Tel.: +48 58 684 86 61
Tel.: +48 58 684 86 62
CWB
CERTYFIKAT WIARYGODNOŚCI BIZNESOWEJ
2021

MUZEUM POLITECHNIKI OPOLSKIEJ I LAMP RENTGENOWSKICH

POLITECHNIKA OPOLSKA

Muzeum Politechniki Opolskiej

JESTEŚMY!
MUZEA UCZELNIANE
www.muzeauczelniane.pl

ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole
budynek V, piętro III,
tel. 514 638 097, (77) 449 86 40
g.jezierski@po.opole.pl
www.muzeum.po.opole.pl
kierownik: dr inż. Grzegorz Jezierski
wstęp wolny po wcześniejszym umówieniu się

Muzeum Politechniki Opolskiej i Lamp Rentgenowskich zostało utworzone 8 listopada 2011 roku. Jego inauguracja wiązała się z 45-leciem uczelni, a dodatkową okazją do udostępnienia zbiorów była rocznica odkrycia promieni X przez Wilhelma Röntgena. Prezentowana w Muzeum Politechniki Opolskiej kolekcja lamp rentgenowskich stanowi jedyne na świecie tego typu muzeum – stąd nazwa Muzeum Politechniki Opolskiej i Lamp Rentgenowskich.

Gromadzenie zbiorów zaczęło się w 2005 roku – wtedy jeszcze w ramach prywatnej kolekcji pracownika Politechniki Opolskiej, dr. inż. Grzegorza Jezierskiego – a od 8 listopada 2011 roku już pod szyldem Muzeum Politechniki Opolskiej i Lamp Rentgenowskich.

Na zbiór składają się lampy rentgenowskie mające zastosowanie w różnych dziedzinach – medycynie, przemyśle, lampy służące do dyfrakcji rentgenowskiej czy fluorescencji rentgenowskiej, a także unikalne źródła promieniowania rentgenowskiego, m.in. źródło do litografii rentgenowskiej, rozbieralne lampy impulsowe lub źródła z mikro-ogniskiem.

Oprócz samych lamp (szklanych i metalowo-ceramicznych) eksponowane są kołpaki i głowice aparatów rentgenowskich, a także kompletne aparaty rentgenowskie do różnych zastosowań. Ponadto kolekcja zawiera inne eksponaty związane z tym typem promieniowania, jak np. kenotrony (lampy prostownicze), wzmacniacze obrazu rentgenowskiego, kamery rentgenowskie, soczewki rentgenowskie, sprzęt dozymetryczny do pomiaru promieniowania rentgenowskiego oraz sprzęt pomocniczy do wykonywania badań rentgenowskich, w tym kamery do dyfrakcji rentgenowskiej. Licznie reprezentowana jest krajowa i zagraniczna literatura dotycząca promieniowania rentgenowskiego. Kolekcji towarzyszy zbiór artystycznych fotografii rentgenowskich wielu artystów z całego świata.

Znajdujący się
w dwóch salach muzeum
zbiór liczy aktualnie (w kwietniu 2015 roku)
ponad 1000 niepowtarzalnych eksponatów.
Wszystkie obiekty pochodzą z darowizn
od 386 ofiarodawców, w tym od 134
ofiarodawców z zagranicy
(z 23 państw).

Adrianna Nidzgorska*, Jerzy Perczyński, Marek Chalimoniuk, Artur Kułaszka
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

Diagnozowanie uszkodzeń BVID w materiałach kompozytowych metodą tomografii komputerowej (CT)

BVID damage diagnosis in composite materials using computed tomography (CT) method

STRESZCZENIE

Uszkodzenia BVID (ang. Barely Visible Impact Damage) w polimerowych materiałach kompozytowych elementów konstrukcji lotniczych pojawiają się w wyniku oddziaływania na nie dynamicznych obciążeń ciał obcych (FOD - ang. Foreign Object Damage), takich jak np. narzędzia, grad, kamienie itp., o małych prędkościach i niewielkich energiach. Uszkodzenia tego typu można zaliczyć zarówno do grupy uszkodzeń eksploatacyjnych jak i produkcyjnych. Z punktu widzenia eksploatacji są one szczególnie niebezpieczne, ponieważ charakteryzują się słabą wykrywalnością powszechnie stosowanymi metodami diagnostycznymi np. metodą wizualną, jednocześnie propagując wewnątrz materiału. Tomografia komputerowa (CT - ang. Computed Tomography) jest rodzajem tomografii rentgenowskiej pozwalającym na uzyskanie obrazów przestrzennych (3D) z prześwietlania badanego obiektu wykonanych z różnych kierunków. Umożliwia ona wykrycie nieciągłości materiału oraz wiarygodną ocenę badanych elementów. Z tego powodu metoda ta znalazła zastosowanie do skutecznej weryfikacji uszkodzeń typu BVID na wczesnym ich etapie, wpływając w znacznym stopniu na bezpieczeństwo eksploatacji.

***Słowa kluczowe**: kompozyt, badania tomograficzne, uszkodzenia BVID.*

ABSTRACT

Damages type Barely Visible Impact Damage (BVID) in polimer composite materials of airborne construction elements occur as a result of dynamic loads interaction caused by Foreign Object Damage (FOD) such as tools, hail, stones etc. with low velocities and energies. There are both exploitation and production type of BVID damages. They are especially dangerous from exploitation point of view because they are characterized by insufficient visual detectability while using common methods like visual method, but they spread into the material at the same time. Computed tomography (CT) is a type of X-ray tomography that allows to get 3D pictures from scanning examined object from different directions. It enables for detecting material discontinuities and reliable assessment of the researched elements. For this reason CT method has been used in effective BVID damages verification in their early stage and has an enormous influence on the exploitation safety.

***Keywords**: composite, tomographic research, barely visible impact damage.*

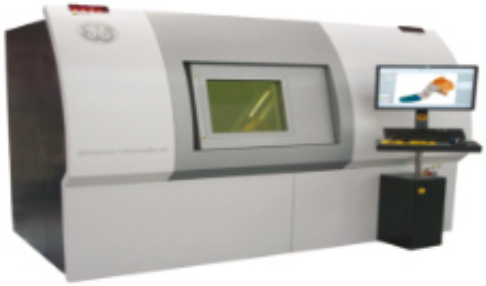
1. Wstęp

W diagnostyce technicznej szerokie zastosowanie znalazła metoda tomografii komputerowej (CT). Jest ona rodzajem tomografii rentgenowskiej, pozwalającym na uzyskanie obrazów przestrzennych (3D) z prześwietlania badanego obiektu wykonanych z różnych kierunków. Urządzenie do CT nazywamy tomografem, a uzyskany obraz tomogramem. W przypadku badania z wykorzystaniem detektora liniowego wiązka promieniowania przy użyciu przesłony kształtowana jest do wiązki płaskiej i odbierana przez szereg czujników. Obrót przedmiotu o 360° umożliwia otrzymanie płaskiego obrazu plastra, natomiast obraz przestrzenny 3D uzyskuje się poprzez dodatkowe przemieszczanie detalu w płaszczyźnie pionowej. Dane zgromadzone w formie cyfrowych sygnałów wizyjnych przesyłane są do komputera w celu otrzymania pełnego obrazu 3D [1]. Zasadę tworzenia obrazu przedstawia rysunek 1. W będącym na wyposażeniu Instytut Technicznego Wojsk Lotniczych tomografie GE typu v/tome/x m 300 (Rys. 2) promienie rentgenowskie generowane przez lampę w postaci wiązki stożkowej przenikają przez próbkę i padają na detektor panelowy. Przestrzenny obraz powstaje w wyniku jednego obrotu badanego przedmiotu. Tomograf posiada dwie lampy. W lampie, w której panuje próżnia, elektrony są emitowane z podgrzewanego włókna w kierunku anody. Przez anodę elektrony wpadają do soczewki magnetycznej, która skupia wiązkę elektronów do małej plamki na tarczy. Tarcza składa się z cienkiej warstwy wolframu naniesionej na płytę z metalu lekkiego, która stanowi również okno wyjściowe dla promieniowania rentgenowskiego (lampa transmisyjna 180 kV) lub stanowi masywny cylinder wolframowy (lampa kierunkowa 300 kV) [2]. Urządzenie to pozwala na przeprowadzanie badań z bardzo dużym powiększeniem i rozdzielczością. Powiększenie całkowite, zależne jest od wymiarów badanego obiektu oraz detektora i wynosi maksymalnie 160x a osiągana rozpoznawalność szczegółów kształtuje się na poziomie 0,4 μm [3].

*Autor korespondencyjny.
E-mail: adrianna.nidzgorska@itwl.pl

Published by „Badania Nieniszczące i Diagnostyka" Publishing Agenda of SIMP
DOI: 10.26357/BNID.2022.003

Rys. 1. Schemat badania tomograficznego z detektorem liniowym [1].
Fig. 1. Diagram of tomographic research with line detector [1].



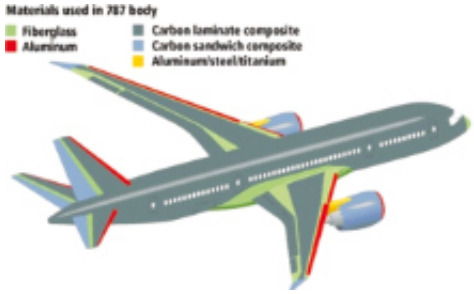
Rys. 2. Tomograf v/tome/x/m 300 z firmy GE [3].
Fig. 2. V/tome/x/m/300 CT scanner from GE company [3].

2. Zastosowanie tomografii komputerowej

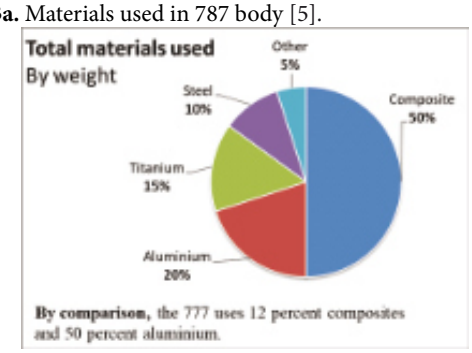
Tomografia komputerowa (CT) posiada szerokie spektrum zastosowania w wielu dziedzinach nauki. W przemyśle lotniczym wykorzystywana jest do diagnozowania elementów konstrukcji statku powietrznego. Dzięki niej możemy np. dokonać oceny jakości połączeń spawanych lub określić stan łopatek wirnikowych. W przypadku łopatek sprężarkowych i turbinowych metodę tomografii można stosować do sprawdzania całej partii łopatek, a nie jak dotychczas reprezentatywnej próbki z danej partii. Metoda ta pozwala na weryfikację wad i uszkodzeń wewnątrz materiału. Umożliwia uzyskanie obrazów przestrzennych stanu wewnętrznego obiektów badań w krótkim czasie i z dużą wiarygodnością. Jedną z największych zalet tomografii komputerowej jest możliwość diagnozowania agregatów bez konieczności ich wcześniejszego demontażu [1].

Szczególną uwagę z punktu widzenia diagnostyki oraz bezpieczeństwa eksploatacji techniki lotniczej należy zwrócić na materiały kompozytowe, które stanowią grupę powszechnie stosowanych materiałów ze względu na swą dużą wytrzymałość przy relatywnie niskiej masie. Kompozyt jest tworzywem wielo-materiałowym. Materiały, z których zbudowany jest kompozyt, posiadają różne cechy, ale po połączeniu wykazują dużo lepsze właściwości niż każdy z nich osobno. Jeden z komponentów stanowi osnowę (inczej matrycę) i odpowiada za spójność, twardość i elastyczność kompozytu (zazwyczaj bardziej plastyczny i miękki). Drugi zaś jest wzmocnieniem (inaczej zbrojeniem) i zapewnia właściwości mechaniczne takie jak odporność na ściskanie i rozciąganie (z reguły twardszy i bardziej kruchy).

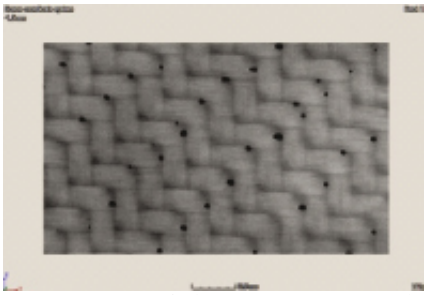
Rozróżniamy następujące rodzaje włókien stosowanych w celu wzmocnienia struktur kompozytowych: szklane



Rys. 3a. Materiały użyte w konstrukcji Boeinga 787 [5].
Fig. 3a. Materials used in 787 body [5].



Rys. 3b. Masowy udział materiałów użytych w konstrukcji Boeinga 787 Dreamliner [5].
Fig. 3b. Total materials used by weight [5].

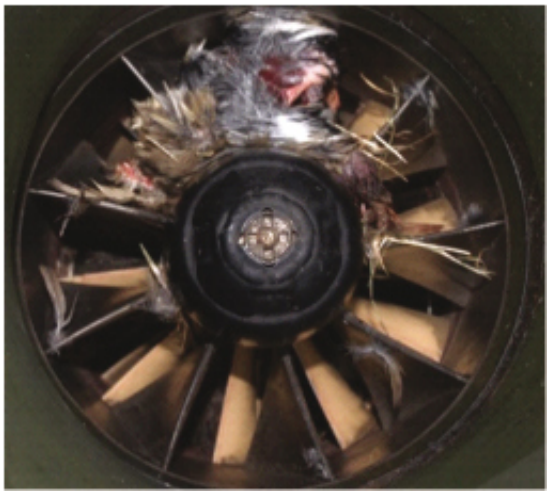


Rys. 4. Tomogram materiału kompozytowego z wadami produkcyjnymi w postaci porowatości [8].
Fig. 4. Tomogram of composite material with production defect in the form of porosity [8].

G (Glass), węglowe C (Carbon) oraz aramidowe A (Aramid). W konstrukcjach lotniczych nowej generacji najczęściej stosuje się kompozyty wzmacniane włóknami szklanymi (GFRP) oraz włóknami węglowymi (CFRP).

Procentowy udział materiałów kompozytowych w konstrukcjach lotniczych wykazuje tendencję wzrostową. W przypadku samolotu Boeing 787 Dreamliner udział masowy kompozytów wynosi aż 50%, a udział objętościowy 80% (Rys. 3a, Rys. 3b). Odpowiada to współczesnym wymogom stawianym przed operatorami lotniczymi w zakresie ochrony środowiska oraz stanowi istotny czynnik zmniejszający koszty operacji lotniczych [4]. Wprowadzenie do przemysłu lotniczego materiałów kompozytowych wymusiło jednocześnie podjęcie prac mających na celu określenie kryteriów oceny ich stanu oraz metod diagnostycznych zarówno na etapie produkcji jak i w eksploatacji. Na rys. 4 przedstawiono nieznacznych rozmiarów wady materiału kompozytowego, mające postać porów powietrznych.

Rys. 5. Zderzenie samolotu pasażerskiego typu ATR-72 ze stadem ptaków [7].
Fig. 5. ATR-72 passenger plane crash with a flock of birds [7].



Rys. 6. Uszkodzenie sprężarki silnika odrzutowego [8].
Fig. 6. Damage of jet engine compressor [8].

3. Przyczyny i skutki zdarzeń udarowych

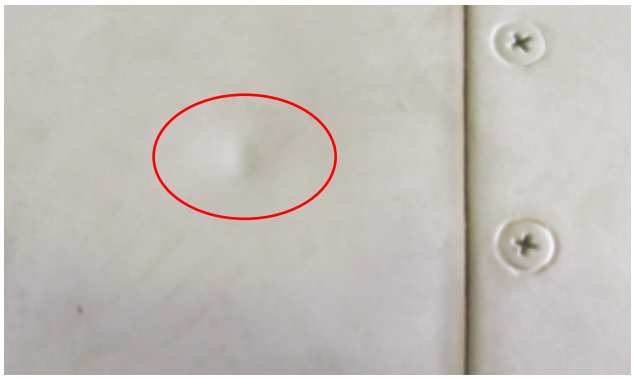
Wskutek oddziaływania elementów FOD o małych prędkościach i niewielkich energiach, w polimerowych materiałach kompozytowych elementów konstrukcji lotniczych powstają uszkodzenia typu BVID. Uszkodzenia te są niebezpieczne z punktu widzenia eksploatacji, ponieważ charakteryzują się słabą wykrywalnością wizualną, propagując jednocześnie wewnątrz materiału powodują nieciągłości takie jak pęknięcia czy rozwarstwienia.

Do najbardziej powszechnych zagrożeń definiowanych jako BVID należą: zderzenia z ptakami, upadki narzędzi, upuszczone części, uderzenia kamieni i gradu oraz tzw. ruch pieszy (związany z przemieszczaniem się po strukturze statku powietrznego ludzi).

Zderzenia z ptakami niosą istotne ryzyko dla operacji lotniczych. Do kolizji samolotu z ptakami najczęściej dochodzi w trakcie operacji lotniczych związanych ze startem, odlotem z lotniska i podejściem do lądowania [6]. Uszkodzeniom wywołanym przez zderzenia z ptakami najczęściej ulegają kompozytowe poszycie płatowca (rys. 5) i wlotowe podzespoły kanału przepływowego silnika (rys. 6).

Przykładowe obrazy eksploatacyjnych uszkodzeń powierzchni materiałów kompozytowych spowodowanych prawdopodobnie przez upadki narzędzi lub części

Rys. 7a. Uszkodzenie eksploatacyjne poszycia SP [8].
Fig. 7a. Exploitative damage of an aircraft skin [8].



Rys. 7b. Uszkodzenie eksploatacyjne poszycia SP [8].
Fig. 7b. Exploitative damage of an aircraft skin [8].

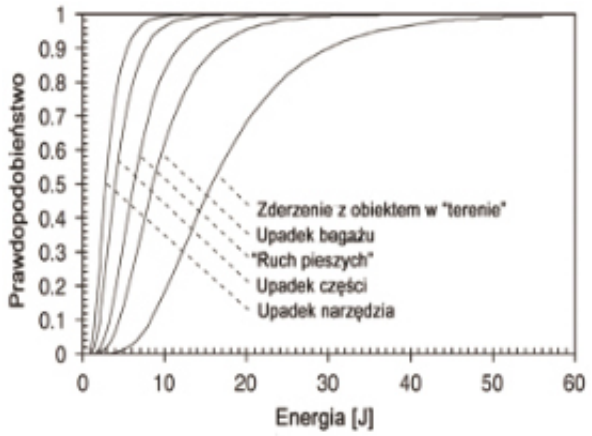
Tab. 1 Przykładowe energie uderzenia dla różnych obiektów upadających na strukturę [9].
Tab. 1 Exemplary impact energies for different objects falling on the structure [9].

Narzędzie upuszczone	Energia [J]
Suwmiarka	3
Grzechotka	4,1
Mały młotek	6
Wkrętak	7,1
Klucz płaski	10
Elektronarzędzia	24,9

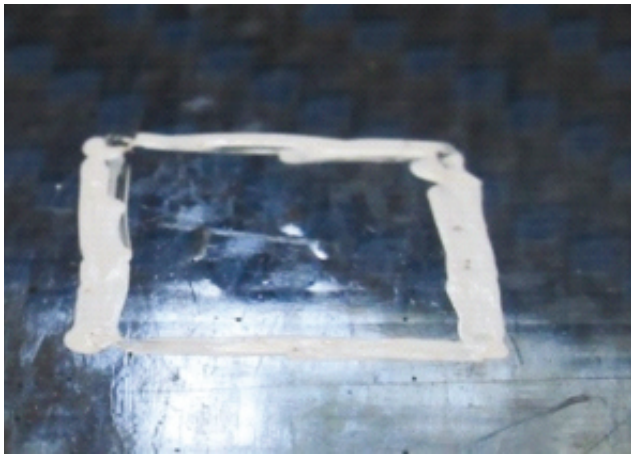
przedstawione zostały na rys. 7a i rys. 7b.

Energia uderzenia upuszczanych narzędzi mieści się w przedziale od 3 J do 25 J (Tab. 1). Na wartość energii ma wpływ między innymi wysokość, z której dany przedmiot może zostać upuszczony, oraz jego ciężar i kształt.

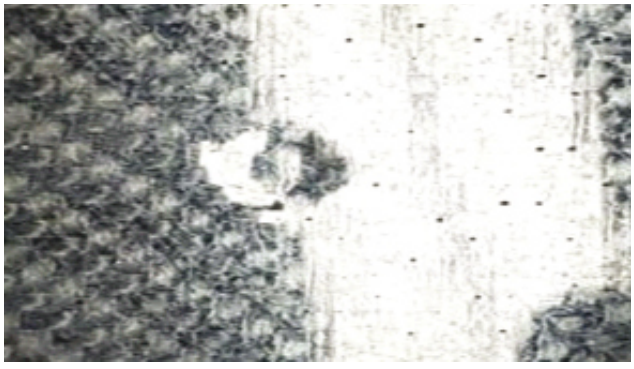
Uderzenia występujące w warunkach terenowych generują najwyższe energie uderzenia (ok. 60 J). Podobne wartości energii obserwujemy przy oddziaływaniu sprzętu lotniskowego na statek powietrzny. Rysunek 8 przedstawia rozkłady prawdopodobieństwa energii uderzeń eksploatacyjnych dla poszczególnych rodzajów zagrożeń z grupy BVID.



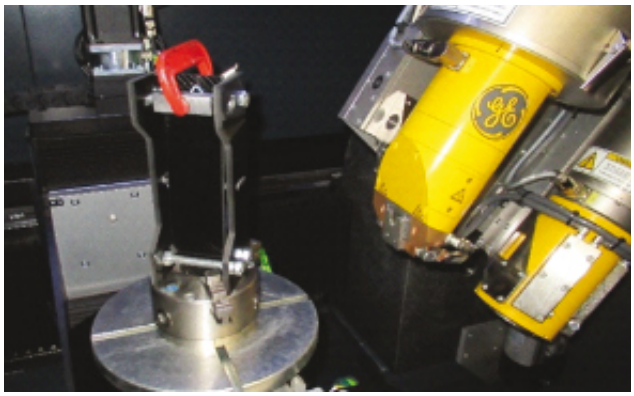
Rys. 8. Prawdopodobieństwo wystąpienia rożnych zagrożeń spowodowanych obciążeniem dynamicznym w funkcji energii uderzenia [9].
Fig. 8. Probability of occuring different dangers caused by dynamic load in function of impact energy [9].



Rys. 9a. Wgniecenie na płytce kompozytowej o grubości 7,3 mm po uderzeniu o energii 20 J [8].
Fig. 9a. Dent in composite specimen after impact with an energy of 20 J [8].



Rys. 9b. Wgniecenie na płytce kompozytowej o grubości 7,3 mm po uderzeniu o energii 30 J [8]
Fig. 9b. Dent in composite specimen after impact with an energy of 30 J [8].



Rys. 10. Widok przedmiotu w trakcie badania.
Fig. 10. The view of the object during research.

4. Badania płytki kompozytowej typu CFRP

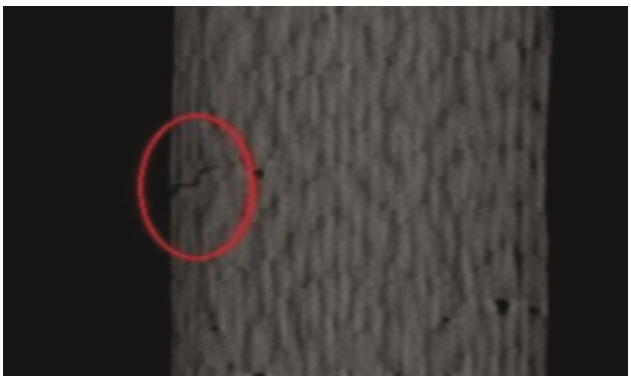
Powszechnie wiadomo, że elementy (materiały kompozytowe) użyte do budowy statków powietrznych podlegają znacznym obciążeniom i narażone są na różnego typu defekty. Należy tu zaznaczyć, że badania wizualne uszkodzonych elementów płatowca mogą pierwotnie nie wykazywać cech destrukcyjnych, jednak poddane badaniom tomograficznym ujawniają realne wady materiału. Ten fakt sprawia, że konieczne jest wykonywanie regularnych badań diagnostycznych w celu wczesnego wykrycia uszkodzeń, np. typu BVID, które mogą stanowić poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa operacji lotniczych.

W związku z powyższym, w celu określenia wpływu uderzenia w elementy wykonane z materiałów kompozytowych przez ciała obce o różnej energii oraz powstających w wyniku tego uszkodzeń, przeprowadzono badania symulacyjne. W warunkach laboratoryjnych zbadano fragmenty trzech płytek kompozytowych typu CFRP o wymiarach 60 x 250 x 7,3 mm, które poddano uderzeniu o niskiej energii (zakres 10 J ÷ 30 J). Badania wykonywano z wykorzystaniem młota udarowego firmy Instron model Ceast 9340.

Płytka kompozytowa poddana obciążeniu udarowemu o energii 10 J nie wykazała cech uszkodzenia, inaczej niż płytki obciążone udarowo energią - odpowiednio 20 J i 30 J z widocznym defektem w postaci wgniecenia powierzchni (rys. 9a oraz rys. 9b).

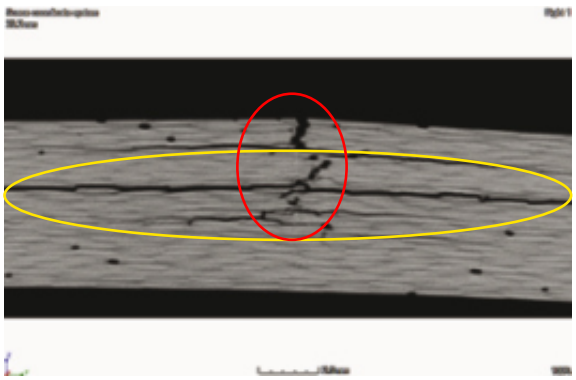
W celu wykrycia nieciągłości wewnątrz materiału zastosowano metodę tomografii komputerowej (CT), wykorzystując urządzenie typu v/tome/x/m/300. Badane elementy po wcześniejszym poddaniu ich obciążeniom udarowym, umieszczono w kabinie rentgenowskiej (rys. 10).

Przeprowadzone badania, na podstawie uzyskanych tomogramów wykazały, że jedynie płytki kompozytowe poddane obciążeniom dynamicznym w zakresie energii 20 J ÷ 30 J posiadają pęknięcia i rozwarstwienia wewnętrznej struktury materiału kompozytowego (rys. 11a i rys 11b). Pomimo mało widocznych uszkodzeń na powierzchni elementu kompozytowego, jego struktura wewnętrzna uległa uszkodzeniu w stopniu mogącym mieć wpływ na bezpieczeństwo eksploatacji.



Obszar pęknięć

Rys. 11a. Tomogram materiału kompozytowego z widocznymi pęknięciami i delaminacjami po obciążeniu 20 J [8].
Fig. 11a. Tomogram of composite material with visible cracks and delaminations after impact with an energy of 20 J [8].



Obszar delaminacji

Rys. 11b. Tomogram materiału kompozytowego z widocznymi pęknięciami i delaminacjami po obciążeniu 30 J [8].
Fig. 11b. Tomogram of composite material with visible cracks and delaminations after impact with an energy of 30 J[8].

5. Podsumowanie

W wyniku badania porównano uszkodzenia dla płytek kompozytowych typu CFRP, które powstały w wyniku poddania ich obciążeniom udarowym o energiach od 10 J do 30 J. W wyniku analizy obrazów powierzchni badanych materiałów oraz uzyskanych tomogramów zaobserwowano wzrost pola powierzchni uszkodzeń wraz ze wzrostem energii uderzenia.

W praktyce obsługowej statków powietrznych często dochodzi do uszkodzeń materiałów kompozytowych typu BVID. W procesie eksploatacji samolotu występują przypadkowe uszkodzenia o dynamicznym charakterze. Jest to istotny argument, który powinien być uwzględniany w procesie projektowania materiałów kompozytowych do wykorzystania w konstrukcji statku powietrznego. Uszkodzenia niskoenergetyczne BVID stanowią najbardziej krytyczny rodzaj uszkodzeń spośród tych, które nie są wykrywalne wizualnie. Stosowanie odpowiednich technik wykrywania (tomografia komputerowa CT) umożliwia wykorzystanie materiałów kompozytowych w fazie projektowej, biorąc pod uwagę potencjalne obciążenie eksploatacyjne dla elementów kompozytowych z uszkodzeniami BVID. Uzyskane w efekcie przeprowadzonych badań wyniki wykorzystano w pracach mających na celu opracowanie kryteriów oceny wpływu uszkodzeń typu BVID na bezpieczną eksploatację kompozytowych elementów statku powietrznego oraz technologii ich napraw.

6. Literatura

[1] A. Kułaszka, M. Chalimoniuk, M. Wieczorowski, D. Brzozowski, „Ocena wad i niezgodności spawalniczych metodą tomografii komputerowej CT" Przegląd spawalnictwa, vol. 87, pp. 31-34, 12/2015
[2] www.ita-polska.com.pl/baza-wiedzy/tomografia-komputerowa
[3] GE Sensing & Inspection Technologies GmbH 2010, Instrukcja obsługi - System kontroli rentgenowskiej v|tome|x m 300
[4] R. Bielawski, W. Rządkowski, S. Augustyn, P. Pyrzanowski, „Nowoczesne materiały stosowane w konstrukcjach lotniczych – wybrane problemy oraz kierunki rozwoju" Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej 291, Mechanika 87, RUTMech, t. XXXII, z. 87 (3/15), lipiec-wrzesień 2015, s. 203-216
[5] https://kompozyty.net/kompozyty-lotnictwie-analiza-rynku/
[6] J. Ćwiklak, H. Jafernik, „Bezpieczeństwo lotów w aspekcie kolizji statków powietrznych z ptakami zaistniałych w lotnictwie SZ RP"
[7] www.standbynordic.com
[8] materiał własny – Z34 ITWL
[9] C. Kassapoglou, „Modeling the effect of damage in composite structures simplified approaches", Wiley, United Kingdom, 2015

Elektronic Instrument Service Rowecki Sp.j.

Oficjalny przedstawiciel Comet Technologies Dania A/S

www.eis.poznan.pl , yxlon@eis.poznan.pl , serwis@eis.poznan.pl

Tel: 61 8681998 Mobile: +48 604 514393 , 602 641328

Przenośne & przewoźne przemysłowe aparaty rentgenowskie produkcji Yxlon A/S.

Produkty Yxlon w technologii stałego potencjału na przenośnych aparatach rentgenowskich, zapewniają uzyskiwanie zdjęć o wysokich rozdzielczościach.

Aparaty produkcji Yxlon A/S Nowej serii EVO wyróżniają się bardzo intensywnym promieniowaniem, co skraca czas ekspozycji. Głowice RTG posiadają małe ognisko 1,0 mm. lub duże 3,0mm.wg.EN 12543, przy niezmiennej mocy aparatu, dostępne od 160-300kV. Są lżejsze, mają lepsze chłodzenie, 5-cio punktowy laser centrujący oraz wbudowany elektroniczny kalkulator ekspozycji, i wiele innych udogodnień dla użytkownika, jak np. nowy sterownik EVO, może współpracować z starszymi posiadanymi już głowicami SMART. Zaletą jest także intuicyjne oprogramowanie które zapewnia łatwość codziennej obsługi.

Zapraszamy do zapoznania się z naszą ofertą i informacjami technicznymi na stronie www.eis.poznan.pl

EIS Rowecki Sp.j. jesteśmy przedstawicielstwem w Polsce - biurem techniczno-handlowym firmy Comet Technologies Dania A/S .

Zajmujemy się sprzedażą i serwisem technicznym przenośnych i przewoźnych przemysłowych aparatów rentgenowskich produkcji Yxlon A/S. Zapewniamy oryginalne części zamienne, serwis gwarancyjny, pogwarancyjny oraz doradztwo techniczne. Wykonujemy naprawy oraz okresowe przeglądy i certyfikacje. Posiadamy zezwolenie na uruchamianie aparatury wytwarzającej promieniowanie RTG wydane przez Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki, oraz niezbędne szkolenia odbyte u producenta Yxlon w zakresie napraw i przeglądów technicznych.

ANMAT TRADING spol. s r.o.

walter+bai

w+b

Systemy do badań wytrzymałościowych

walter + bai ag
Testing Machines

Industriestrasse 4
CH-8224 Löhningen, Switzerland

Tel. +41 52 687 25 25
Fax +41 52 687 25 20

info@walterbai.com
www.walterbai.com

LABORATORIUM BADAŃ MATERIAŁOWYCH
ul. Podmiejska 15c
66-400 Gorzów Wlkp.
tel.: **880 778 278**
e-mail: laboratorium@testgorzow.pl
www.testgorzow.pl

Jesteśmy na rynku od 1993r.

Posiadamy uznany system zarządzania jakością PN-EN ISO 17025:2018. Jesteśmy członkiem rzeczywistym Klubu Polskich Laboratoriów Badawczych POLLAB, gdzie uczestniczymy w międzylaboratoryjnych badaniach porównawczych we wszystkich uznanych metodach badawczych.

Do przeprowadzonych badań wykorzystujemy sprzęt renomowanych producentów, który pozwala wykonywać badania z możliwie największą dokładnością. Powierzone zadania możemy realizować dzięki wysoko wyspecjalizowane kadrze – w tym personelu badań nieniszczących z certyfikatami II i III stopnia w każdej z wykonywanych w naszym laboratorium metod badawczych oraz inżynierów spawalników IWE, EWE posiadających certyfikaty kompetencji.

Nasi pracownicy posiadają szeroką wiedzę zarówno teoretyczną jak i praktyczną z zakresu spawalnictwa, metod badawczych oraz materiałoznawstwa

Wieloletnie zdobywane doświadczenie w badaniach materiałowych zostało docenione i potwierdzone certyfikatami wiodących towarzystw klasyfikacyjnych.

ZAKRES BADAŃ MATERIAŁOWYCH:

Badania mechaniczne złączy spajanych metali, tworzyw sztucznych i wyrobów hutniczych:

- Próby rozciągania (R_e, $R_{p0,2}$, R_m, A, Z)
- Próby zginania
- Próby łamania
- Badania metalograficzne makroskopowe i mikroskopowe
- Badania twardości twardościomierzem stacjonarnym (HV) i przenośnym (HV, HB, HRC)
- Badania udarności materiałów i złączy spawanych w temperaturze pokojowej i w temperaturach obniżonych do -60^{o}C

ZAKRES BADAŃ NIENISZCZĄCYCH:

- Badania rentgenowskie RTG (RT)
- Badania wizualne (VT)
- Badania ultradźwiękowe (UT)
- Badania magnetyczno-proszkowe (MT)
- Badania penetracyjne (PT)
- Ultradźwiękowe pomiary grubości (UTT)

POZOSTAŁE USŁUGI:

- Badania technologii spawania i zgrzewania
- Opracowywanie instrukcji i procedur badawczych
- Opracowywanie instrukcji spawania
- Doradztwo techniczne
- Weryfikacja uprawnień spawaczy
- Szkolenia spawalnicze

NASZE LABORATORIUM ZOSTAŁO UZNANE PRZEZ:

- **Urzędu Dozoru Technicznego**
- **TÜV Rheinland**
- **POLSKI REJESTR STATKÓW**

Wojciech Dziewiecki, Barbara Ostrowska*, Axel Sańczuk
PID Polska Sp. z o.o.

Radiografia w bezpieczeństwie granic - prezentacja wyników projektu pt „CANIS - pierwszy polski skaner rtg do bezinwazyjnej inspekcji ładunków wielkogabarytowych na przejściach granicznych”

Radiography in border security - presentation of the results of the project „CANIS - the first Polish X-ray scanner for non-invasive inspection of large-size cargo at border crossings”

STRESZCZENIE

Systemy do skanowania cargo wchodzą w skład zintegrowanego systemu zapewniania bezpieczeństwa granic Polski oraz Unii Europejskiej – aktualnie Polska ma najdłuższą granicę lądową Unii Europejskiej. Jednym z kluczowych elementów systemu jest skaner rentgenowski, który pozwala na prześwietlanie obiektów przejeżdżających przez granicę. Skaner składa się ze źródła promieniowania (lampy rentgenowskiej lub liniowego akceleratora elektronów bądź betatronu) oraz detektora. W zależności od rodzaju technologii skanowania stosuje się skanowanie transmisyjne (z ang. transmission) bądź odbiciowe (z ang. backscattering). System CANIS w ramach Projektu został zaprojektowany jako skaner do transmisyjnego skanowania pojazdów na przejazdach granicznych, i rozróżnia się dwa zasadnicze wersje: 1. CANIS Rail – system wyposażony w dwuenergetyczne źródło promieniowania 3/6MeV lub 6/9MeV, służący do skanowania taborów kolejowych, 2. CANIS Gantry/Portal – system wyposażony w dwuenergetyczne źródło promieniowania 3/6MeV, służący do skanowania pojazdów ciężarowych oraz osobowych. W systemie Gantry ramię skanujące przejeżdża wzdłuż nieruchomego pojazdu, a w systemie Portal ramię skanera jest nieruchome. Możliwa jest kombinacja dwóch systemów – system Gantry może pracować jako portal poprzez zaparkowanie skanera w wyznaczonej pozycji. Skanowanie następuje poprzez impulsowe wytwarzanie promieniowania wysokoenergetycznego za pomocą akceleratora liniowego, wyposażonego w wolframową tarczę konwersji (β→X), formowania wiązki w wachlarzowy kształt, jego transmitancję przez badany obiekt oraz rejestrację uzyskanej dawki promieniowania na pikselizowanym cyfrowym detektorze liniowym. Poprzez przesuw obiektu względem skanera uzyskuje się kolejne linie dwuwymiarowego radiogramu, który jest obrabiany (poprzez zastosowanie m.in. kalibracji), archiwizowany na serwerze oraz prezentowany inspektorowi.

***Słowa kluczowe**: kompozyt, badania tomograficzne, uszkodzenia BVID.*

ABSTRACT

The cargo scanning systems are included in a integrated Poland's and European Union's border safety system - actually Poland has the longest land border in EU. One of the key part of the cargo scanner is a X-ray scanner, which allows for inspection of the vehicles crossing the border. The X-ray source (X-ray lamp or linear electron accelerator or betatron) and the detector are the parts of the system. According to used scanning technology there is a transmission scan or backscatter scan. The CANIS system developed in a Project is a transmission scanner used for inspection of the vehicles on the border, and there are two models: 1. CANIS Rail - the dual-energy 3/6MeV or 6/9MeV railway cargo scanner, 2. CANIS Gantry/Portal - the dual energy 3/6MeV trucks and cars scanner. In the Gantry subversion, the gantry moves through parked vehicle, in a portal subversion the gantry is stationary. The combined version is also possible - gantry can work as a portal when parked in predefined position. The pulsed high energy X-ray are produced by a linear electron accelerator equipped with a tungsten conversion (β→X) plate, and is formed by a slit collimation system. The X-ray passes the inspected object and detected at the digital linear detector. The full digital radiography is a result of moving the inspected object through the scanner, and can be digitally processed (e.g. using calibration, filters) and archived on the server and presented to the inspector.

***Keywords**: composite, tomographic research, barely visible impact damage.*

1. Opis systemu CANIS

Systemy do skanowania cargo wchodzą w skład zintegrowanego systemu zapewniania bezpieczeństwa granic Polski oraz Unii Europejskiej – aktualnie Polska ma najdłuższą granicę lądową Unii Europejskiej.

Jednym z kluczowych elementów systemu jest skaner rentgenowski, który pozwala na prześwietlanie obiektów przejeżdżających przez granicę. Skaner składa się ze źródła promieniowania (lampy rentgenowskiej lub liniowego akceleratora elektronów bądź betatronu) oraz detektora. W zależności od rodzaju technologii skanowania stosuje się skanowanie transmisyjne (z ang. transmission) bądź odbiciowe (z ang. backscattering).

System CANIS w ramach Projektu został zaprojektowany i zbudowany jako skaner do transmisyjnego skanowania

*Autor korespondencyjny.
E-mail: b.ostrowska@pidpolska.pl

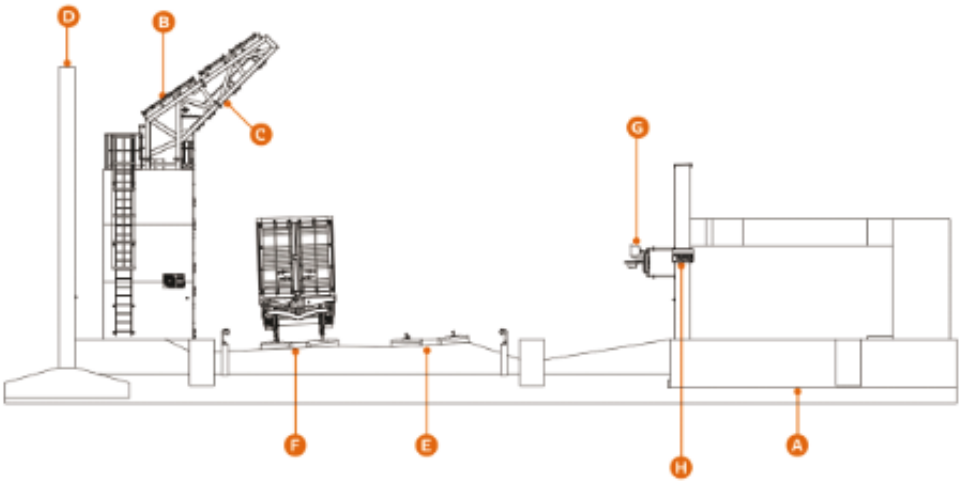
Published by „Badania Nieniszczące i Diagnostyka” Publishing Agenda of SIMP
DOI: 10.26357/BNID.2022.004

Rys. 1. Wizualizacja systemu MultiControl CANIS RAIL oraz MultiControl CANIS GANTRY / PORTAL.
Fig. 1. Visualization of the MultiControl CANIS RAIL and MultiControl CANIS GANTRY / PORTAL systems.

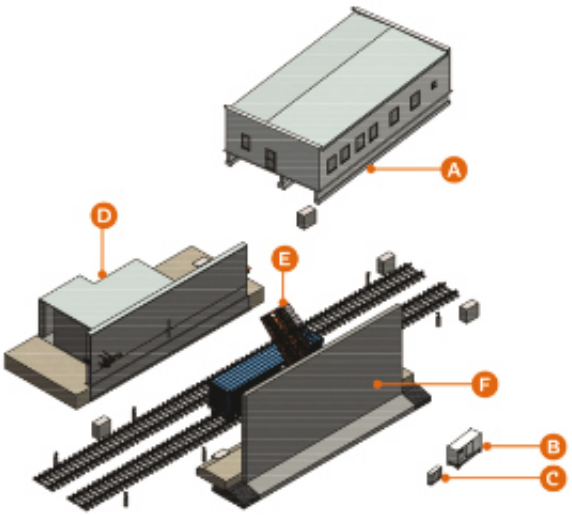
Rys. 2. Dwuenergetyczny akcelerator liniowy CANIS.
Fig. 2. CANIS dual energy linear accelerator.

pojazdów na przejazdach granicznych, i rozróżnia się dwa zasadnicze wersje:

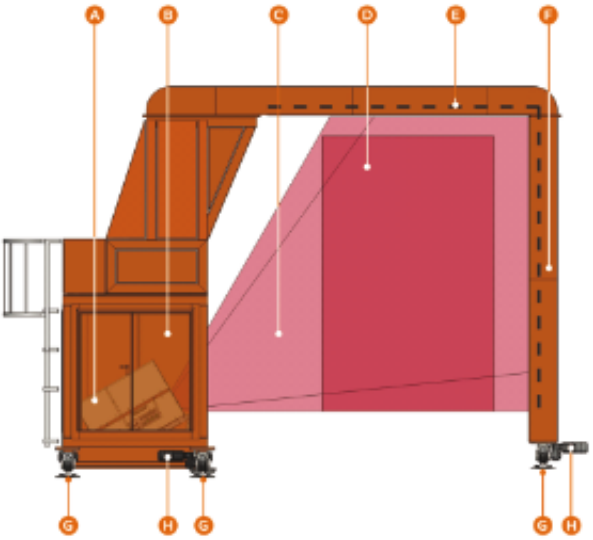
1. CANIS Rail – system wyposażony w dwuenergetyczne źródło promieniowania 3/6MeV lub 6/9MeV, służący do skanowania taborów kolejowych,
2. CANIS Gantry/Portal – system wyposażony w dwuenergetyczne źródło promieniowania 3/6MeV, służący do skanowania pojazdów ciężarowych oraz osobowych. W systemie Gantry ramię skanujące, w postaci bramownicy poruszającej się po szynach, przejeżdża wzdłuż nieruchomego pojazdu, a w systemie Portal ramię skanera jest nieruchome. Możliwa jest kombinacja dwóch systemów – system Gantry może pracować jako portal poprzez unieruchomienie bramownicy w wyznaczonej pozycji. Rysunek 1 przedstawia wizualizację systemów opracowanych w ramach projektu. Skanowanie transmisyjne następuje poprzez impulsowe wytwarzanie promieniowania wysokoenergetycznego za pomocą akceleratora liniowego, wyposażonego w wolframową tarczę konwersji (β→X), formowania wiązki promieniowania X w wachlarzowy kształt, jego transmitancję przez badany obiekt oraz rejestrację uzyskanej dawki



Rys. 3. Widok poprzeczny skanera kolejowego CANIS RAIL (w poprzek osi skanowania), A – bunkier z akceleratorem, B – wieża detektorów, C – ramię detektora, D – tylna ściana osłonowa wieży detektorów, E, F – torowiska, G – system OCR, H – sygnalizatory.
Fig. 3. CANIS RAIL transverse view (across the scan axis), A - bunker with accelerator, B - detector tower, C - detector arm, D - rear curtain wall of the detector tower, E, F - tracks, G - OCR system, H - signaling devices.



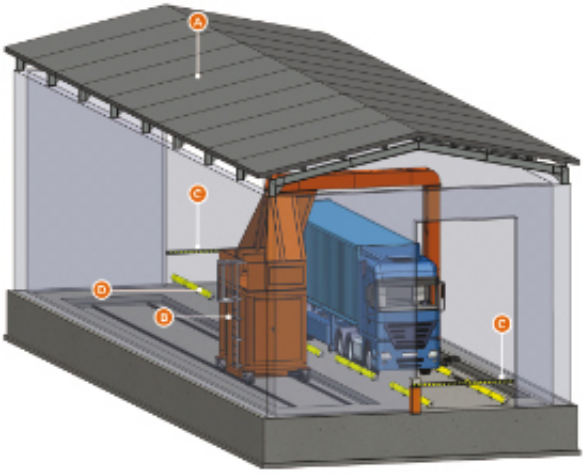
Rys. 4. Widok 3D skanera kolejowego CANIS RAIL. A – budynek obsługi, B, C – zespół zasilający w energię elektryczną z agregatem prądotwórczym, D – bunkier z akceleratorem, E – wieża detektorów, F – ściana osłonowa tylna. Widoczna jest szczelina kolimatora w bunkrze, skąd emitowane jest promieniowanie X .
Fig. 4. CANIS RAIL rail scanner 3D view. A - service building, B, C - electricity supply unit with a power generator, D - bunker with an accelerator, E - detector tower, F - rear curtain wall. The collimator slot in the bunker is visible, from where the X-rays are emitted.



Rys. 5. Widok poprzeczny skanera CANIS GANTRY (w poprzek osi skanowania). A – akcelerator (źródło promieniowania), B – kabina (pomieszczenie akceleratora), C – wiązka promieniowania wachlarzowego, D – Zarys skanowanego obiektu (ciężarówki z kontenerem), E – detektory promieniowania, F – ramię z systemem detekcyjnym, G – szyny, H – napędy z motoreduktorami.
Fig. 5. CANIS GANTRY scanner cross view (across the scan axis). A - accelerator (radiation source), B - cabin (accelerator room), C - fan radiation beam, D - outline of the scanned object (truck with a container), E - radiation detectors, F - arm with detection system, G - rails, H - drives with geared motors.

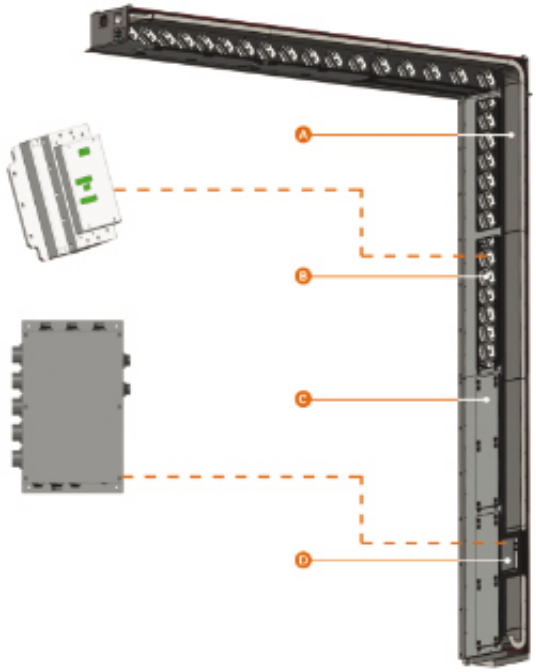
promieniowania na pikselizowanym cyfrowym detektorze liniowym. Poprzez przesuw obiektu względem skanera uzyskuje się kolejne linie dwuwymiarowego cyfrowego radiogramu, który jest obrabiany (poprzez zastosowanie m.in. kalibracji), archiwizowany na serwerze oraz prezentowany użytkownikowi. Ze względu na postać cyfrową danych, można je poddawać różnym procesom obróbki, np. wyostrzania, stosowania adaptacyjnego wyrównywania histogramu, wykrywania krawędzi. Akcelerator liniowy wytwarza promieniowanie o naprzemiennej energii, 3 i 6 MeV lub 6 i 9 MeV, dzięki czemu tworzone są dwa radiogramy – z zastosowaniem niższej oraz wyższej energii. Zastosowanie dwóch radiogramów o różnych energiach tego samego obiektu umożliwia uzyskanie obrazowania nie tylko transmitancji poszczególnych elementów badanego obiektu, ale i również rodzajów materiałów – np. lekkich (organicznych) i cięższych (nieorganicznych).

Rysunek 3 przedstawia widok poprzeczny skanera kolejowego CANIS RAIL, rys. 4 przedstawia jego widok 3D. Skaner ten składa się z dwóch zasadniczych elementów: budynku bunkra, w którym umieszczono akcelerator emitujący promieniowanie X o energii 6 i 9MeV, wyposażonego w szczelinowy kolimator, oraz wieżę detektorów, gdzie znajduje się detektor liniowy. Rysunek 5 przedstawia widok poprzeczny na skaner CANIS GANTRY, a rys. 6 przedstawia widok 3D tego skanera w hali. Zasadniczo system składa się z jednego kompletnego elementu



Rys. 6. Widok 3D skanera CANIS GANTRY. A – hala skanera (budynku obsługi nie uwzględniono), B – ramię gantry skanera, C – szlabany, D – bandy naprowadzające.
Fig. 6. CANIS GANTRY scanner 3D view. A - scanner hall (service building not included), B - scanner gantry arm, C - barriers, D - guide rails.

ruchomego (bądź stacjonarnego w przypadku konstrukcji PORTAL), w którym znajdują się źródło promieniowania oraz linijka detektorów.



Rys. 7. Widok 3D ramienia detektorów CANIS GANTRY. A – kanał wentylacyjny, B – moduł detektora liniowego, C – pokrywa okna rewizyjnego, D – moduł zbiorczy/ transmisyjny.
Fig. 7. 3D view of the CANIS GANTRY detector arm. A - ventilation duct, B - line detector module, C - inspection window cover, D - collective / transmission module.

Rysunek 7 przedstawia widok 3D ramienia detekcyjnego systemu CANIS GANTRY. Moduły detekcyjne umieszczane są w orientacji prostopadłej do źródła promieniowania, dzięki czemu uzyskiwany obraz liniowy jest ciągły.

W celu zapewnienia bezpieczeństwa przed promieniowaniem jonizującym stosowane są systemy zabezpieczeń mających na celu redukcję narażenia obsługi oraz postronnych osób na działanie promieniowania wysokoenergetycznego.

Podstawowym elementem zabezpieczeń są osłony radiacyjne (m.in. osłony ołowiane, betonowe itp.), wyznaczone strefy bezpieczeństwa (monitorowane obszary, w których podczas skanowania nie powinny znajdywać się żadne osoby), łańcuchy bezpieczeństwa (tzw. E-Stopy, czyli „awaryjne" guziki zatrzymujące pracę źródła wysokoenergetycznego), ostrzegawcze sygnalizacje świetlne i dźwiękowe i dodatkowe opcjonalne systemy bezpieczeństwa.

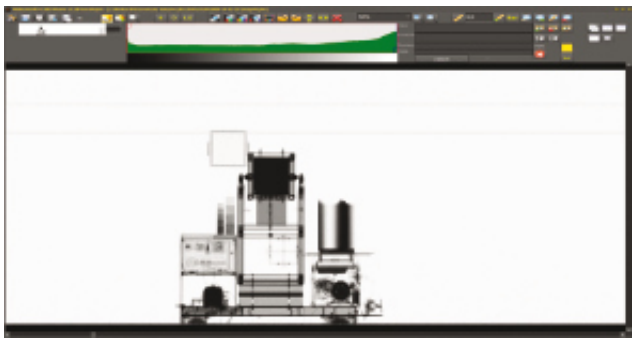
Stosowane systemy bezpieczeństwa, takie jak E-Stopy, osłony radiacyjne i strefy bezpieczeństwa są wymagane przez przepisy prawa (m.in. Prawo Atomowe), a dodatkowe systemy bezpieczeństwa mają na celu poprawienie bezpieczeństwa przy szczególnych warunkach, takich jak np. konieczność przebywania osób w strefie bezpieczeństwa podczas pracy skanera rentgenowskiego.

Sytuacje, które wymuszają obecność osób podczas skanowania to takie, w których np. musi być obecny kierowca w szoferce ciężarówki, maszynista w lokomotywie, operator obsługi maszyny (np. tzw. wagonu chłodni) podczas przejazdu przez skaner pracujący w trybie tzw. portal – czyli skanowanie następuje w wyniku kontrolowanego przejazdu badanego obiektu przez nieruchome ramię detekcyjne skanera. W innym trybie pracy, tzw. tryb gantry – skanowany obiekt jest nieruchomy, a ruchome ramię przejeżdża wzdłuż i dokonuje skanowania, nie jest wymagana obecność kierowcy/maszynisty/osoby obsługi. Tryb nieruchomego ramienia stosowany jest w sytuacjach wymagających dużej przepustowości (np. skanowanie dużej ilości TIRów, podczas którego nie jest wymagane opuszczenie pojazdu przez kierowcę) bądź gdy nie jest możliwe zastosowanie ruchomego ramienia (np. przejazdy kolejowe bądź niewielka przestrzeń pracy urządzenia). Tryb ten wymaga oczywiście, aby obszar pojazdu, w którym znajduje się człowiek, nie był prześwietlany (poprzez wyłączenie lub redukcję emisji źródła promieniowania wysokoenergetycznego), aby nie narażać osoby na niepotrzebną dawkę promieniowania jonizującego. Następuje to poprzez dodatkowy system bezpieczeństwa, który włącza/wyłącza źródło promieniowania w odpowiednim momencie, np. w momencie przejazdu całej szoferki ciężarówki bądź lokomotywy, źródło jest wyłączane.

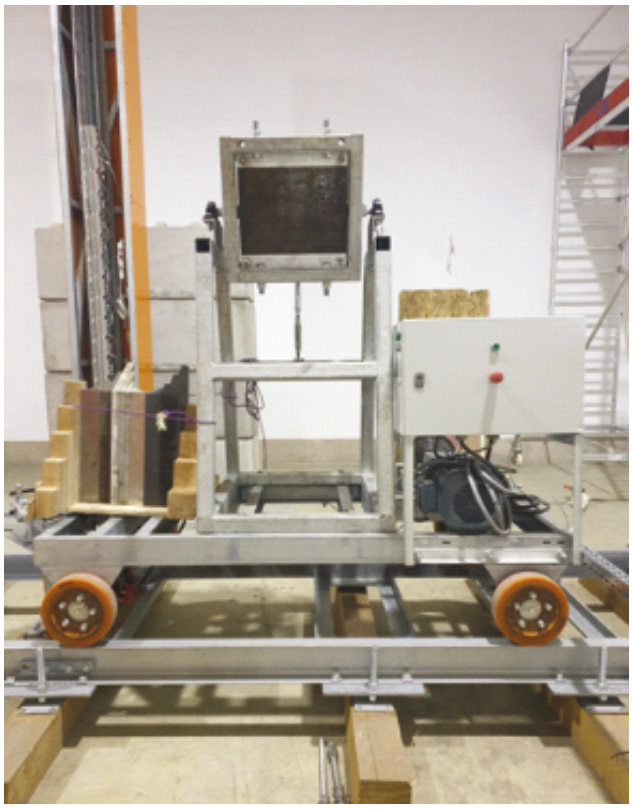
Stosowane systemy cargo, opracowane przez firmę PID Polska Sp. z o.o. i w ramach umowy na komercjalizację produkowane przez polską firmę Multicontrol Sp. z o.o. posiadają dodatkowe, autorskie systemy bezpieczeństwa, które podnoszą bezpieczeństwo radiacyjne poprzez zastosowanie odpowiednich czujników oraz algorytmów rozpoznawania obiektów. W zależności od systemu i dodatkowych wymagań stosowane są zasadniczo dwa podstawowe rodzaje:

1. System rozpoznawania pojazdów kolejowych – jest to system oparty o magnetoindukcyjne czujniki osi oraz odpowiedni algorytm, realizowany w sterowniku przemysłowym PLC, służący do kategoryzacji pojazdów kolejowych na: lokomotywy, wagony pasażerskie, elektryczne/ spalinowe zespoły trakcyjne oraz wagony towarowe. System ten rozpoznaje kategorie pojazdu kolejowego na podstawie obliczonych odległości między osiami, a pomiar może być weryfikowany przez skaner 2D umieszczony nad torami. Ze względu na zasadnicze różnice w konstrukcji podwozi wagonów towarowych, wagonów pasażerskich i lokomotyw nie jest problematyczne ustalenie odpowiedniego algorytmu kategoryzacji badanego pojazdu oraz rozdzielania go od innych pojazdów.

2. System rozpoznawania pojazdów kołowych – jest to system oparty o optyczne laserowe czujniki oraz odpowiedni algorytm, służący do kategoryzacji pojazdów kołowych na: samochody osobowe, samochody dostawcze, ciągniki z naczepą (w dwóch zasadniczych wersjach – europejskiej i amerykańskiej). System ten opiera się na dwóch laserach 2D, umieszczonych pod kątem prostym względem siebie, z czego jeden (ustawiony wzdłużnie) służy do ustalania pozycji badanego pojazdu podczas jego ruchu, a drugi system (ustawiony poprzecznie) dokonuje mapowania kształtu przejeżdżającego obiektu, dzięki czemu uzyskuje się trójwymiarową mapę obiektu. Na podstawie ustalonych charakterystycznych punktów danego badanego obiektu określa się jego kategorię, dzięki czemu system jest w stanie



Rys. 8. Zrzut ekranu demonstracyjnej wersji oprogramowania D-CANIS Viewer służącego do analizy radiogramów.
Fig. 8. Screenshot of a demonstration version of the D-CANIS Viewer software used to analyze radiographs.



Rys. 9. Pojazd testowy .
Fig. 9. Test vehicle.

określić z dużą dokładnością, gdzie w badanym obiekcie znajduje się przestrzeń bagażowa. Dzięki zastosowaniu takiego systemu kierowca nie jest narażany na promieniowanie jonizujące poprzez wyłączanie promieniowania w momencie, gdy przez oś skanera przejeżdża kabina ciężarówki.

Rezultatem prac zrealizowanych w ramach projektu badawczego jest systemu do bezpiecznej kontroli ładunków. System został zamontowany w Stojadłach w hali Centrum Badawczo-Rozwojowego firmy PID Polska Sp. z o.o. gdzie wykonano testy zbliżone do warunków rzeczywistych.

Opracowane w ramach projektu oprogramowanie do wizualizacji pn. D-CANIS Viewer (rys. 8) umożliwia analizę uzyskiwanych radiogramów. Dodatkowo proces analizy

Rys. 10. Zdjęcie stanowiska pojazdu testowego na torowisku, umieszczonego w przelocie skanera.
Fig. 10. Photo of the test vehicle stand on the track, placed in the scanner passage.

radiogramów umożliwia m.in. przeglądanie archiwalnych zdjęć oraz ich ponowną analizę porównawczą z innymi danymi. Oprogramowanie umożliwia na obróbkę cyfrową, m.in. poprzez zastosowanie odpowiednich filtrów graficznych (takich jak wyostrzanie, wykrywanie krawędzi).

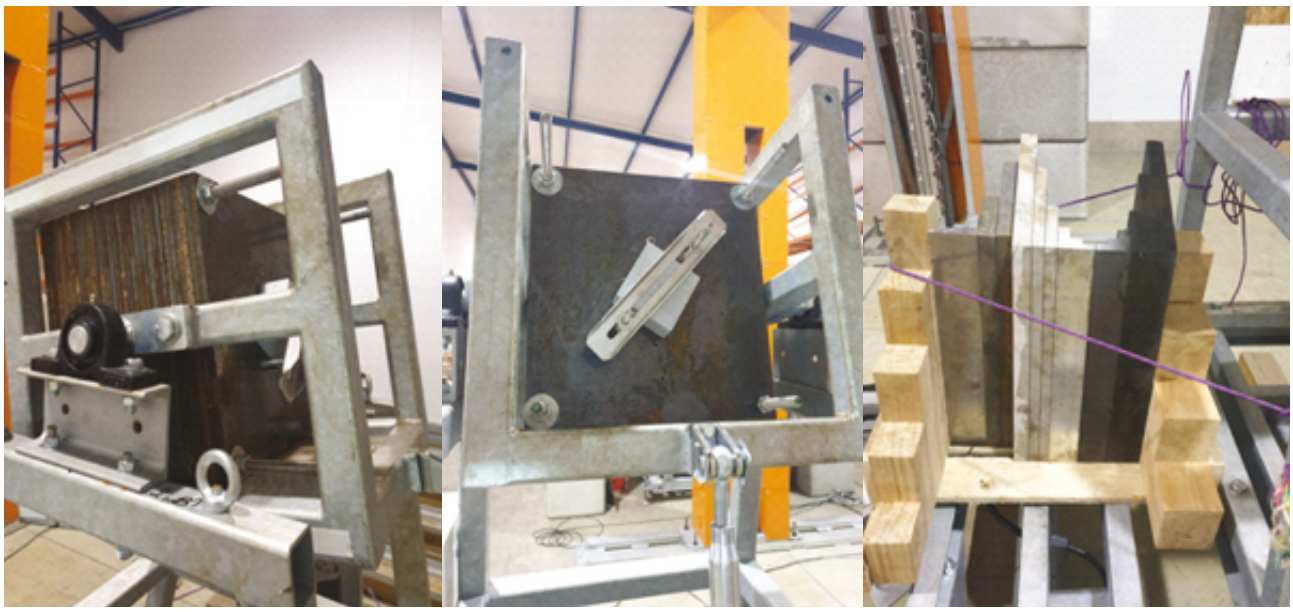
W ramach projektu badawczego zbudowano pojazd testowy (rys. 9), przeznaczony do badania parametrów skanera:

- Pojazd testowy: rama z kołami, z zamontowanymi podzespołami poruszająca się po zamkniętym torowisku o długości ok. 10 metrów.
- Napęd: silnik elektryczny 3-fazowy z przekładnią zębatą, umożliwiającą przełożenie napędu na oś.

Układ sterowania: falownika (inwertera) zasilanego z zewnętrznego źródła zasilania (w razie niedostępności zewnętrznego źródła zasilania można użyć również agregatu prądotwórczego) jest sterowany przez odpowiednio zaprogramowany sterownik PLC.

Pojazd sterowany z komputera operatora całego urządzenia, osiąga zadaną prędkość i utrzymuje ją podczas przejazdu przez oś skanera, po czym hamuje. Pojazd wykonuje przedstawiony manewr dwustronnie, tj. porusza się w obydwie strony.

Rysunek 10 przedstawia zdjęcie stanowiska pojazdu testowego, znajdującego się na torowisku, umieszczonego w przelocie skanera. Wózek porusza się z zadaną prędkością przez oś skanera.



Rys. 11. Ramię pojazdu wraz z próbnikami.
Fig. 11. Vehicle arm with samplers.

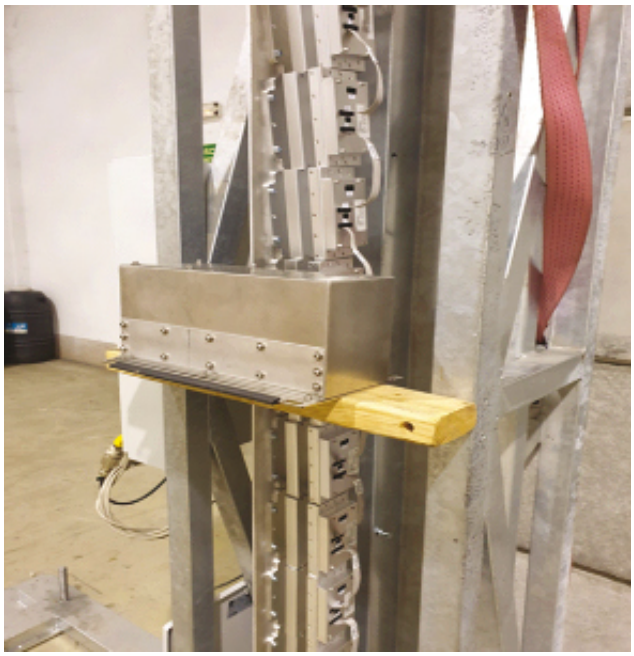
Do badania parametrów pracy skanera, kluczowych z punktu widzenia możliwości wykrywania przemytów (rys. 11), zastosowano:

- Zamontowane na ramieniu pojazdu 30 sztuk blach stalowych o grubości 1cm + 5cm bloczku ołowianego w celu pomiaru penetracji,
- Różne materiały (drewno, grafit, aluminium, stal) o różnych grubościach w celu określenia rozpoznawania materiałów,

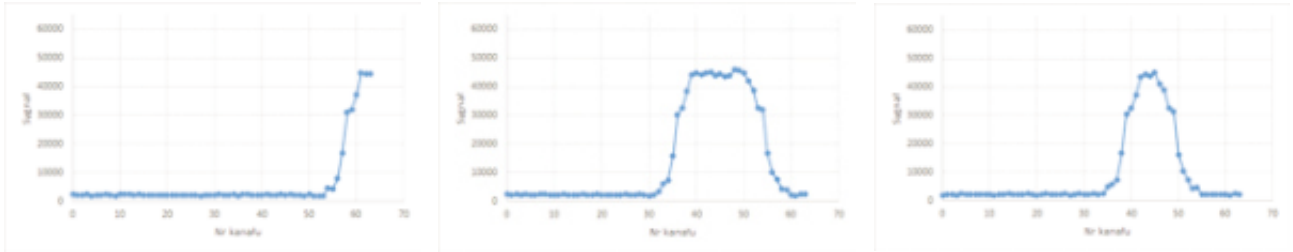
Różne druty o różnych średnicach w celu określenia rozdzielczości skanera.

Podczas wykonywania badań zwrócono szczególną uwagę na problem kolimacji wiązki promieniowania X wytwarzanego przez akcelerator. Niepoprawna kolimacja promieniowania powoduje, że nie wiązka, lecz jego rozproszona składowa jest rejestrowana przez detektor. Do przeprowadzenia procesu kolimacji zastosowano dobrany detektor liniowy poziomy (rys. 12). Oprócz tego, zastosowanie zbyt szerokiej wiązki nie poprawia parametrów skanera. Do ustawiania kolimacji stosowany jest odpowiednio zaprojektowany manipulator akceleratora.

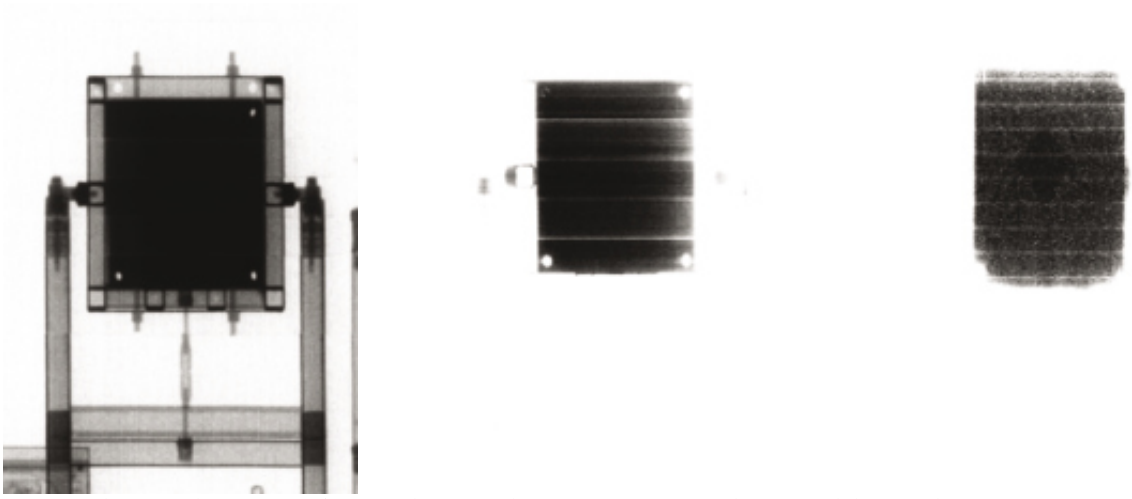
Zmiany położenia wiązki względem detektora poziomego przedstawiono na wykresach z rys. 13. (po kolei: wiązka nie



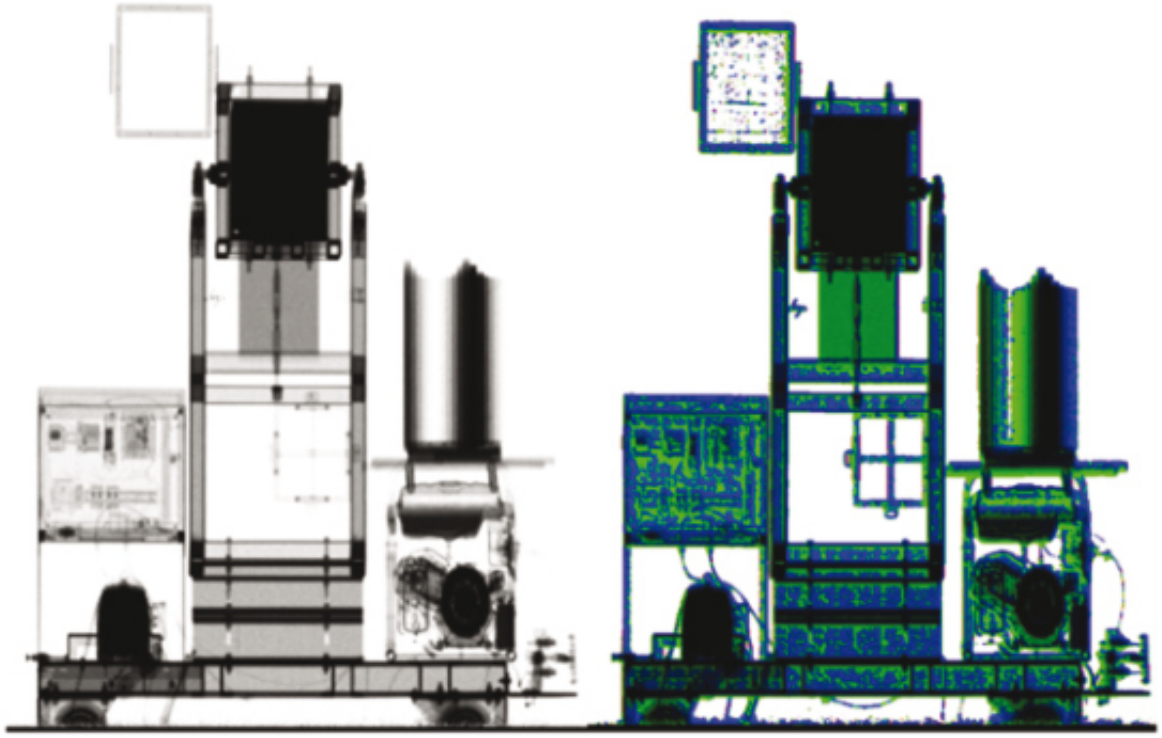
Rys. 12. Detektor liniowy poziomy .
Fig. 12. Linear horizontal detector.



Rys. 13. Zmiany położenia wiązki względem detektora poziomego. Oś pozioma – nr kanału detektora, oś pionowa – wartość sygnału rejestrowanego przez detektor.
Fig. 13. Changes in the position of the beam in relation to the horizontal detector.
The horizontal axis - the number of the detector channel, the vertical axis - the value of the signal registered by the detector.



Rys. 14. Radiogram obrazujący wpływ szerokości wiązki promieniowania. Po lewej – widok normalny, pośrodku – widok po wykontrastowaniu w przypadku stosowania zbyt szerokiej wiązki promieniowania, po prawej – widok po wykontrastowaniu po zoptymalizowaniu szerokości wiązki promieniowania .
Fig. 14. Radiograph showing the effect of the width of the radiation beam. On the left - normal view, in the center - view after contrasting when the beam of radiation is too wide, on the right - view after contrasting after optimizing the width of the radiation beam.



Rys. 15. Radiogram pojazdu testowego oraz efekt działania cyfrowego filtra rozpoznającego materiały.
Fig. 15. Test vehicle radiograph and digital material recognition filter effect.

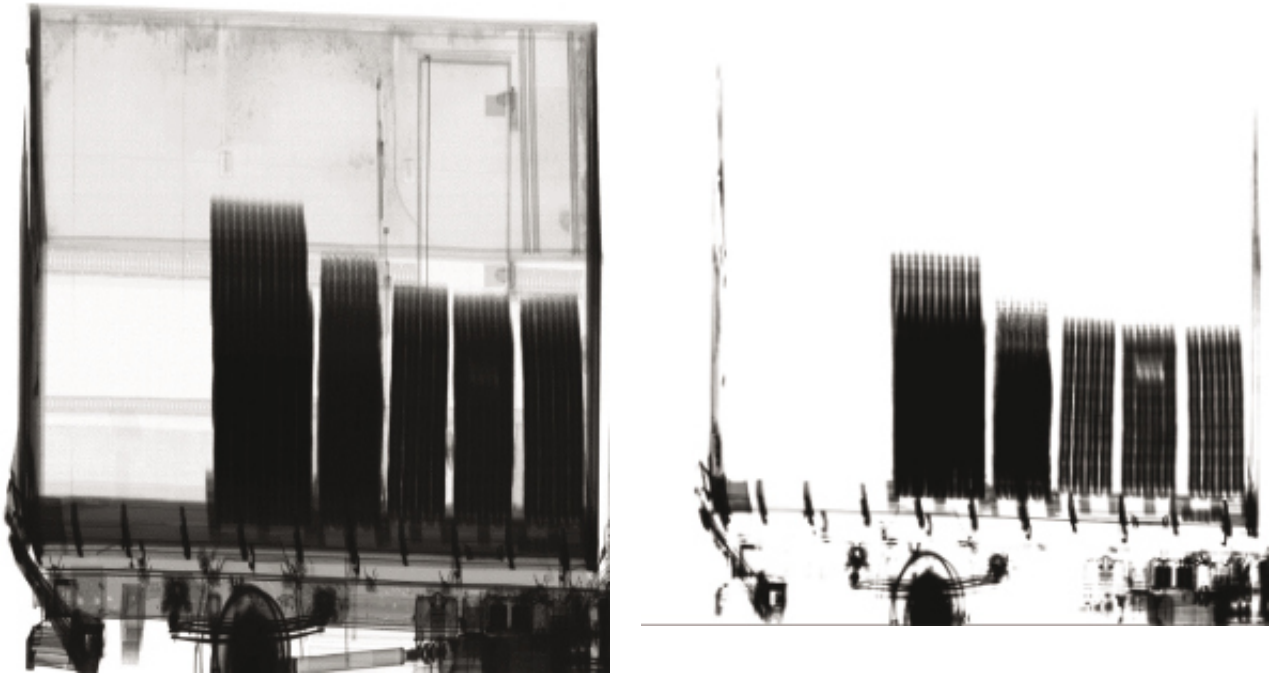
ustawiona; wiązka ustawiona, lecz za szeroka; wiązka ustawiona i zwężona).

Przykładowy efekt stosowania zbyt szerokiej wiązki przedstawiono na przykładzie poniższego radiogramu (Rysunek 14).

Na podstawie powyższych przykładowych radiogramów wyraźnie widać, iż stosowanie zbyt szerokiej wiązki wachlarza promieniowania X powoduje mocne zniekształcenie obrazów i powoduje zanikanie kluczowych informacji zawartych w radiogramie.

Wynika to z faktu, że promieniowanie X rozprasza się w przestrzeni, powodując utratę właściwego kontrastu detektora. Zwężanie wiązki powoduje równocześnie obniżenie jego rozpraszania w przestrzeni. Penetracja stali po poprawieniu kolimacji wiązki osiągnęła zakładaną grubość 30 cm stali (widoczny jest blok ołowiany umieszczony z tyłu blach stalowych).

W ramach projektu przeprowadzono też testy rozpoznawania materiałowego. Rysunek 15 przedstawia radiogram pojazdu testowego oraz efekt działania filtra rozpoznającego



Rys. 16. Zdjęcie rentgenowskie pojazdu. Po lewej – widok normalny, po prawej – po wykontrastowaniu, ze szczególną uwagą na anomalię znajdującą się w jednej z palet (drugiej od prawej).
Fig. 16. Vehicle photo. On the left - view, on the right - after contrasting, with particular attention to the anomaly, they are in one of the palettes (second from right).

materiały. Widoczne są elementy składające się z lekkich materiałów (m.in. zbiornik paliwa w agregacie, aluminiowy korpus agregatu, gruba płyta z plexi) oraz cięższych (m.in. stalowa konstrukcja całego pojazdu, płyty stalowe, silnik, obudowa układów sterowania).

Wykonano serie prześwietleń w warunkach rzeczywistych, tzn. na rzeczywistych pojazdach (ciężarówkach, TIRach) z zawartością. Przeprowadzano próby ukrycia kontrabandy w różnych miejscach pojazdu i bagażu, po czym weryfikowano jego widoczność na radiogramach. Rysunek 16 przedstawia przykładowy radiogram ciężarówki dostawczej z ładunkiem w postaci palet ze słoikami i puszkami, w których umieszczono schowane paczki papierosów. Po nałożeniu odpowiedniego filtra graficznego (m.in. wykontrastowaniu) widać wyraźnie różnicę w składowaniu palety (drugiej od prawej), gdzie zmiana w ułożeniu (anomalia) jest skutkiem umieszczenia w niej podejrzanego ładunku o innej gęstości niż otaczający go towar.

2. Podsumowanie

Uzyskane wyniki badań i wnioski z przeprowadzonych eksperymentów zostały z powodzeniem wdrożone na rynek. Udana komercjalizacja opisywanych urządzeń oznacza również udane wejście na silnie konkurencyjny rynek, gdzie duży nacisk kładzie się na uzyskanie najwyższych parametrów oferowanych urządzeń oraz dodatkowe funkcjonalności, usprawniające proces kontroli.

Projekt jest współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Mazowieckiego na lata 2014-2020.

Projekt został wsparty finansowo w ramach Osi Priorytetowej I „Wykorzystanie działalności badawczo-rozwojowej w gospodarce", Działania 1.2 „Działalność badawczo-rozwojowa przedsiębiorstw", Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Mazowieckiego na lata 2014-2020, współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. Na podstawie Umowy o dofinansowanie nr RPMA.01.02.00-14-9539/17-00 zrealizujemy projekt pt. „CANIS - pierwszy polski skaner RTG do bezinwazyjnej inspekcji ładunków wielkogabarytowych na przejściach granicznych". W wyniku przeprowadzonych prac badawczych został opracowany i przetestowany w warunkach zbliżonych do rzeczywistych demonstracyjny układ detekcyjny do bezinwazyjnej inspekcji ładunków wielkogabarytowych na przejściach granicznych.

Fundusze Europejskie Program Regionalny
Mazowsze. serce Polski
Mazowiecka Jednostka Wdrażania Programów Unijnych
Unia Europejska Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego

Jerzy Kozłowski[1]*, Jakub Kozłowski[2]
[1]*SLV-GSI Polska Sp. z o.o.*
[2]*Sekcja Spawalnicza SIMP - Częstochowa*

Personel nadzoru i kontroli przy pracach antykorozyjnych i izolerskich – wybrane aspekty

Supervision and inspection personnel in anti-corrosion and insulation works - selected aspects

STRESZCZENIE

W referacie zwrócono uwagę na potrzebę utrzymania zdolności użytkowej konstrukcji przez wymagany okres trwałości. Zapewnienie to może być dotrzymane tylko wtedy, gdy w realizację konstrukcji zaangażowany jest kompetentny personel. Wskazano na właściwe stosowanie norm przywołanych w wymaganiach kontraktu oraz na właściwą interpretację konieczności stosowania wymagań zawartych w normach. Odniesiono się do wybranych aspektów związanych kwalifikacjami i kompetencjami personelu w pracach antykorozyjnych i izolerskich. Zwrócono uwagę na pojęcia związane z kwalifikacjami i kompetencjami. Dokonano analizy zapisów norm w odniesieniu do wymagań dla personelu. Stwierdzono, że w wielu przypadkach wymagania te opisane są w normach w sposób bardzo ogólny. Dlatego też właściwym jest określanie w warunkach kontraktu pełnych i zrozumiałych dla wszystkich zainteresowanych stron kontraktu, wymagań odnośnie kwalifikacji i kompetencji personelu. Brak takich uzgodnień może prowadzić do nieporozumień pomiędzy stronami kontraktu. Przedstawiono przykłady szkoleń pozwalających podnieść poziom kompetencji personelu, a także propozycje niezależnych certyfikacji firm z zakresu antykorozji.Pokazano jako przykład, stosowane w Norwegii uregulowania dotyczące wymagań dla personelu antykorozji i izolacji. Zwrócono uwagę na możliwość uzyskania na rynku polskim międzynarodowych certyfikatów personelu i firm FRSIO.

***Słowa kluczowe**: zabezpieczenie antykorozyjne konstrukcji stalowych; personel antykorozji; inspektor FROSIO; izolacja; Norsok M-501; Norsok M-004; kwalifikacje; kompetencje.*

ABSTRACT

The paper highlights the need to ensure the serviceability of the structure for the required life. This assurance can only be met if competent personnel is involved in the execution. The correct application of the standards referred in the contract requirements and the correct interpretation of the need to apply the requirements of the standards were pointed out. Selected aspects related to the qualification and competence of personnel in anti-corrosive and insulating works were referred to. Attention was drawn to concepts related to qualifications and competence. An analysis was made of the provisions of the standards in relation to the requirements for personnel. It was found that in many cases these requirements are described in the standards in a very general way. It is therefore appropriate to specify in the contract terms and conditions, complete and comprehensible to all contract stakeholders, the requirements for personnel qualifications and competences. Failure to do so can lead to misunderstandings between the contracting parties. Examples of training to improve the competence level of personnel are presented, as well as proposals for independent certification of companies in the field of anti-corrosion. As an example, the regulations applied in Norway regarding the requirements for anti-corrosion and insulation personnel were shown. Attention was drawn to the possibility of obtaining international certificates for personnel and FROSIO companies on the Polish market.

***Keywords**: corrosion protection of steel structures; corrosion protection personnel, FROSIO inspector; insulation; Norsok M-501; Norsok M-004; qualifications; competences.*

1. Wstęp

Kompetentny personel nadzoru i kontroli to jeden z warunków koniecznych dla zapewnienia wymaganej trwałości konstrukcji. Każda konstrukcja budowlana, konstrukcja rurociągu lub instalacja przemysłowa powinna zachować swą zdolność użytkową przez założony w projekcie okres trwałości. Zdolność użytkowa to funkcjonowanie konstrukcji bez utraty jej właściwości użytkowych lub jej osłabienia przy założonych w projekcie warunkach eksploatacji, jak również zapewnienie utrzymania wymaganych warunków dla bezpiecznego i skutecznego prowadzenia wewnątrz instalacji procesów.

Zapewnienie trwałości konstrukcji rozpoczyna się już na etapie projektowania konstrukcji pod względem wytrzymałościowym, zabezpieczenia antykorozyjnego oraz właściwego doboru izolacji. Już na tym etapie powinien być zaangażowany personel mający wiedzę nie tylko z zakresu wytrzymałości konstrukcji, ale również z zakresu antykorozji i izolacji.

Oczywistym jest, że kompetentny personel nadzoru i kontroli wymagany jest również na każdym etapie wytwarzania konstrukcji, np. spawanie, badania NDT, nakładanie zabezpieczenia antykorozyjnego i wykonanie izolacji. Jakie zatem wymagania kompetencyjne personel powinien spełnić, na jakiej podstawie powinny być one określane? W zakresie procesu spawania, badań NDT mamy jasne uregulowania dotyczące kompetencji personelu w przedmiotowych normach. Niestety w obszarach antykorozji i izolacji jest inaczej. Jak zatem postępować? Odpowiedzi na powyższe pytania spróbujmy poszukać w zapisach norm.

*Autor korespondencyjny.
E-mail: jerzy.kozlowski@slv-polska.pl

Published by „Badania Nieniszczące i Diagnostyka" Publishing Agenda of SIMP
DOI: 10.26357/BNID.2022.005

2. Podstawy stosowania norm

Zacznijmy zatem od podstaw. Ustawa o normalizacji [1] zniosła obligatoryjność stosowania Polskich Norm. Od 1 stycznia 2003 zgodnie z art. 5 ust. 3 ustawy stosowanie norm jest dobrowolne. Obowiązek stosowania norm pojawia się dopiero wtedy, gdy w warunkach kontraktu dana norma zostanie przywołana. Staje się ona wtedy wymaganiem kontraktu, którego należy przestrzegać. Przy takich powołaniach należy zwrócić uwagę na sposób w jaki normę przywołano, tzn. czy dokonano powołań datowanych, czy niedatowanych. Powołanie datowane (z przywołaniem daty wydania normy) oznacza konieczność stosowania dokładnie tej normy bez względu na jej aktualność. Powołanie niedatowane (bez przywołania daty wydania normy) oznacza, że należy stosować najnowsze wydanie normy, łącznie z wprowadzonymi zmianami, poprawkami i uaktualnieniami. W przypadku projektów z kontrahentami zagranicznymi należy zwracać uwagę, jakie wydania krajowe norm są w wymaganiach kontraktowych przywołane. Jest to ważne ze względu na to, że każdy kraj ma prawo wprowadzić do krajowego wydania normy dodatkowe zapisy np. w postaci uzupełnień czy załączników krajowych, które mogą różnić się np. od wymagań wydania polskiego. Już na etapie przeglądu wymagań kontraktu należy dokładnie zapoznać się z postanowieniami przywołanych norm, wyjaśnić między zainteresowanymi stronami wszystkie niejasności, by uniknąć nieprzyjemnych sytuacji podczas inspekcji w trakcie wytwarzania czy odbiorów końcowych. Ważna uwaga dotycząca traktowania zapisów norm, wg. EN ISO 9001 [2] zapis w normie „powinien, należy" należy traktować jako wymaganie, które musimy spełnić; zapis „zaleca się" oznacza zalecenie; zapis „dopuszcza się" oznacza dopuszczenie; zapis „może" oznacza możliwość i zdolność.

3. Wymagania norm w odniesieniu do kompetencji i kwalifikacji personelu antykorozji i izolacji

Szukając wymagań dla personelu antykorozji przeanalizować należy zapisy norm dotyczących tego procesu np. EN ISO 12944 [3], EN 1090 [4], EN ISO 14918 [5], EN ISO 12960 [6]. W pierwszej części normy EN ISO 12944 [3] „Ogólne wprowadzenie", czytamy „W celu zapewnienia skutecznej ochrony konstrukcji stalowych przed korozją, konieczne jest, aby inwestorzy, projektanci, doradcy, wykonawcy prac antykorozyjnych, inspektorzy nadzoru nad pracami antykorozyjnymi oraz producenci wyrobów lakierowych, mieli do dyspozycji, w zwięzłej formie i według najnowszego stanu techniki, informacje na temat ochrony przed korozją za pomocą systemów malarskich. Takie informacje powinny być możliwie pełne, jednoznaczne i łatwe do zrozumienia, aby uniknąć trudności i nieporozumień między stronami zajmującymi się praktyczną realizacją zabezpieczeń".

W części 7 normy EN ISO 12944 „Wykonywanie i nadzór prac malarskich", w punkcie 4.1 znajdujemy wymagania dotyczące firm wykonujących prace antykorozyjne oraz ich personelu: „Firmy zawierające umowy na nakładanie ochronnych systemów malarskich na konstrukcje stalowe i ich personel, powinny być zdolne do wykonania prac w sposób prawidłowy i bezpieczny. Prace wymagające szczególnej staranności w zakresie ich wykonania powinny być przeprowadzane wyłącznie przez personel posiadający odpowiednie kwalifikacje. Wykonawca powinien przedstawić oświadczenie dotyczące metody, w którym wykazuje swoją zdolność do osiągnięcia określonego poziomu jakości dla każdego procesu. Na żądanie wykonawca powinien dostarczyć klientowi odpowiednią dokumentację wykonawczą i nadzorczą (plany zapewnienia jakości)". Zapisy te, w rozumieniu normy dotyczą np.: przygotowania powierzchni, nakładania wyrobów lakierowych, schnięcia i kontroli jakości.

Wymagania dotyczące nadzoru nad pracami antykorozyjnymi zawarte są również w punkcie 7 przywołanej części 7 normy EN ISO 12944 [3]: „Należy nadzorować wykonywanie pracy na wszystkich jej etapach. Nadzór powinny przeprowadzić odpowiednio wykwalifikowane i doświadczone osoby. Wykonawca powinien być odpowiedzialny za ten nadzór, ale dodatkowo wskazany jest, nawet w przypadku prac antykorozyjnych w warunkach warsztatowych, nadzór ze strony klienta"; „Poziom nadzoru zależy od rodzaju i znaczenia projektu, stopnia trudności pracy i warunków lokalnych oraz od rodzaju powłoki i jej planowanego okresu użytkowania. Nadzór wymaga odpowiedniej wiedzy technicznej i doświadczenia". Wymagania odnośnie kwalifikacji wykonawców, podwykonawców i personelu zawiera również arkusz 8 normy EN ISO 12944 [3]. W tabeli 3 określającej zawartość specyfikacji prac malarskich, w odniesieniu do kwalifikacji wykonawców i podwykonawców norma nakazuje „ustalić wymagania". Natomiast w odniesieniu do kwalifikacji personelu odsyła nas do punktu 4.1 normy EN ISO 12944 7 [3].

Na mocy Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 305/2021 [7] oraz obowiązującej w Polsce Ustawy o Wyrobach Budowlanych [8], wytwórcy konstrukcji budowlanych, stalowych lub aluminiowych, wprowadzanych na rynek europejski zobowiązani są do przestrzegania postanowień zharmonizowanej normy EN 1090 [4]. Jej cześć pierwsza zawiera między innymi wymagania: „Odpowiedzialność, zwierzchność i wzajemne relacje personelu zarządzającego wykonywaniem prac mających wpływ na zgodność wyrobu, powinny być określone"; „Personel zaangażowany w działania mające wpływ na ocenę zgodności elementów, powinien mieć odpowiednie kwalifikacje i być szkolony w zakresie elementów klasy wykonania egzekwowanej przez klienta". Norma EN 1090 [4] obejmuje swym zakresem także zabezpieczenie antykorozyjne konstrukcji, dlatego też przywołane wymagania dotyczą również personelu zaangażowanego w ten proces. Norma EN 1090 [4] w arkuszu drugim, w zakresie antykorozji przywołuje wymagania serii norm EN ISO 12944 [3]. Odnosi się także do innych rodzajów zabezpieczeń antykorozyjnych jak: cynkowanie zanurzeniowe, natryskiwanie cieplne czy malowanie proszkowe.

Proces nakładania powłok natryskiwanych cieplnie, wymaga spełnienia zapisów norm: EN ISO 14918 [5] w zakresie uprawnień dla metalizatorów oraz EN ISO 12690 [6] w zakresie obowiązków i odpowiedzialności nadzoru nad procesem.

W normie EN ISO 14918 [5] określono sposób przeprowadzenia egzaminu dla metalizatorów, zdefiniowano wymagania, zakres uprawnień, warunki egzaminu, kryteria oceny i świadectwo egzaminu metalizatora. Zakres wiedzy jaką powinien posiadać personel nadzorujący proces oraz zakresy obowiązków i odpowiedzialności, a także sposób koordynacji czynności w celu zapewnienia dobrej jakości powłok określono w normie EN ISO 12690 [6]. Do zasadniczych czynności związanych z natryskiwaniem cieplnym przypisano odpowiedni zakres obowiązków i odpowiedzialności.

Przywołane przykłady norm wskazują na brak jednoznacznych wymagań dla personelu antykorozji. Dlatego też podczas przeglądu wymagań kontraktu, koniecznym jest doprecyzowanie wymagań oraz weryfikacja kompetencji personelu. Pamiętać należy, że podpisując kontrakt, w którym zapisano np. „zabezpieczenie antykorozyjne wykonać zgodnie z PN-EN ISO 12944" [3] zobowiązujemy się do spełnienia wszystkich wymagań dotyczących przedmiotu kontraktu, zawartych we wszystkich arkuszach tej serii norm. Jeśli kontrakt obejmuje wyroby budowlane, dla których ma zastosowanie norma EN 1090 [4], to spełnić należy również wymagania norm w niej przywołanych.

Podobne problemy z brakiem jednoznacznego określenia wymagań dla personelu wykonującego i nadzorującego, występują w procesie nakładania izolacji przemysłowych. W istniejących normach branżowych np. PN-B-20105 [9]; PN-B-20105:2014 [10] brak jest odniesienia do wymagań w stosunku do personelu.Czy można lepiej? Patrząc na rozwiązania stosowane w innych krajach europejskich np. Norwegii należy odpowiedzieć – tak można. Norwegowie w normie Norsok M-501 [11] zawarli wymagania zarówno dla firm jak i personelu antykorozji, określając jednoznacznie poziom i rodzaj certyfikatów, jakie obowiązany jest posiadać personel wykonujący nadzór i kontrole prac antykorozyjnych (przywołano odpowiednie poziomy certyfikatów FROSIO lub NACE).

Analogicznie postąpiono w obszarze prac izolacyjnych. W normie Norsok M-004 [12] określono wymagania dla monterów izolacji, personelu wykonującego nadzór i kontrolę, dla którego przywołano również poziomy certyfikacji FROSIO.

Zagadnienia dotyczące personelu antykorozji i izolacji autorzy przedstawili również w pracach:

- Wybrane zagadnienia z zakresu antykorozji stalowych konstrukcji spawanych na podstawie przepisów niemieckich ZTV-ING i VGB/BAW [13].
- Powrót do podstaw – Specyfikacja konstrukcji stalowych wg EN 1090 [14].
- Wymagania kompetencyjne i formy szkolenia personelu antykorozji w Polsce i Niemczech – podobieństwa i różnice [15].
- Konstrukcje stalowe rurociągów i instalacji przemysłowych. Zapewnienie wymaganej trwałości konstrukcji oraz właściwych parametrów eksploatacyjnych – wybrane aspekty [16].

4. Kwalifikacje i kompetencje – jak to rozumieć?

W wymaganiach norm pojawiają się stwierdzenia „odpowiednia wiedza", „doświadczenie", „kwalifikacje", „kompetencje", brakuje jednak ich jednoznacznej interpretacji. Poniżej kilka wyjaśnień.

Kwalifikacje zawodowe lub też kompetencje rozumiane są często jako zestaw wiedzy i umiejętności wymaganych do realizacji składowych zadań zawodowych. Wynikają one z określonych dokumentów (świadectw, dyplomów, zaświadczeń) i stwarzają domniemanie, że legitymujący się nimi człowiek ma odpowiednie kompetencje. Według Rozporządzenia Ministra Edukacji Narodowej [17], kwalifikacje w zawodzie - to zestawy oczekiwanych efektów kształcenia: wiedzy, umiejętności zawodowych oraz kompetencji personalnych i społecznych, pozwalające na samodzielne wykonywanie zadań zawodowych. Natomiast interpretacja łacińskiego terminu competentia, wskazuje, że kompetencje rozumie się jako posiadanie wiedzy umożliwiające wydawanie sądu, wypowiadanie autorytatywnego zdania, zakres zagadnień, o których określona osoba może wyrokować, gdyż jest w posiadaniu odpowiedniego doświadczenia oraz wiadomości, co prowadzi do stwierdzenia, iż człowiek kompetentny to osoba, która do określonych działań posiada odpowiednie przygotowanie. Kompetencje (kwalifikacje personelu) definiuje się w literaturze różnorodnie, jednak w każdej z nich powtarza się udział trzech podstawowych składników: wiedzy, umiejętności oraz odpowiedzialności. Określenie kompetencji według słownika języka polskiego to zakres uprawnień, pełnomocnictw oraz jako zakres czyjejś wiedzy, odpowiedzialności i umiejętności, na której podstawie można stwierdzić, iż kompetentny to ktoś uprawniony, upełnomocniony, do wydawania decyzji, do działania, mający podstawy, kwalifikacje do wypowiadania sądów i ocen. Natomiast kwalifikacje zdefiniowano jako wykształcenie i uzdolnienia potrzebne do pełnienia jakiejś funkcji lub wykonywania jakiegoś zawodu. Norma dotycząca systemów zarządzania jakością EN ISO 9000:2015 [2] kompetencje definiuje jako zdolność stosowania wiedzy i umiejętności w celu osiągnięcia zamierzonych rezultatów, przy czym wykazana kompetencja jest czasami określana jako kwalifikacja. Pamiętać należy, że kwalifikacje zawodowe podlegają ciągłym zmianom na skutek zmian zachodzących otoczeniu oraz rozwijania indywidualnych możliwości człowieka. Jak przedstawiono, trudno jednoznacznie odpowiedzieć na pytanie o właściwie określenie wymagań w zakresie kwalifikacji/kompetencji. Niezawodnym sposobem na uniknięcie nieporozumień między stronami kontraktu jest szczegółowe doprecyzowanie tych wymagań przed podpisaniem umowy.

5. Jak zdobyć kwalifikacje i kompetencje z zakresu antykorozji i izolacji?

Na rynku polskim znaleźć różne propozycje szkoleń i kursów z zakresu antykorozji. Dostępne są studia na kierunkach związanych z antykorozją oraz różne formy szkoleń i kursów trwających od np. kilku godzin do 3 tygodni. Przed podjęciem decyzji o wyborze szkolenia należy upewnić się co do wartości merytorycznej danego szkolenia oraz tego jak wybrane szkolenie jest postrzegane/akceptowane przez naszych obecnych czy potencjalnych zleceniodawców. Warty podkreślenia jest, uznawany na całym świecie, kurs Inspektorów zabezpieczeń antykorozyjnych FROSIO, prowadzony wspólnie przez SLV-GSI Polska oraz SLV Duisburg (jednostka szkoleniowa uznana przez FROSIO). Jest to jedyny w Polsce kurs FROSIO gdzie wykłady oraz egzamin prowadzone są w języku polskim.

Nieco inaczej przedstawia się kształcenie personelu z zakresu izolacji przemysłowych. Najlepiej funkcjonują szkolenia w zakresie personelu wykonującego izolację (monter izolacji przemysłowych). Istnieją szkoły zawodowe kształcące teoretycznie i praktycznie izolerów. Wykwalifikowany monter izolacji przemysłowych jest przygotowany do wykonania obmiaru robót, obliczeń materiałowych i wykonania izolacji. Brak jest natomiast szkoleń dla osób nadzoru i kontroli tych prac. Jedynym kursem o uznaniu krajowym i międzynarodowym, jest na naszym rynku kurs Inspektora Izolacji Technicznych FROSIO Sheme Insulation. Podobnie jak certyfikaty inspektora antykorozji FROSIO, certyfikaty inspektora izolacji FROSIO Sheme Insulation wydawane są na trzech poziomach uzależnionych od posiadanego doświadczenia zawodowego. I tak: certyfikat stopnia 1 może otrzymać każdy kto uczestniczy w kursie i zda pozytywnie egzamin teoretyczny i praktyczny; dla uzyskania certyfikatu stopnia 2 wymagane jest dodatkowo 2-letnie doświadczenie zawodowe z zakresie izolacji, dla uzyskania certyfikatu stopnia 3 wymagane jest 5-letnie doświadczenie zawodowe, a w nim minimum 2-letnie doświadczenie w pracach inspektorskich. Od grudnia 2021 kurs ten jest również dostępny na rynku polskim i analogicznie jak kurs dla inspektorów antykorozji prowadzony jest w języku polskim. Organizatorem kursu, podobnie jak dla antykorozji, jest SLV Duisburg wraz z SLV-GSI Polska. Nadmienić należy, że jednostki te stale poszerzają swoją ofertę szkoleń uznawanych na rynkach krajowym i zagranicznych jak np. szkolenia teoretyczne i praktyczne: malarzy – farby ciekłe i proszkowe; piaskarzy; metalizatorów; osób nadzorujących proces metalizacji. Certyfikaty po ukończonym szkoleniu i zdanym egzaminie wystawione będą przez uznaną przez FROSIO jednostkę szkoleniową SLV Duisburg.

Nową propozycją w zakresie potwierdzania kompetencji personelu i firm wykonujących zabezpieczenia antykorozyjne jest opracowany przez norweskie FROSIO proces certyfikacji firm FROSIO-GuiD-CP. Określono w nim wymagania jakości dla firm, które chcą zdobyć międzynarodowy certyfikat FROSIO GuiD-CP w zakresie prowadzenia procesów ochrony antykorozyjnej. Certyfikacja swym zakresem obejmuje ochronę antykorozyjną wykonaną poprzez powłoki organiczne, natryskiwanie cieplne, cynkowanie ogniowe, systemy duplex i zabezpieczenie ognioochronne. Innym rodzajem potwierdzenia kompetencji jest Świadectwo wykonawcy Robót Antykorozyjnych wydawane przez SLV Halle GmbH. Wymienione certyfikacje te są już dostępne na rynku Polskim, a proces audytowy przeprowadzany jest przez polskich audytorów.

6. Podsumowanie

Jak przedstawiono w niniejszym artykule, w wielu przypadkach brak jest uregulowań jasno określających poziom wykształcenia i kompetencji w stosunku do personelu i firm. Należy zatem pamiętać o bezwzględnej potrzebie, a wręcz konieczności każdorazowego precyzowania wymagań kompetencyjnych personelu biorącego udział w poszczególnych etapach realizacji kontraktu (projektowanie, wykonanie, nadzór, wykonanie zabezpieczeń antykorozyjnych, prace izolerskie) przed podpisaniem kontraktu. Koniecznym jest też, aby strony zainteresowane jednakowo rozumiały znaczenie stosowanych w normach terminów „kompetencje" i „kwalifikacje". Należy również zweryfikować znaczenie przedstawianych zaświadczeń i certyfikatów personelu w odniesieniu do wymagań danego kontraktu, szczególnie gdy jest on realizowany z kontrahentem zagranicznym. Podejmując decyzję o skierowaniu personelu na szkolenie, należy się kierować jego wartością merytoryczną, a także tym jak jest ono postrzegane są na rynku i czy uzyskanie po nim kwalifikacje personelu spełniają wymagania zapisane w kontrakcie.

Przedstawione przykłady rozwiązań stosowanych np. w Norwegii mogą być pomocne przy ustalaniu wymagań dla personelu akceptowanych przez wszystkie strony kontraktu.

Oczywistym jest, że tylko kompetentny personel, posiadający wymaganą wiedzę i doświadczenie, jest w stanie zapewnić właściwe, (zgodnie z założoną technologią i warunkami zawartymi w specyfikacji wyrobu), zaprojektowanie, wykonanie i ocenę jakości prac antykorozyjnych czy izolacyjnych.

Potwierdzeniem kompetencji personelu i firm wykonujących prace antykorozyjne i izolerskie jest niezależna certyfikacja personelu i firm, która daje możliwość obiektywnej oceny jakości ich działań i kwalifikacji.

7. Literatura

[1] Ustawa o normalizacji z dnia 12 września 2002 – tekst jednolity (Dz.U. z 2015r. poz. 1483)
[2] EN ISO 9001:2015 Systemy zarządzania jakością
[3] EN ISO12944-1÷9 Farby i lakiery - Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów malarskich.
[4] EN 1090-1,-2+A1:2012 Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych Część1: Zasady oceny zgodności elementów konstrukcyjnych; Część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych; Część 3: Wymagania techniczne dotyczące wykonania konstrukcji aluminiowych.

[5] EN ISO 14918:2018 Natryskiwanie cieplne. Egzamin dla metalizatorów.
[6] EN ISO 12690:2011 Powłoki metalowe i inne nieorganiczne. Nadzór nad natryskiwaniem cieplnym. Obowiązki i odpowiedzialność.
[7] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 z dnia 9 marca 2011.
[8] Ustawa o wyrobach budowlanych z dnia 15 kwietnia 2004 – tekst jednolity (Dz.U. z 2014r. poz. 883)
[9] PN-B-20105:2014 Izolacja cieplna wyposażenia budynków i instalacji przemysłowych. Wymagania dotyczące projektowania, wykonania i odbioru robót
[10] PN-B-02421:2000 Ogrzewnictwo i ciepłownictwo. Izolacja cieplna przewodów, armatury i urządzeń. Wymagania i badania odbiorcze
[11] Norsok M-501:2012 Przygotowanie powierzchni i powłoki ochronna
[12] Norsok M-004:2018 Izolacja rur i urządzeń
[13] M. Czysch, J. Kozłowski, J. Kozłowski, „Wybrane zagadnienia z zakresu antykorozji stalowych konstrukcji spawanych na podstawie niemieckich przepisów ZTV-ING i VGB/BAW" Przegląd Spawalnictwa, Vol.89, nr 5, str. 71-74, 2017.
[14] J. Kozłowski, J. Kozłowski, „Powrót do podstaw - Specyfikacja konstrukcji stalowych wg EN 1090" Przegląd Spawalnictwa, Vol. 90, nr 5, str. 14-17, 2018.
[15] M. Czysch, J. Kozłowski „Wymagane kompetencje i formy kształcenia personelu antykorozji w Polsce i Niemczech – podobieństwa i różnice" materiały konferencyjne XI Konferencja Naukowo-Techniczna PSK 10-12.05.2017
[16] J. Kozłowski, M. Czysch, J. Kozłowski, „Konstrukcje stalowe rurociągów i instalacji przemysłowych. Zapewnienie wymaganej trwałości konstrukcji oraz właściwych parametrów eksploatacyjnych – wybrane aspekty" materiały konferencyjne XXVI Naukowo-Technicznej Krajowej Konferencji Spawalniczej „Postęp, innowacje i wymagania jakościowe procesów spajania" Międzyzdroje 17-19.05.2022
[17] Rozporządzenie Ministra Edukacji Narodowej z dnia 13 grudnia 2016 r. w sprawie klasyfikacji zawodów szkolnictwa zawodowego (Dz.U. z 2016 r. poz.2094)

Dariusz Mężyk[1], Bogdan Zając[2]*, Grzegorz Olszewski[2], Marcin Kowal[2]
[1]*Pracownia Diagnostyki Technicznej i Modernizacji Urządzeń Energetycznych, Instytut Energetyki - Instytut Badawczy*
[2]*Laboratorium Badań Materiałowych, Narodowe Centrum Badań Jądrowych*

Określenie stopnia wyczerpania struktury i własności mechanicznych wybranych elementów głównych rurociągów parowych bloków energetycznych

Determination of the degree of depletion of the structure and mechanical properties of selected components of main steam pipelines of power units

STRESZCZENIE

W artykule omówiono główne czynniki wpływające na awaryjność układów rurociągów bloków energetycznych krajowych elektrowni i elektrociepłowni. Ze względu na warunki pracy i związane z nimi obciążenia najistotniejsze znaczenie mają rurociągi pary, a głównie ich elementy kształtowe (kolana, trójniki, czwórniki, mieszacze pary, zasuwy główne). Wymieniono podstawowe metody oceny stanu technicznego głównych elementów rurociągów zarówno metodami badań nieniszczących jak i niszczących. W artykule skoncentrowano się na wynikach oceny odcinka kolana (prostki) φ =508 x 20 ze stali 10H2M pobranego z rurociągu pary wtórnie przegrzanej o sumarycznym czasie pracy około T = 280 000 godzin.

***Słowa kluczowe**: rurociągi pary świeżej; badania NDT, koncentracja naprężeń, wyznaczanie trwałości eksploatacyjnej.*

ABSTRACT

The article discusses the main factors influencing the failure frequency of pipeline systems of power units in domestic power plants and combined heat and power plants. Due to the operating conditions and the associated loads, the most important are the fresh steam pipelines, and mainly their shaped elements (elbows, tees, cross-pieces, steam mixers, main valves). The basic methods of assessing the technical condition of the main elements of pipelines using both non-destructive and destructive testing methods were listed. The article focuses on the results of the assessment of the φ= 508 x 20 bend (straight) section made of 10H2M steel taken from a reheated steam pipeline with a total operating time of approximately T = 280,000 hours.

***Keywords**: fresh steam pipelines, NDT tests; stress concentration; determination of service life.*

1. Wstęp

Długotrwała eksploatacja bloków energetycznych powoduje, że materiały konstrukcyjne stosowane w przemyśle energetycznym pracują w warunkach zmiennych pól naprężeń i zmiennych temperatur. Materiały te są narażone na oddziaływanie środowiska gazów i cieczy oraz na działanie obciążeń mechanicznych. Czynniki te powodują w okresie eksploatacji zmiany mikrostruktury materiałów i w rezultacie pogorszenie ich własności mechanicznych. Efektem wzrostu wartości i koncentracji naprężeń jest pękanie złączy spawanych i awarie elementów kształtowych instalacji cieplnych i ciśnieniowych obiektów energetycznych.

2. Główne czynniki awaryjności układów rurociągowych

Wysoka temperatura w zakresie temperatur rzędu 540°C oraz wysokie wartości ciśnienia dochodzące do 20 MPa powodują, że elementy z jakich zbudowana jest instalacja nie zawsze są w stanie przenieść pojawiające się obciążenia i w konsekwencji rurociągi mogą ulec uszkodzeniu lub nawet zniszczeniu.

Bardzo istotnym problemem występującym podczas eksploatacji urządzeń energetycznych jest wzajemne oddziaływanie układu rurociąg - turbina. Z uwagi na to, że z tym problemem boryka się większość krajowych elektrowni i elektrociepłowni prowadzone są wielokierunkowe badania zmierzające do określenia wzajemnego oddziaływania wymienionych elementów bloków energetycznych [1].

Na wytężenie materiału elementów ciśnieniowych główny wpływ mają naprężenia pochodzące od ciśnienia wewnętrznego i naprężenia temperaturowe. Duży wpływ mają również obciążenia mechaniczne pochodzące od ciężaru rurociągu i zamontowanej na nim armatury oraz pochodzące od ograniczenia swobody dylatacji cieplnej i jakości pracy systemu zamocowań.

Ze względu na warunki pracy i związane z nimi obciążenia najistotniejsze znaczenie mają rurociągi pary świeżej,

*Autor korespondencyjny.
E-mail: bogdan.zajac@ncbj.gov.pl

Published by „Badania Nieniszczące i Diagnostyka" Publishing Agenda of SIMP
DOI: 10.26357/BNID.2022.006

a głównie ich elementy kształtowe (kolana, trójniki, czwórniki, mieszacze pary, zasuwy główne).

Rurociągi pary wtórnie przegrzanej pracują w wysokiej temperaturze, lecz przy znacznie niższych ciśnieniach. Na rurociągach pary wtórnie przegrzanej znajdują się zawory bezpieczeństwa. Ta część rurociągów pracuje w cyklu okresowym, przez co dochodzi do gwałtownych schłodzeń i wzrostów temperatur wpływając na niszczenie niskocyklowe. Z tego powodu tę część rurociągu należy objąć szczególna troską.

3. Diagnostyka stanu technicznego

Zgodnie z obowiązującą instrukcją, diagnostyką należy objąć rurociągi, a szczególnie mocno obciążone elementy rurociągów. Elementy rurociągów należy badać metodami nieniszczącymi i niszczącymi w tym badaniami materiałowymi. W przypadku gdy wystąpią zauważalne zmiany kształtu lub struktury materiału należy zwiększyć częstotliwość badań elementów [2].

Istotne znaczenie dla diagnostyki stanu technicznego rurociągów ma monitoring położeń przestrzennych rurociągów wysokoprężnych. Wyniki pomiarów geodezyjnych prowadzone w stanach zimnych rurociągów, jak i w stanach pełnego obciążenia cieplnego stanowią podstawę do określenia rozkładu naprężeń temperaturowych wzdłuż trasy rurociągu, ze szczególnym uwzględnieniem elementów kształtowych rozmieszczonych na rurociągu.

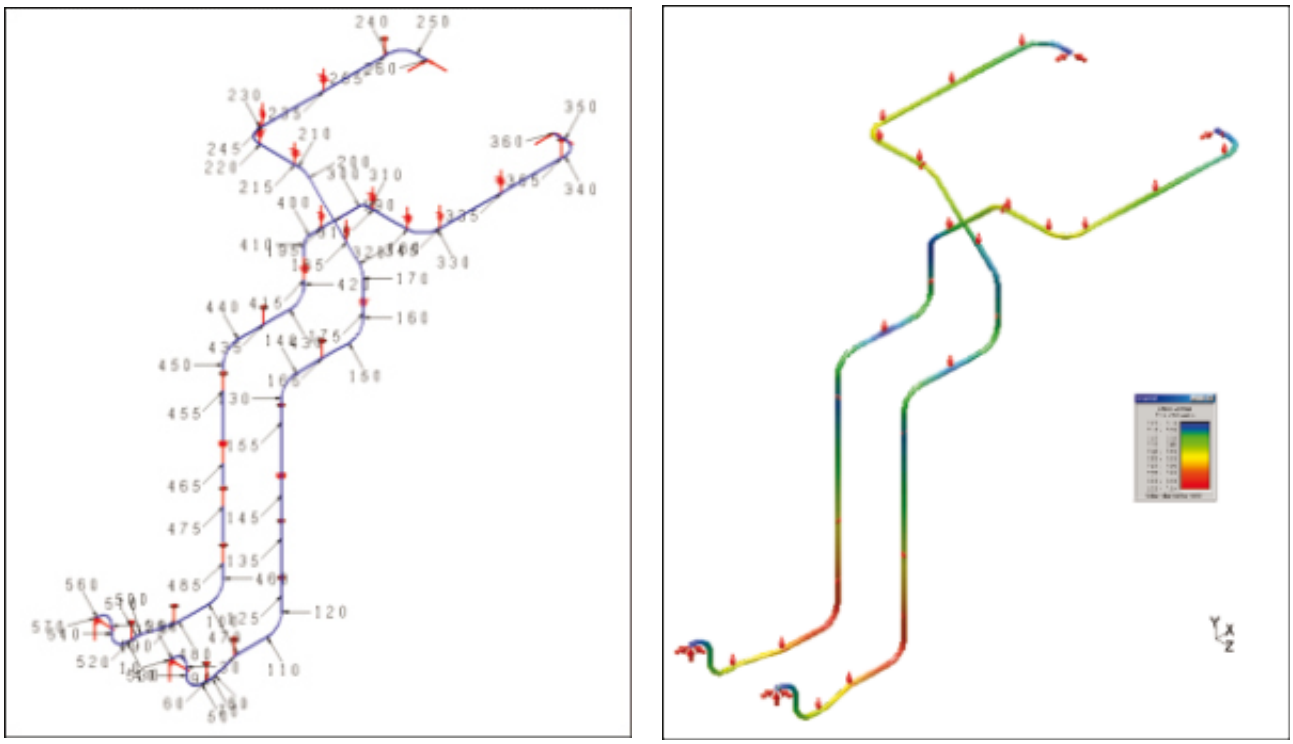
W związku z tym, że sprawność techniczna elementów kształtowych ma zasadnicze znaczenie dla bezpieczeństwa eksploatacji rurociągów i całego bloku energetycznego winny one być również objęte systemem diagnostycznym.

Bezpieczeństwo eksploatacji obiektu wiąże się z trwałością, którą można włączyć w zakres ogólnie pojętego wytężenia materiału.

Pojęcie trwałości wymaga określenia:
- czasu granicznego do zniszczenia,
- granicznej liczby cykli do zniszczenia,
- liczby operacji technologicznych,
- innych wielkości mierzalnych.

Wśród czynników wpływających na trwałość elementów urządzeń ciśnieniowych znajdują się czynniki związane z:
- wykonaniem elementu,
- montażem,
- eksploatacją,
- diagnostyką, naprawami i modernizacją [3].

Aby zapobiec sytuacjom awaryjnym należy kontrolować pracę systemu zamocowań, sprawdzać geodezyjnie położenie rurociągów w stanach zimnych i gorących oraz prowadzić badania diagnostyczne pozwalające określić stan naprężeń, stopień degradacji struktury materiału, a także przeprowadzić obliczenia oparte o rzeczywiste dane uwzględniające przemieszczenia dylatacyjne i położenie rurociągu w stanie zimnym i gorącym. Ze względu na zmienność stanu wytężenia materiału obliczenia stopnia wyczerpania trwałości eksploatacyjnej możliwe są w sposób przybliżony. Przeliczenia elastyczności rurociągu prowadzone w oparciu o dane zgromadzone podczas badań rurociągów wraz z armaturą potrafią przybliżyć odpowiedź dotyczącą prawidłowości prowadzonej eksploatacji oraz rozpatrywać symulowane stany przeciążeń i ograniczeń w pracy rurociągów[4]. Przykładowe obliczenia stanu naprężeń rurociągów przy pomocy programu ADLPIPE (Rys. 1).



Rys. 1. Rurociągi pary wtórnej: a) węzły obliczeniowe, b) rozkład naprężeń od temperatury.
Fig. 1. Secondary steam pipelines: a) calculation nodes, b) stress distribution due to temperature.

Rurociąg jest wykonany z materiału 10H2M, parametry obliczeniowe : p = 2,9 MPa, t = 540°C. Wg PN-79/M-34033 Naprężenia dopuszczalne wynoszą k (540°C) = 59,13 MPa [4].

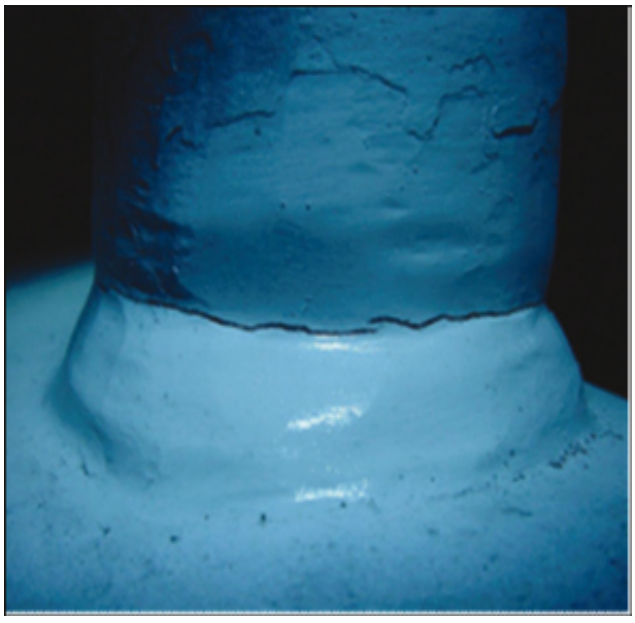
Przeprowadzono analizę wytężenia rurociągu zgodnie z procedurą przedstawioną w normie ASME B31.1 – 1995 [5] w wyniku której określono rozkład naprężenia materiału rurociągu w trakcie obciążenia cieplnego obiektu. Największe wartości naprężenia przedstawiono w Tabeli 1.

Czynnikiem decydującym o czasie, po którym elementy rurociągu należy poddać specjalnym badaniom jest naprężenie. Wartość naprężenia należy kontrolować w miejscach kryterialnych jakimi są elementy kształtowe (mieszacze, łuki, kolanka). Częstą przyczyną uszkodzeń (rys. 2) jest występowanie złożonego stanu naprężenia w wyniku oddziaływania momentów gnących i skręcających.

W zależności od stopnia degradacji materiału stosowane są różne technologie napraw: szlifowanie, napawanie z obróbką cieplną lub wymiana spoiny.

Tab. 1. Przykładowe węzły o największych naprężeniach od temperatury.
Tab. 1. Examples of nodes with the highest stresses due to temperature.

Lp.	Numer węzła	Wartość naprężenia w pracy cieplnej [MPa]	Naprężenie cieplne / Naprężenie dopuszczalne
No	No of nodes	Thermal stress [MPa]	thermal stress / allowable stress
1	2	3	4
01	460 BEG	56.7	0.953
02	470 END	56.1	0.943
03	120 END	55.1	0.925
04	110 BEG	54.6	0.917
05	460 END	50.0	0.839
06	470 BEG	49.4	0.831
07	120 BEG	48.5	0.815
08	110 END	48.0	0.807
09	485 BEG	45.3	0.762
10	125 BEG	44.0	0.739



Rys. 2. Widok pęknięcia na trójniku.
Fig. 2. View of the crack in the tee.

Do określenia stanu materiału, oprócz badań NDT, wykonywane są badania niszczące. Badania niszczące wykonywane są na próbkach pobranych z konstrukcji, oczywiście gdy istnieje możliwość ich pobrania. Badania niszczące mają na celu określenie właściwości mechanicznych i rodzaju struktury materiału. Najczęściej stosowane badania niszczące to:

1. badania składu chemicznego metoda spektralną;
2. badania metalograficzne na zgładach wraz z oceną stopnia wyczerpania struktury. (Kryteria odniesienia zgodne z Wytycznymi UDT nr 1/2015) [6];
3. badania własności mechanicznych podczas statycznej prób rozciągania prowadzonej wg PN-EN ISO 6892-1:2010 [4];
4. próba udarności (energii łamania) sposobem Charpy'ego wg PN-EN ISO 148-1:2010 [4];
5. badanie twardości metodą Vickersa HV 10 wg PN-EN ISO 6507-1:2007 [4];
6. pomiary średnic i grubości ścianek odcinków rurowych (pomiar suwmiarkami, mikrometrem);
7. skrócone obliczenia wytrzymałościowe z oceną trwałości resztkowej.

W omawianym przypadku przeprowadzono badania i analizę odcinka kolana (prostki) φ 508 x 20 ze stali 10H2M pobranego z rurociągu pary wtórnie przegrzanej o sumarycznym czasie pracy około T = 280 000 godzin.

Głównym celem prac kontrolno – badawczych było określenie stopnia wyczerpania struktury na podstawie oceny własności mechanicznych kolana, spowodowanych warunkami pracy (Temperatura robocza t_r = 540°C, ciśnienie robocze p_r = 2,9 MPa).

Wymagania dla elementów rurociągowych wykonanych ze stali 10H2M podane są w nieobowiązujących już normach PN-75/H-84024 [5] oraz PN-74/H-74252.[5].

Długotrwała eksploatacja elementów rurociągowych pracujących w warunkach pełzania powoduje degradację materiału poprzez zmiany strukturalne, które w konsekwencji prowadzą do obniżenia odporności na pełzanie oraz do przesunięcia temperatury przejścia w stan kruchy w kierunku wyższej temperatury. Nie powoduje to jednak jednoznacznej konieczności dokonania wymiany takich elementów na nowe. W większości przypadków elementy te mogą pracować znacznie poza obliczeniowy czas pracy co związane jest z istnieniem trwałości resztkowej.

Stal 10H2M w stanie wyjściowym tzn. przed eksploatacją charakteryzuje się strukturą ferrytyczno – bainityczną. Długotrwała eksploatacja elementów rurociągowych w temperaturze powyżej temperatury granicznej t_g tzn. w warunkach pełzania wysokotemperaturowego powoduje zmiany w strukturze, co prowadzi do pogorszenia ich właściwości użytkowych.

W stali 10H2M po długotrwałej eksploatacji obserwuje się powstawanie nowych węglików wewnątrz jak i na granicach ziaren oraz rozrost już istniejących. Procesy postępowania powyższych procesów w znacznym stopniu zależą od naprężeń zredukowanych i temperatury pracy.

Przy założeniu stosunkowo stabilnego poziomu temperatury pracy, wzrost naprężeń zredukowanych powyżej założonych konstrukcyjnie, może przyczynić się do znacznego wzrostu ilości wydzieleń, rozpadu obszarów perlit/bainit, co w konsekwencji prowadzi do nadmiernej utraty trwałości.

W początkowym okresie eksploatacji w stali 10H2M obserwuje się stabilność struktury, a pierwsze zauważalne zmiany dotyczą rozrostu i ilości wydzieleń węglików na granicach i wewnątrz ziaren oraz ich sferoidyzacji.

Długotrwała eksploatacja w warunkach pełzania w ostatnimi okresie powoduje trwałe, nieodwracalne procesy niszczenia. Proces niszczenia rozpoczyna się od zarodkowania pojedynczych pustek, które są równomiernie rozmieszczone w ferrytyczno-bainitycznej strukturze stali 10H2M. Wraz z rozwojem procesu niszczenia na granicach ziaren ferrytu następuje koncentracja pustek, w konsekwencji tworzenie łańcuszków pustek na granicach ziaren ferrytu. Następnie tworzą się międzykrystaliczne pęknięcia obejmujące początkowo jedno ziarno, a następnie obejmują kilka ziaren, co stanowi początek katastroficznego pękania całego materiału w miejscu największych naprężeń.

4. Wyniki badań

Badania nieniszczące prowadzone były metodami: ultradźwiękową i magnetyczno-proszkową.

Badania ultradźwiękowe w całej objętości dostarczonych odcinków kolan nie wykryły wzdłużnych ani poprzecznych nieciągłości. Podobnie badania magnetyczno-proszkowe na powierzchni zewnętrznej, a także powierzchni wewnętrznej nie ujawniły nieciągłości powierzchniowych i podpowierzchniowych.

Wyniki badań niszczących zostały zestawione w kolejnych Tablicach (Tablica 2 i Tablica 3) [3].

Tab. 2. Wyniki badań składu chemicznego.
Tab. 2. Chemical composition test results.

Norma/ Badane kolano	Skład chemiczny %								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	Ni
PN-75/H-84024 10H2M	0,08 0,15	0,40 0,60	0,15 0,50	max 0,030	max 0,030	2,0 2,5	0,90 1,10	-	max 0,30
Badany odcinek rury	0,10	0,50	0,31	0,020	0,027	2,1	0,90	-	0,12

Badania mikrostruktury materiału przeprowadzono na zgładzie metalograficznym. Dodatkowo zmierzono twardość wycinka.

Wyniki badań mikrostruktury.

Zaobserwowany obraz struktury materiału badanego odcinka rurociągu pary wtórnej ze stali 10H2M po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania wskazuje na znaczny stopień degradacji struktury, „odpowiedni" do parametrów roboczych i czasu pracy. Obserwowany zgład posiada strukturę bez widocznych trwałych uszkodzeń pełzaniowych (Rys. 3).

Opis struktury i ocena stopnia jej degradacji przy zastosowaniu kryteriów podanych w Wytycznych UDT nr 1/2015 „Zasady diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania" [6].

Stwierdzono struktura bainitu z ferrytem, utrzymujący się w części rozpad bainitu, koagulacja węglików w obszarach bainitycznych. Na granicach ziaren ferrytu wydzielenia tworzące miejscami łańcuszki. Wewnątrz ziaren ferrytu zróżnicowane co do wielkości i kształtu wydzielenia. Nie zaobserwowano zapoczątkowania procesów uszkodzeniowych. Nie stwierdzono nieciągłości i mikropęknięć strukturalnych. Szacunkowy stopień wyczerpania struktury t/t_r około 0,3/0,4.

Informacyjne obliczenia wytrzymałościowe prowadzone wg EN-PN 13480-3 [5].

Rzeczywiste wymiary odcinków dostarczonych do badań:
- średnica zewnętrzna $\varphi = 510$ mm, grubość ścianki min. $g = 17$ mm.

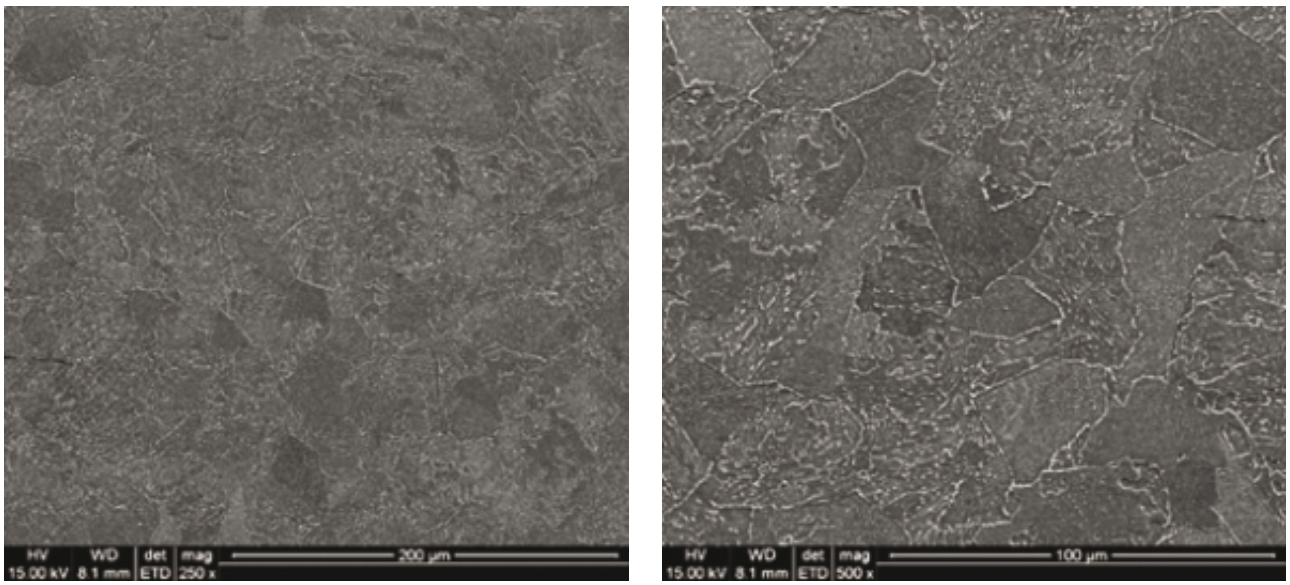
Obliczeniowe naprężenie występujące w ściance elementu rurociągowego wyliczone na podstawie przepisów Dozoru Technicznego WUDT-UC-WO-O/01:01.2005 [7] z wyżej podanych wymiarów i parametrów rzeczywistych - wynoszą maksymalnie około $\sigma_{rz} = 38$ MPa. Odcinek badanego elementu rurociągowego wykonany został ze stali 10H2M, a więc znane są wytrzymałości na pełzanie dla tej stali w temperaturze roboczej ($t = 540$ °C). Wg normy PN-75/H-84024 [5] dla czasów pracy $Rz_{min/100000/540} = 62{,}4$ MPa, i $Rz_{min/200000/540} = 54{,}4$ MPa

Przy założeniu dodatkowych obciążeń (dla bezpieczeństwa) pochodzących od niedoskonałej pracy zamocowań, nie zapewnienia pełnej zdolności do samokompensacji około 20% do obliczeń zakładamy $\sigma_{max} = 45$ MPa.

Porównanie naprężeń σ_{max} ze wspomnianymi wskaźnikami pełzaniowymi pozwoliły na orientacyjne obliczenie trwałości

Tab. 3. Wyniki badań własności mechanicznych.
Tab. 3. Test results for mechanical properties.

Oznaczenie	Kierunek poboru próbek	Własności mechaniczne stali 10H2M				
		$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	KCU_2 J/cm² KV [J]	HV 10
Rury bez szwu PN-74/ H-74252 N+O g = max 30 mm	Wzdłużny	min 265	440- 590	min 20	min 80 / 64 J	----
Badany odcinek rury	Wzdłużny	268	455	27	45 49 34 / śr. 42,6 J	140 - 146



Rys. 3. Przykładowe miejsca zgładu, obserwowane na mikroskopie SEM; a) drobne, równomiernie rozmieszczone wydzielenia; b) liczne wydzielenia na granicach ziaren, tworzące łańcuszki.
Fig. 3. Examples of the extermination sites observed on the SEM microscope; a) fine, evenly distributed secretions; b) numerous precipitates at the grain boundaries forming chains.

resztkowej τ_{Br}, a także resztkowej trwałości rozporządzalnej τ_r czyli czasu pracy kolana po przekroczeniu którego należy rozpocząć specjalny jego nadzór. W wyniku obliczeń otrzymano τ_{Br} = około 512 861 godzin i τ_r = 307 717 godzin.

Ponieważ dotychczasowy czas eksploatacji badanego elementu wynosi 280 000 godzin, to teoretycznie pozostało (307 717 – 280 000) = 26 718 godzin do momentu rozpoczęcia specjalnego nadzoru kolana, a także i innych elementów tego rurociągu.

Omówienie wyników badań:

a. Wyniki badań składu chemicznego oraz statycznej próby rozciągania w temperaturze otoczenia są zgodne wymaganiami przedmiotowych norm, nie mniej jednak granica plastyczności i wytrzymałość są na poziomie wymagań minimalnych.
b. Energia łamania w temperaturze otoczenia określana dla próbek Charpy'go V, jest niezgodna z wymaganiami normy PN-74/H-74252 [5] dla stanu przed eksploatacją. Wyniki są jednak wyższe od umownego progu kruchości dla warunków pracy.
c. Mikroskopowa obserwacja zgładu pobranego z dostarczonej prostki kolana i jej klasyfikacja wg wytycznych UDT nr 1/2015 [6] informuje o stopniu degradacji t/t_r w granicach 0,3/0,4. Taki wynik i rzeczywisty czas pracy znacznie przekraczający obliczeniowy, nakazuje następne badania kontrolne metodą replik matrycowych wykonać po czasie nie dłuższym niż 30 000 godzin.
d. Obliczony teoretycznie wskaźnik pozostałego czasu rozporządzalnej trwałości resztkowej wskazuje na konieczność po czasie mniejszym od ok. 30 000 godzin rozpocząć specjalny nadzór nad rurociągiem.

5. Podsumowanie

Rozwój nowoczesnych metod badawczych i narzędzi modelowania numerycznego pozwala monitorować postęp degradacji, a w konsekwencji umożliwia przewidywać okres żywotności elementu oraz instalacji ciśnieniowych. Wśród metod tych szczególnie użyteczne wydają się metody badań nieniszczących prowadzonych bezpośrednio na obiekcie. Dodatkowo stosuje się procedury oceny z wykorzystaniem maszyn wytrzymałościowych z próbkami wyciętymi z badanych elementów (badania niszczące). Obliczenia pozwalają zbudować ogólny model zużycia rozpatrywanych obiektów pracujących powyżej temperatury granicznej z uwzględnieniem czasowego zużycia od pełzania oraz zużycia termo-zmęczeniowego.

Prowadzenie badań ma na celu kompleksową ocenę materiału z zastosowaniem nowoczesnych technik badawczych, prowadzącą do wczesnego wykrycia ewentualnych zmian mikrostruktury i własności wytrzymałościowych materiału badanych elementów kryterialnych, a w konsekwencji do oceny stopnia zużycia oraz prognozowania żywotności instalacji energetycznych. Pogorszenie własności wytrzymałościowych materiału nie powoduje jednoznacznej konieczności dokonania wymiany eksploatowanych elementów na nowe. W większości przypadków elementy te mogą pracować znacznie poza obliczeniowy czas pracy co związane jest z istnieniem trwałości resztkowej.

Na bezpieczeństwo i niezawodność eksploatacji obiektów energetycznych najistotniejszy wpływ ma stan wytężenia węzłów kryterialnych, co nierozerwalnie łączy się z prawidłowo prowadzoną polityką diagnostyczną.

6. Literatura

[1] 1.D. Mężyk: Wpływ przebiegu eksploatacji urządzeń ciśnieniowych w energetyce zawodowej na ich bezpieczeństwo i niezawodność pracy, Zagadnienia projektowo-diagnostyczne. Seminarium rozwoju niszczenia materiałów i laserowego modelowania materiałów, Zakopane 2003.

[2] D. Mężyk: Eksploatacja i diagnostyka rurociągów energetycznych, IX Forum Energetyków 2004. ,

[3] Sprawozdanie z badań IEn 2/2020. Prowadzenie nadzoru technicznego nad głównymi rurociągami pary wraz z układem zamocowań oraz rurociągami łączącymi komory przegrzewaczy, zgodnie z wymaganiami UDT.

[4] Sprawozdanie z badań IEn 22/2021. Główne rurociągi pary - pełna diagnostyka i regulacja zawieszeń i podparć.

[5] Polskie normy: PN-75/H-84024, PN-74/H-74252, EN-PN 13480-3. ASME B31.1 – 1995.

[6] Wytyczne UDT nr 1/2015 „Zasady diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania".

[7] WUDT-UC-WO-O/01:01.2005. „Obliczenia wytrzymałościowe".

Marek Śliwowski*
NDTEST Warszawa

Zautomatyzowane badania systemami PA+TOFD - wdrażanie i zastosowania

PA+TOFD testing by automated UT systems - implementation and applications

STRESZCZENIE

Celem referatu jest prezentacja prac wdrożeniowych automatycznych systemów ultradźwiękowych PA+TOFD, dedykowanych do badania doczołowych złączy spawanych o zakresie grubości od 6 do 40 mm na obiektach ze stali węglowych - płaskich oraz na rurociągach w zakresie średnic DN od 500 do 1400 mm. Implementacja kombinowanych technik cyfrowych PA (Phased-Array – zastosowanie głowic wieloprzetwornikowych dających informację z całej objętości złącza) oraz TOFD (dyfrakcyjna technika czasu przejścia – komplementarne przeszukiwanie objętości spoiny) pozwala na cyfrowe zobrazowanie oraz cyfrowy zapis pełnych wyników badania w całej długości i objętości złącza spawanego i została znormalizowana, w zakresie badania wyrobów spawanych, oddzielnie w dokumencie PN-EN ISO 13588 dla techniki PA oraz w PN-EN ISO 10863 - dla techniki TOFD.Cyfrowe techniki badawcze pozwalają na łatwe automatyzowanie procesu, z wykorzystaniem skanera prowadzącego głowice, z możliwością ręcznego (badanie pół-automatyczne) lub zmechanizowanego (badanie automatyczne) prowadzenia wzdłuż badanego złącza. Przywołane normy umożliwiają charakteryzowanie i klasyfikację wskazań ech odbitych i/lub dyfrakcyjnych oraz obwiedni echa uzyskiwanych głowicami PA oraz TOFD dla uzgodnionego poziomu badania (A, B lub C). Skutkuje to w każdym przypadku koniecznością przygotowania pisemnej procedury badania, odpowiednich próbek odniesienia określonych tymi normami oraz przeprowadzenia badań kwalifikacyjnych, a także wykonania badań pilotowych/porównawczych na próbkach o znanych rozmiarach wad i lokalizacji. W referacie przedstawiono doświadczenia z procesu wdrażania systemu PA+TOFD oraz badań dla złączy spawanych z pełnym przetopem.

***Słowa kluczowe**: systemy phased-array, technika TOFD, badania zautomatyzowane i półautomatyczne, zmechanizowane badania złączy spawanych.*

ABSTRACT

The paper presents implementation works of automated ultrasonic systems using PA+TOFD technique and dedicated to ultrasonic inspection of butt flat as well as girth welds on pipelines in the range of diameter DN 500 1400 mm and thickness from 6 to 40 mm. Implementation of combined digital techniques PA (Phased-Array technique– applies multitransducer probes scanning full weld volume) and TOFD (Time Of Flight Diffraction technique – complementary scanning of weld volume applying diffracted signals) allows for digital display and recording of full digital inspection results along weld length and cross-section. Both techniques are standardised in weld sector in separate documents EN ISO 13588 for PA technique [2] and EN ISO 10863 - for TOFD technique. Digital testing techniques can easy subjected to automation process and using mechanical scanner guided manually – the semi-automated testing or by mechanised scanner – the full automated inspection be realised. The above-mentioned standards allow to characterisation and classification of reflected and diffracted echoes and its envelopes for PA and TOFD probes preserving agreed testing level (A, B or C). It results in each case of testing the necessity of written procedure/instruction preparation, the special reference blocks and qualification procedure under agreed testing level performance. To confirm the reliability of implemented testing PA+TOFD technique the validation tests on special specimens with known localisation and flaw sizes have been done.

***Keywords**: phased-array technique, TOFD technique, semi- and automated testing, mechanized weld testing.*

1. Wstęp

Celem referatu jest prezentacja prac przy wdrażaniu ultradźwiękowego systemu PA+TOFD do badania doczołowych złączy spawanych o zakresie grubości od 6 do 40 mm na obiektach płaskich oraz na rurociągach w zakresie średnic DN 500 - 1400 mm, wykonanych ze stali węglowych.

Technika TOFD (Time-Of-Flight Diffraction) polega na wykorzystaniu zjawiska dyfrakcji fal ultradźwiękowych do wykrywania i oceny wad materiałów. Od wielu lat znane są zastosowania tej techniki do wymiarowania wad, a w szczególności do wyznaczania głębokości pęknięć [1, 2]. W końcu lat 90-tych i na początku lat 2000, dzięki wprowadzeniu nowoczesnych mobilnych komputerów, technika TOFD uzyskała znacznie szersze możliwości zastosowań w badaniach nieniszczących. Obecnie jest powszechnie stosowana jako podstawowa metoda badań nieniszczących spoin w warunkach przemysłowych. Obszerne materiały dotyczące podstaw i nowoczesnych zastosowań TOFD można znaleźć w monografii [3].

Technika TOFD stanowi jedną z zaawansowanych cyfrowych technik badań ultradźwiękowych, zaliczana do technik wysokiego poziomu tzw. hi-tech. Dzieje się tak z powodu wysokiej wykrywalności nieciągłości płaskich, możliwości określania fizycznych rozmiarów wad , dużej szybkości badania, możliwości pełnej archiwizacji wyników badań oraz prostej graficznej ich prezentacji pozwalającej na ułatwioną analizę wskazań, a także wysoki współczynnik wydajności badania do kosztów.

Z drugiej strony pomimo wymienionych zalet TOFD, równie istotne są jej ograniczenia. Do najistotniejszych należy zaliczyć ograniczenia w wykrywalności nieciągłości

*Autor korespondencyjny.
E-mail: m.sliwowski@ndtest.com.pl

Published by „Badania Nieniszczące i Diagnostyka" Publishing Agenda of SIMP
DOI: 10.26357/BNID.2022.007

występujących blisko powierzchni elementu oraz niemożność oszacowania ich rozmiarów w tych obszarach. Jako drugie należy wymienić bardzo wysoką czułość wykrywania wskazań dyfrakcyjnych nawet o małych rozmiarach (od ułamków mm do 2 mm) przy jednoczesnym braku możliwości wiarygodnego określenia rzeczywistego rozmiaru i może stanowić istotny problem w aspekcie oceny uzyskanych wyników badań.

Szerokie stosowanie ultradźwiękowych technik phased-array PA (Phased-Array – zastosowanie głowic wielo-przetwornikowych dających informację z całej objętości badanego obiektu) jako standardowej technologii w zaawansowanych badaniach nastąpiło dopiero na początku lat 2000. Wiązało się to również z burzliwym rozwojem mobilnych technik komputerowych jak też z zaangażowaniem wielu światowych firm w wytwarzanie coraz bardziej zaawansowanej mobilnej aparatury phased-array oraz głowic PA, dedykowanych do specyficznych zastosowań w badaniu nieniszczącym wielu wyrobów w różnych sektorach przemysłowych. Solidne podstawy i przykłady nowoczesnych zastosowań technologii phased-array można znaleźć wnowym wydaniu monografii E. Ginzela [4] a także w obszernym opracowaniu autora tego artykułu [6], jedynym w języku polskim na naszym rynku badań nieniszczących.

Zaawansowana technologia phased-array jest drugą cyfrową techniką badań ultradźwiękowych, zaliczaną do technik wysokiego poziomu. Jako istotne zalety należy wymienić wysoką wykrywalność wad (zwiększanie SNR na skutek ogniskowania klasycznego lub zawansowanego TFM wiązki, zwiększanie prawdopodobieństwa wyrycia POD, dzięki dużemu zakresowi sterowania kątem wiązki), dużej szybkości badania (skanowanie elektroniczne), możliwości sterowania wiązką przy złożonych inspekcjach, pełną archiwizację surowych wyników badań oraz graficzną prezentację przy pomocy algorytmów zobrazowań dla interpretacji, analizy i wymiarowania wskazań.

Technologia phased-array , niezależnie od wymienionych powyżej wielu zalet, ma też specyficzne cechy, które mogą ograniczać szeroką skalę wdrażania technik PA. Należy tu wymienić w pierwszej kolejności wciąż wysokie koszty aparatury i głowic PA, co powoduje wysoki stosunek kosztów w porównaniu z konwencjonalnymi UT, szczególnie przy małych zakresach badania. Do obsługi systemów PA wymagani są bardzo dobrze wykwalifikowani operatorzy o zaawansowanej wiedzy ultradźwiękowej (certyfikaty PA). Analiza i wizualizacja danych jest czasochłonna (redundancja/powtarzanie wyników dla wad czyni ich interpretację i analizę czasochłonną). Duża liczba sygnałów związana z wieloma A-scanami wymaga przyzwyczajenia się i przyjęcia sposobu analizy i umiejętnego stosowania algorytmów wymiarowania.

Z powodu ograniczeń omawianych technik naturalnym był proces budowy optymalnych systemów badawczych, które kompensowałyby wzajemnie wymienione braki każdego z osobna. Takimi przedsięwzięciami było zastosowanie skanerów z głowicami TOFD uzupełnionych klasycznymi głowicami pracującym w modzie - PE (Pulse Echo), penetrującymi strefy przypowierzchniowe złączy spawanych - technika TOFD+PE [7]. Dalszym naturalnym krokiem w unowocześnieniu procesu skanowania było zastąpienie kilku głowic klasycznych – dwoma głowicami phased-array PA i pełna automatyzacja procesu badania już systemami PA+TOFD. Obszerne opisy przygotowania i wdrożenia do badań takich systemów przedstawiono w monografii [5] oraz 6 w polskim opracowaniu. W świetle wymienionych należy brać pod uwagę fakt, że budowa omawianych automatyzowanych systemów badawczych ma sens ekonomiczny w przypadku dużych projektów badawczych jakimi są np. rurociągi przesyłowe.

Implementacja kombinowanych technik cyfrowych PA oraz TOFD pozwala na cyfrowe zobrazowanie oraz cyfrowy zapis pełnych wyników badania w całej długości i przekroju złącza spawanego z komplementarnymi informacjami z każdego przeszukiwania. Podstawowym rezultatem zastosowanej kombinacji jest zwiększona wiarygodność badania.

Techniki badania zostały znormalizowane, w zakresie badania wyrobów spawanych, oddzielnie w dokumencie PN EN ISO 13588:2019-04:2011 – dla techniki PA [8] oraz w PN-EN ISO 10863: 2011 - dla techniki TOFD [9]. Zatem zadaniem wdrażającego jest uzgodnienie zapisów obydwu dokumentów.

Cyfrowe techniki badawcze pozwalają na łatwe automatyzowanie procesu, dlatego badanie odbywa się przy użyciu skanera prowadzącego głowice i odmierzającego ich położenie, z możliwością ręcznego (badanie pół-automatyczne) lub zmechanizowanego (badanie automatyczne) prowadzenia wzdłuż badanego złącza. Badaniom PA+TOFD będą podlegać złącza spawane z pełnym przetopem w rurociągach, zbiornikach o różnym kształcie oraz w płaskich konstrukcjach stalowych (metalowych) w procesach ich wytwarzania lub eksploatacji.

Norma PN-EN ISO 13588 umożliwia charakteryzowanie i klasyfikację wskazań ech odbitych lub dyfrakcyjnych oraz obwiedni echa uzyskiwanych głowicami PA dla podstawowych poziomów badania A, B i C. Podobnie norma PN-EN ISO 10863, za pomocą uzgodnionych wzajemnie poziomów badania A, B i C, pozwala prowadzić charakteryzowanie i klasyfikację wskazań w oparciu o techniki echa i dyfrakcyjne dla głowic TOFD. Skutkuje to w każdym przypadku koniecznością przygotowania pisemnej procedury badania, odpowiednich próbek odniesienia określonych tymi normami oraz przeprowadzenia badań kwalifikacyjnych, a także wykonania badań pilotowych/porównawczych na próbkach o znanych lokalizacji i rozmiarach wad.

Kryteria akceptacji, umożliwiające ocenę zgodności z wymaganiami należy formułować w oparciu o uzgodnienia z zamawiającym badanie, przy czym priorytet mają wymagania projektowe i odbiorcze lub istniejące dokumenty normatywne, tu np. PN-EN ISO 19285:2017-11 [10] oraz PN-EN ISO 15626:2014-01 [11].

2. Istotna terminologia

Dla jednoznacznego operowania techniką PA+TOFD podane są niektóre terminy i definicje:

- TOFD - (ang. Time of Flight Diffraction) ultradźwiękowa technika polegająca na rejestracji i cyfrowej wizualizacji impulsów ultradźwiękowych ugiętych dyfrakcyjnie na krawędziach wad, w której podstawą do wyznaczania położenia i rozmiarów wad jest dokładny pomiar czasu przejścia impulsów ultradźwiękowych;
- PA - (ang. Phased Array) ultradźwiękowa technika polegająca na rejestracji i wizualizacji impulsów ultradźwiękowych odbitych od wady (również dyfrakcyjnych), w której podstawą do wyznaczania położenia jest pomiar czasu przejścia a dla rozmiarów wad – amplituda impulsów ultradźwiękowych;
- (PA+TOFD) setup – ustawienie głowic o odpowiednio dobranych parametrach (częstotliwość, wielkość przetwornika, rodzaj fali, separacja PCS) do grubości badanego złącza i odpowiedniego planu skanowania (tzw. „scan plan");
- Zobrazowanie typu A - standardowe zobrazowanie impulsów ultradźwiękowych na ekranie defektoskopu, w którym oś pozioma odpowiada czasowi przejścia (odległości) zaś oś pionowa amplitudzie rejestrowanych impulsów ultradźwiękowych
- Zobrazowanie typu B - zobrazowanie uzyskiwane dla obróbki cyfrowej wyników, w którym uzyskuje się przekrój badanego materiału w kierunku grubości. Oś pionowa przedstawia drogę lub czas przejścia fali ultradźwiękowej w płaszczyźnie wiązki ultradźwiękowej, oś pozioma może przedstawiać drogę skanowania mechanicznego lub elektronicznego w zależności od kierunku przemieszczania skanera;
- Zobrazowanie typu D - zobrazowanie uzyskiwane w wyniku obróbki cyfrowej jako szczególny przypadek B-scanu, w którym uzyskuje się pionowy przekrój badanego materiału wzdłuż osi skanowania mechanicznego, oś pozioma przedstawia położenie skanera natomiast oś pionowa –czas przejścia fali ultradźwiękowej lub głębokość w płaszczyźnie wiązki ultradźwiękowej. Jest to powszechnie używane zobrazowanie typu B-TOFD.
- Zobrazowanie typu S - zobrazowanie uzyskiwane w wyniku obróbki cyfrowej również jako szczególny przypadek B-scanu, w którym uzyskuje się pionowy przekrój badanego materiału w płaszczyźnie rozchodzenia się wiązki ultradźwiękowej. Oś pozioma odpowiada rzutowi poziomemu (szerokości obiektu badanego) z punktu wprowadzenia wiązki fali, natomiast oś pionowa odpowiada głębokości;
- Zobrazowanie typu C - zobrazowanie uzyskiwane w wyniku obróbki cyfrowej skanowania ultradźwiękowego typu B, prezentowane jako widok z góry lub rzut poziomy badanego elementu. Dla systemów ultradźwiękowych obydwa kierunki są kontrolowane, przy skanowaniu głowicą PA liniową jedna oś jest sterowana mechanicznie , druga – elektronicznie. Położenie wyświetlanych danych jest związane z pozycją enkodera podczas akwizycji. Dla każdego piksela zobrazowania C-scan jest wyświetlana tylko maksymalna amplituda dla danej pozycji skanowania;
- Skanowanie nierównoległe (podłużne) – skanowanie, w którym układ skanera (głowice patrzą w kierunku prostopadłym do osi spoiny) przemieszczany jest w kierunku równoległym do osi spoiny;
- Skanowanie równoległe (poprzeczne) - skanowanie, w którym układ skanera (głowice patrzą w kierunku prostopadłym do osi spoiny) przemieszczany jest w kierunku prostopadłym do osi spoiny;
- Skanowanie offsetowe (ang. offset scan) – skanowanie wzdłuż osi spoiny, w którym skaner lub wady położone są niesymetrycznie względem osi złącza.

3. Wyposażenie do badań

3.1 Aparatura i przyrządy pomocnicze

Do badania złączy spawanych techniką PA+TOFD mogą być zastosowane systemy ultradźwiękowe oparte na technice cyfrowej i umożliwiające sterowanie procesem skanowania oraz zapisem wyników badania w czasie rzeczywistym. Systemy te powinny być wielokanałowe i mieć możliwość współpracy z komputerem w celu analizy i obróbki cyfrowej wyników badania w czasie rzeczywistym lub zbliżonym.

W obecnej chwili, ze względu na profesjonalne i pewne oprogramowanie i serwis, najczęściej stosowane są mobilne systemy ultradźwiękowe firmy Olympus: FocusPX, OmniscanMX2 oraz OmniscanX3.

3.2 Głowice ultradźwiękowe

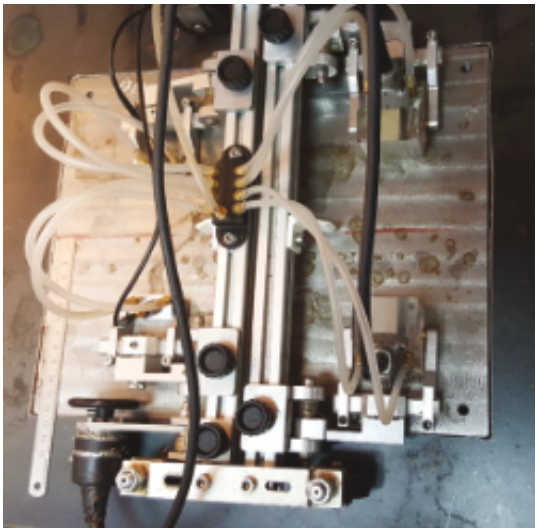
Do badania złączy spawanych techniką PA należy stosować głowice o parametrach nominalnych zgodnych z PN-EN ISO 18563-2:2017-11. Do badania złączy spawanych techniką TOFD należy stosować głowice o parametrach nominalnych zgodnych z PN-EN 12668-2: 2010.

Głowice stosowane do badań powinny posiadać atest producenta potwierdzający ich rzeczywiste parametry i wynik kontroli technicznej. Ponadto, przed każdym badaniem, głowice podlegają kontroli bieżącej polegającej na sprawdzeniu kąta głowicy, środka głowicy oraz zapasu wzmocnienia, zgodnie z zaleceniami norm:
PN - EN 12668 - 3:2014-02/PN-EN ISO 18563-3:2016-02.

3.4 Skaner

Przy badaniu złączy techniką PA+TOFD głowice ultradźwiękowe są zabudowane w skanerze i prowadzone tak aby były równolegle do spoiny w ustalonej odległości od siebie oraz środka spoiny. System ultradźwiękowy jest przygotowany do prowadzenia badania zmechanizowanego skanera poruszanego silnikiem na taśmie stalowej zamontowanej wokół spoiny obwodowej na rurze. Takie rozwiązanie umożliwia powtarzalne i stabilne prowadzenie skanowania i zapewnia wysoką jakość i wydajność badania (rys. 1).W warunkach budowy dopuszcza się prowadzenie skanera konfigurującego głowice – w sposób ręczny.

Rys. 1. Nowe rozwiązanie zmechanizowanego systemu PA+TOFD w wersji skanera zintegrowanego z aparatem Focus PX.
Fig. 1. New solution of mechanized PA+TOFD system - scanner integrated with Focus PX.



Rys. 2. Wygląd skanera PA+TOFD w wersji ręcznej.
Fig. 2. View of PA+TOFD scanner in manual option.

Skaner w wersji manualnej może być zrealizowany tak jak poprzednio na taśmie przy prowadzeniu ręcznym skanera na rurze lub poprzez zamontowanie do ramy kółek prowadzących dających sprzężenie magnetyczne do rury lub obiektu płaskiego (rys. 2).

Skaner ręczny nie zapewnia stabilnego przemieszczania, wymaga zwiększonej kontroli jego prowadzenia względem osi złącza i może być wykorzystany w sytuacjach, gdy stosowanie systemu zmechanizowanego jest niemożliwe lub niecelowe (np. spoiny płaskie, poprawki, pojedyncze spoiny o różnych średnicach, skany równoległe – w poprzek spoiny, itp.).

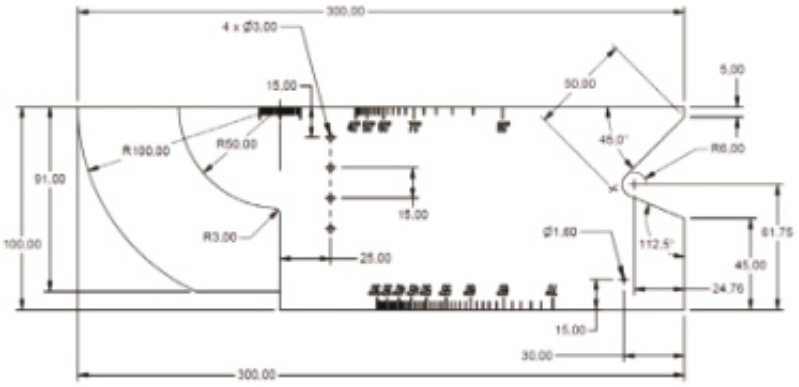
3.5 Układ akustycznego sprzężenia dla badań zmechanizowanych

W celu zapewnienia stabilnego sprzężenia akustycznego między głowicami ultradźwiękowymi, a powierzchnią badanego elementu stosowany jest film wodny. Woda doprowadzana jest pod głowice w sposób ciągły przez układ zasilający, w skład którego wchodzi zbiornik na wodę, pompa oraz elastyczne przewody połączeniowe.

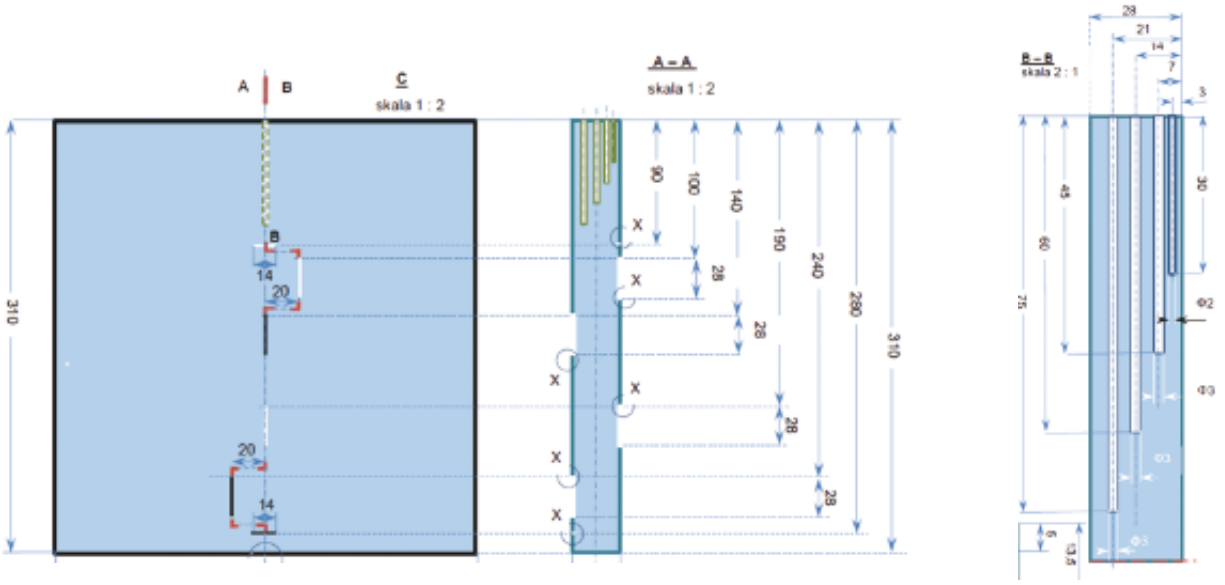
3.6 Wzorce kalibracyjne i próbki odniesienia

W badaniu PA do realizacji nastaw wykorzystuje się wzorzec kalibracyjny PA wg ISO 19675:2017 (rys. 3). Zawiera on reflektory R50 oraz R100 do nastawy zakresu obserwacji (dla potrzeb tej procedury wystarczający będzie zasięg – 250 mm dla fali poprzecznej w stali) oraz korekcji opóźnień klinie dla stosowanych zakresów kątowych wiązki ultradźwiękowej. Dla przeprowadzenia nastaw czułości badania dla głowic PA wykorzystane mogą być 4 reflektory D_{SDH} = 3 mm, rozmieszczone odpowiednio na głębokości (tzw. skalowanie „true depth") h_{j1} = 15 mm; h_{j2} = 30 mm; h_{j3} = 45 mm; h_{j4} = 60 mm. Dla wygody nastawa czułości PA wykorzystywać będzie algorytm korekcji nastaw wzmocnienia TCG dla stosowanych zakresów kątowych i zasięgowych wiązki ultradźwiękowej.

Do weryfikacji parametrów rozstawienia głowic (PA+TOFD setup) oraz nastaw czułości systemu, wykorzystywana będzie płaska próbka odniesienia RB_{flat} (PA+TOFD), zaprojektowana zgodnie z zaleceniami norm wyrobu PN-EN ISO 13588/ PN-EN ISO 10863 dla wybranego poziomu badania oraz badanego zakresu grubości.

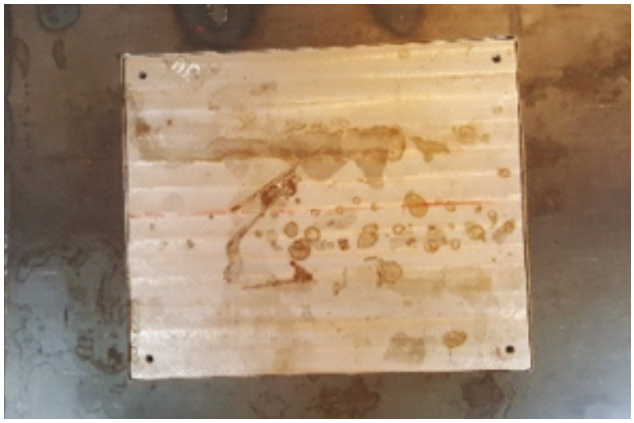


Rys. 3. Wzorzec kalibracyjny PA wg ISO 19675:2017.
Fig. 3. PA calibration block according to ISO 19675:2017.



Rys. 4. Próbka odniesienia dla poziomu C, do weryfikacji nastaw systemu ultradźwiękowego PA+TOFD
Fig. 4. Reference block for testing level C recommended for UT settings verification of PA+TOFD system.

Rys. 5. Próbka referencyjna #15do weryfikacji nastaw systemu ultradźwiękowego PA+TOFD.
Fig. 5. Reference block #15 for UT settings verification of PA+TOFD system.



Rys. 6. Próbka referencyjna #28 do weryfikacji nastaw systemu ultradźwiękowego PA+TOFD
Fig. 6. Reference block #28 for UT settings verification of PA+TOFD system

Próbki te, zgodnie z zapisami norm PN-EN ISO 13588/ PN-EN ISO 10863 mogą być wykorzystywane do weryfikacji połączeń płaskich jak też rurowych, od średnicy DN 300. Ponadto zostały one wykorzystane jako podstawowe próbki referencyjne w procesie kwalifikacji procedury PA+TOFD.

4. Wykonanie badania

4.1 Poziom techniki badania

Wymagania jakościowe stawiane złączom spawanym związane są przede wszystkim z materiałem, procesem spawania i warunkami eksploatacji. Poziom badania ultradźwiękowego spoin może być przedmiotem uzgodnienia z zamawiającym badanie, na ogół wynika jednak z narzuconego w zamówieniu poziomu jakości złącza. Wzorem normy wyrobu PN-EN ISO 17640 dla ręcznych badań ultradźwiękowych złączy spawanych, normy PN-EN ISO 13588/PN-EN ISO 10863 przewidują 4 poziomy badania (A, B, C i D) złączy spawanych dla technik PA oraz TOFD, odpowiednio. Jeżeli zastosuje się PN-EN ISO 17635, wówczas zalecane są klasy (poziomy) badania jak w tabeli 1.

Implementacja określonego poziomu badania wymaga zasadniczo większych przygotowań niż w przypadku klasycznych badań ręcznych. Generalnie przechodzenie od podstawowego poziomu badania A do coraz wyższego aż do D wymaga zapewnienia wzrastającej wiarygodności wyniku. Z tabeli widać ponadto, że w procedurach badania obiektu połączoną techniką PA+TOFD należy wyspecyfikować i uzgodnić wspólne elementy poziomu badania.

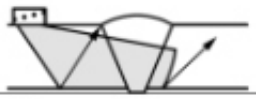
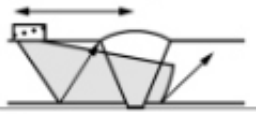
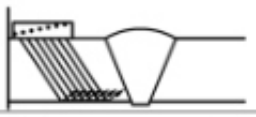
Wymagania dla wybranych modułów i poziomów badania PA wyspecyfikowano na podstawie normy PN-EN ISO 13588 i przedstawiono w tabeli 2 i należy je uwzględnić w pisemnej procedurze/instrukcji badania.

Minimalne wymagania przewidują zawsze przygotowanie pisemnej procedury/instrukcji badania z wykorzystaniem bloków referencyjnych dla wszystkich poziomów.

Tab. 1. Zalecane poziomy badania.

Poziom jakości złączy spawanych wg **PN-EN ISO 5817**	Poziom badania PA wg **PN-EN ISO 13588**	Poziom badania TOFD wg **PN-EN ISO 10863**
D	**A** – co najmniej	**A** – co najmniej
C	**A** – co najmniej	**B** – co najmniej
B	**B**	**C**
uzgodnienia – wyższy niż **B**	**C**	**C** – co najmniej
zastosowania specjalne	**D**	**D**

Tab. 2. Szczegóły wyboru poziomów badania dla techniki PA

MODUŁ BADANIA	POZIOMY BADANIA			SZKIC UKLADU BADANIA
	A	B	C	
	Wzorzec referencyjny (zał. A)			
	wzorzec **A**	wzorzec **B**	wzorzec **C**	
Zestaw badania (setup)				
S-scan w ustalonej pozycji do spoiny (skan liniowy) [a)]	Z jednej strony	Z dwóch stron lub dwie pozycje głowicy z jednej strony	Z dwóch stron lub dwie pozycje głowicy z jednej strony	
S-scan raster – zmiana pozycji głowicy względem spoiny (skan liniowy złożony – compound scan) [a)]	Nie zalecane dla tych poziomów		Z jednej strony	
E-scan w ustalonej pozycji do spoiny (skan liniowy) [a)]	Z jednej strony	Z dwóch stron i dla dwóch kątów wiązki głowicy (co najmniej 10° różnicy)	Z dwóch stron lub dwie pozycje głowicy z jednej strony	
TOFD generowany przez głowicę PA[a]	Nie zalecane dla tych poziomów		Pojedynczy moduł zestawu TOFD	
a) Dla poziomu badania C należy zastosować co najmniej dwa różne zestawy modułów, przy czym jeden z nich powinien być typu S-scan lub TOFD				

Tab. 3. Szczegóły wyboru poziomów badania dla techniki PA

Poziom badania	Zestaw TOFD-skaner	Próbka odniesienia - weryfikacja ustawień zestawu TOFD-skaner	Próbka odniesienia – weryfikacja. Nastawy czułości badania	Skany niesymetryczne (offset-scan)	Pisemna instrukcja badania
A	wg tab. 3	nie wymagana	nie wymagana	nie	PN-EN ISO 10863
B	wg tab. 3	nie wymagana	wymagana	nie	PN-EN ISO 10863
C	wg tab. 3	wymagana	wymagana	*1)*	wymagana
D	pisemna instrukcja	wymagana	wymagana	*1)*	wymagana
1) konieczność, liczbę i położenie skanów należy określić w pisemnej instrukcji badania					

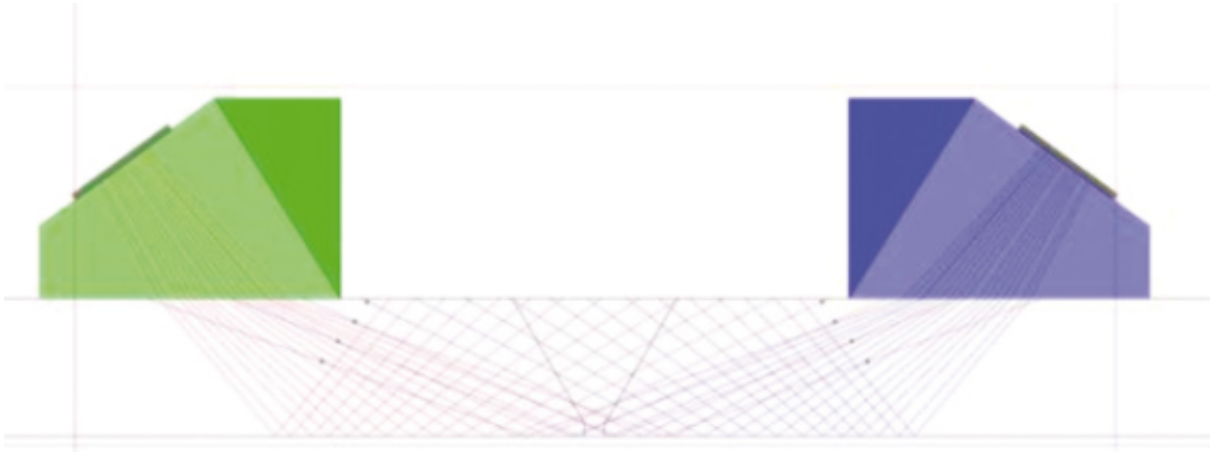
W przypadku badania z jednej strony należy badać i zapisywać wyniki z połowy i z pełnego skoku, podczas gdy przy badaniu z obydwu stron wystarczy ograniczyć je do połowy skoku.

Wymagania dla poziomów badania TOFD wyspecyfikowano wg normy PN-EN ISO 10863 i przedstawiono w tabeli 3.

Wymaga to doboru parametrów badania TOFD zgodnie z zaleceniami tej tabeli. Ustawienie parametrów zestawu badawczego odbywa się bezpośrednio na obiekcie badanym lub na próbkach odniesienia, natomiast ustawienie czułości badania odbywa się bezpośrednio na obiekcie badanym, ale dla poziomu wyższego niż B jest weryfikowane na specjalnej próbce odniesienia (rys. 4), dobranej do grubości badanego złącza, wykonanej zgodnie z zaleceniami PN-EN ISO 10863, zał. A.

Poziom badania A dopuszczany jest tylko dla obiektów do grubości 50 mm. Przy badaniach odbiorczych mają zastosowanie wszystkie poziomy badania, podczas gdy w badaniach eksploatacyjnych zalecany jest poziom badania D, ze szczególnym uwzględnieniem optymalizacji parametrów systemu na strefy przypowierzchniowe, znajdujące się w pobliżu jednej trzeciej grubości ścianki.

Ostateczne nastawa i weryfikacja parametrów systemu badawczego PA+TOFD odbywa się bezpośrednio na specjalnej próbce odniesienia uzgodnionej z normami PN-EN ISO 13588/PN-EN ISO 10863, zał. A, wykonanej z materiału badanego i przygotowanej każdorazowo dla wymiarów geometrycznych złącza. Jako zasadę wymaganą normą należy zapewnić stosunek SNR > 12dB na wszystkich zobrazowaniach A-scan reflektorów referencyjnych.



Rys. 7. Przykładowy „scan-plan" dla spoiny o grubości #22,2 mm dla głowic PA – 5L32-A31, realizujących S-scan typu compound dla fal poprzecznych w stali.
Fig. 7. Exemplary „scan-plan" for weld thickness #22,2 mm tested with probes PA – 5L32-A31, realizing S-scan -compound type for transversal waves in steel.

Zgodnie z wymaganiami przyjętego poziomu badania dla wybranych modułów techniki badania należy przedstawić plany skanowania (ang. „scan plan") dla zestawów głowic (PA oraz TOFD) wyspecyfikowanych dla przewidzianych geometrii badanych złączy. Skan plany powinny przedstawiać pokrycie obszarów badania wiązką dla danej grubości i geometrii złącza oraz zapewniać optymalne kąty wiązki na granicy wtopienia spoiny (rys. 7- „scan plan" dla głowicy PA).

4.2 Nastawy aparatury

Nastawianie aparatury powinno być prowadzone w porównywalnych warunkach do tych, z jakimi będzie się miało do czynienia w czasie pomiarów na obiekcie. Przed rozpoczęciem badania PA+TOFD należy określić i ustawić parametry badania odpowiednie dla danej spoiny, zgodnie z zasadami opisanymi w instrukcjach pracy. Są to w szczególności: typ oraz rozstaw głowic ultradźwiękowych – zakres badania (parametr PCS), początek i długość bramki próbkowania oraz wzmocnienie – czułość badania.

4.2.1 Nastawianie zakresu obserwacji

Dobór zakresu obserwacji limitowany jest warunkami zadania badawczego i przygotowanego wcześniej „scan planu". Nastawianie zakresu badawczego polega na ustaleniu pozycji głowic w zestawie skanera (PCS) oraz zasięgu wiązki. Nastawy zakresu obserwacji należy skontrolować i ewentualnie skorygować (prędkość fali ultradźwiękowej) bezpośrednio na obiekcie badanym (próbce referencyjnej), w miejscu o znanym wymiarze.

4.2.2 Nastawianie poziomów badania

Dla przyjętych klas badania normy ustalają wszystkie poziomy badania względem poziomu referencyjnego.

Poziom referencyjny RL (Reference Level)

Dla głowic kątowych fal poprzecznych pracujących w modzie pomiarowym PA, czułość badania powinna ustalona względem poziomu referencyjnego („reference level"), przewidzianego w normie PN-EN ISO 19285 dla wybranego reflektora referencyjnego (tu przyjęto D_{SDH} = 3 mm) oraz badanej grubości złącza. Dla zachowania jednolitej oceny zastosowane są algorytmy korekcji wzmocnienia TCG w pełnym zakresie kątowym i zasięgowym wiązek wyspecyfikowanych w „scan planach".

$$\text{RL_PA: } V_j = \text{TCG}(D_{SDH,r}=3) = 80\%\ \text{FSH}$$

Jak wiadomo w przypadku techniki TOFD klasyfikacja wskazań oparta jest nie na amplitudzie sygnałów lecz na ich wzajemnych relacjach czasowych. Tym niemniej dla pewnej detekcji wskazań od wad ich amplituda powinna spełniać ogólnie przyjęte relacje stosunku sygnału do szumu SNR > 6 dB. W przypadku głowic pracujących w modzie TOFD (echa odbite reflektorów i dyfrakcyjne) poziom referencyjny jak podano poniżej:

$$\text{RL TOFD: RL_TOFD} = \text{poziom szumów} + 6\ \text{dB} \quad 5 \div 10\ \%\ \text{FSH}$$

Należy oceniać wszystkie wskazania, które osiągają lub przekraczają podane niżej wysokości:

$$\text{EL_PA (80\% FSH) } V_e = V_j + 14\text{dB} = \text{TCG}(D_{SDH,r}=3) + 14\ \text{dB (16\% FSH);}$$
$$\text{EL_TOFD = RL_TOFD} \quad \text{poziom szumów} + 6\ \text{dB (5÷10 \% FSH)}$$

Poziom badania (przeszukiwania) SL (Scanning Level)

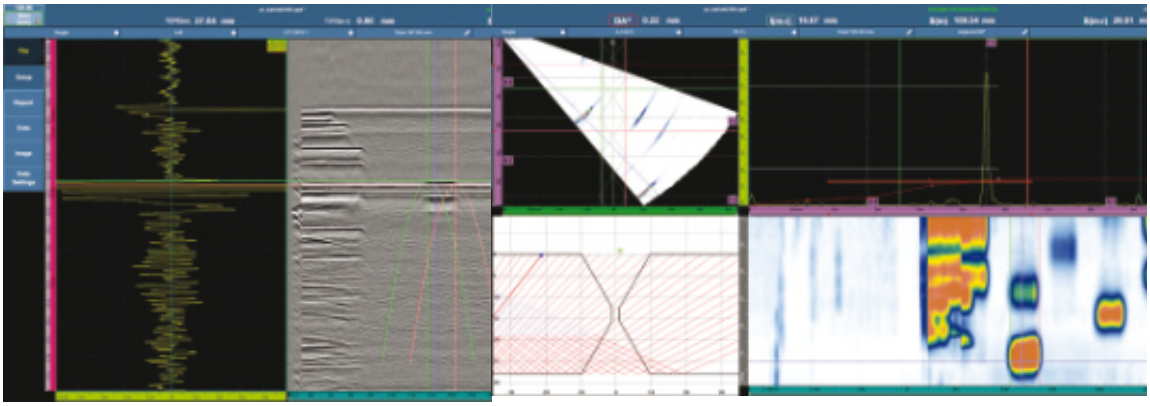
Ostatecznie czułość (wzmocnienie) badania V_r aparatu ultradźwiękowego należy ustawić na podstawie zależności:

$$\text{SL_PA (80\% FSH)} \quad V_r = V_j + \Delta V_t + \Delta V_s = \text{TCG}(D_{SDH,r}=3) + \Delta V_t + 10\ \text{dB}$$

gdzie:

- V_j jest wzmocnieniem referencyjnym;
- V_t jest poprawką na straty przeniesienia (pomiędzy badanym obiektem i próbkami referencyjnymi DAC/TCG_PA (D_{SDH} = 3 mm), które należy określić;
- V_s jest poprawką na rozdzielczość przeszukiwania (przyjmuje się V_s=0 ÷ 10 dB – ze względu na możliwość powrotu do obrazu wskazań przy wzmocnieniu referencyjnym);

Po ustawieniu wszystkich wymaganych parametrów (a w szczególności – czułości badania należy wykonać skan kontrolny PA+TOFD na specjalnej próbce referencyjnej o grubości i geometrii przewidzianego do badania złącza).



Rys. 8. Próbka referencyjna #28 do weryfikacji nastaw systemu ultradźwiękowego PA+TOFD.
Fig. 8. Reference block #28 for UT settings verification of PA+TOFD system.

Dla par głowic pracujących w module pomiarowym TOFD czułość badania powinna być ustalana indywidualnie dla każdej grubości ścianki, którą przeszukuje dana para głowic. Nastawianie czułości badania odbywa się bezpośrednio na obiekcie, a sprawdzanie na reflektorach odniesienia przewidzianych dla każdej strefy, których echa powinny wynosić co najmniej 40÷80 %FSH (pełnej wysokości ekranu) a osiągany poziom szumów nie powinien przekraczać 5% FSH. Wszystkie wskazania od reflektorów powinny być uwidocznione na uzyskanym zobrazowaniu typu B i C (amplitudy wskazań powinny być nie mniejsze niż 50% FSH).W przypadku gdy wskazania te nie występują lub są słabo widoczne (na zobrazowaniu typu A nie osiągają 50% FSH) należy sprawdzić i skorygować parametry lub technikę badania.

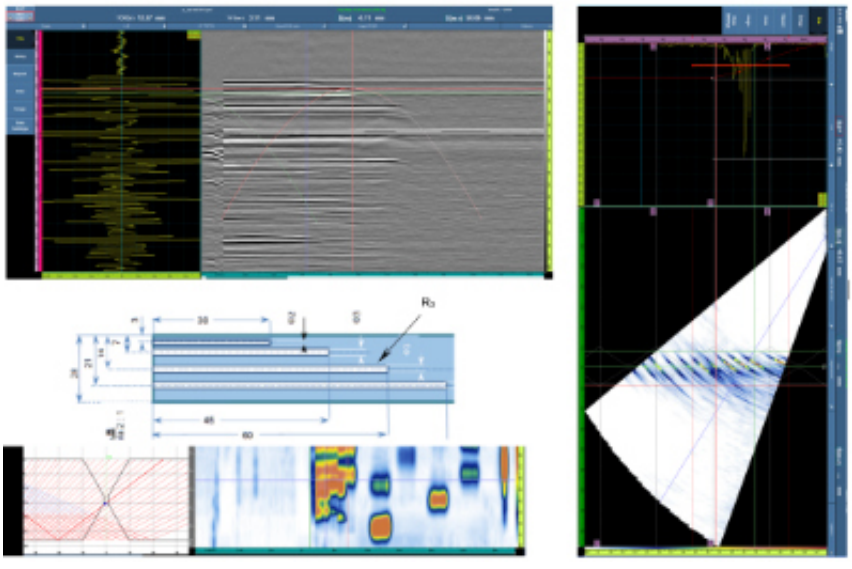
5. Kwalifikacja procedury PA+TOFD – przykład skanowania próbki referencyjnej #28 mm

Kwalifikacja procedury PA+TOFD wymagana jest dla poziomów badania B, C, oraz D. Testy powinny przeprowadzane na próbkach referencyjnych przygotowanych odpowiednio do wybranego poziomu badania. Właściwie wykonana procedura kwalifikacji powinna wykazać w sposób zadowalający:

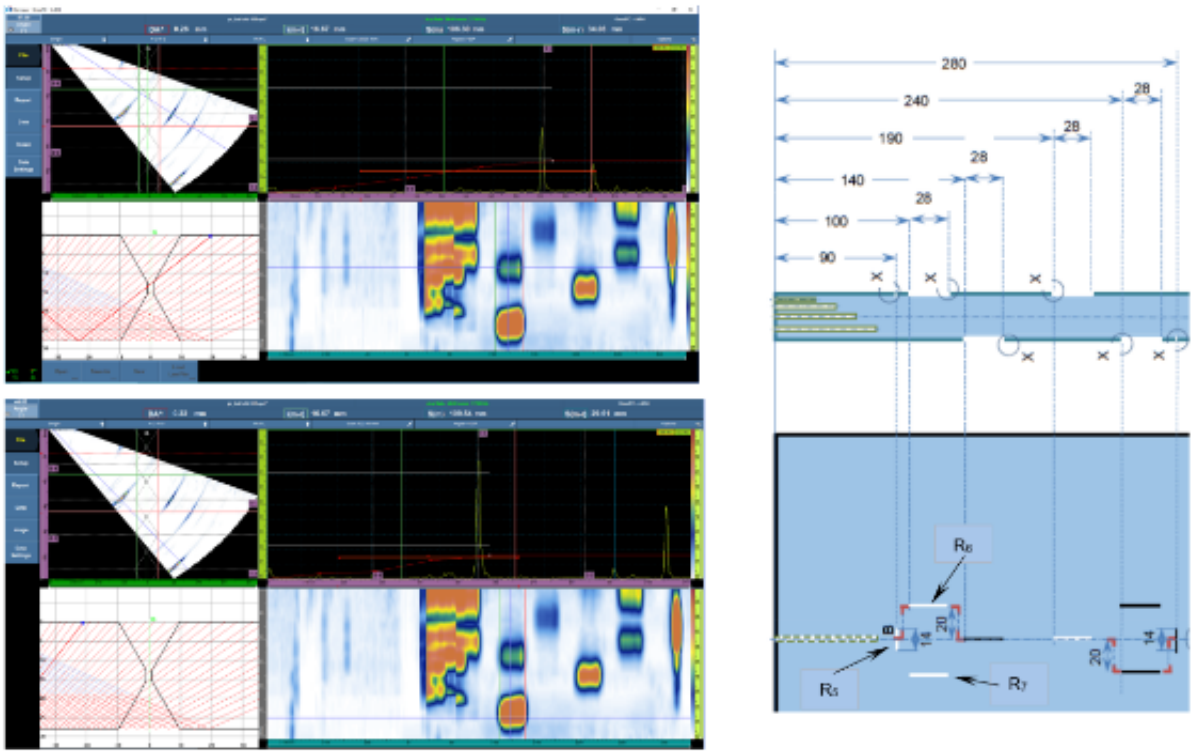
- wykrycie wszystkich wymaganych reflektorów;
- możliwość wymiarowania w zakresie wymaganym przez normy (specyfikacje);
- zapewnienie przeszukania objętości badania (zarówno w kierunku głębokości jak i szerokości obszaru);

Poniżej zaprezentowano przykładowo procedurę kwalifikacji dla poziomu badania C na płaskiej próbce referencyjnej o grubości 28 mm (rys. 4), która zgodnie z zaleceniami norm pokrywa zakres grubości badanych spoin od 22.4 do 42 mm i może być wykorzystywana do weryfikacji złączy płaskich jak też obwodowych rurowych od DN300 mm.

Na kolejnych rysunkach, (rys.9 - 15), zostały zaprezentowane zobrazowania cyfrowe, uzyskiwane techniką PA+TOFD, na których przedstawiono krytycznie wykrywalność i sposób wymiarowania poszczególnych reflektorów, implementowanych w próbce referencyjnej. Warto zwrócić uwagę na wzajemną komplementarność techniki TOFD i phase-array, która stanowi o podwyższonej wiarygodności połączonych technik.

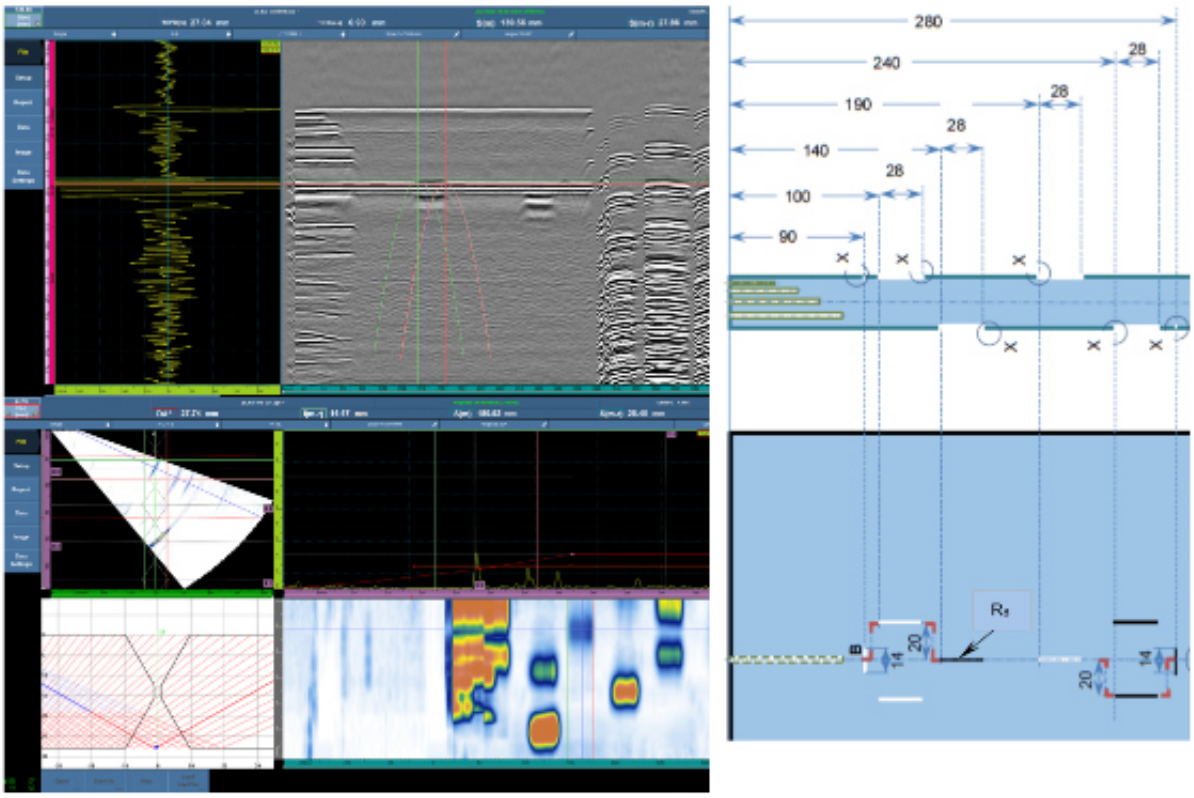


Rys. 9. Reflektor R_3(SDH=3) $x_3 = (0 + 60)$ mm; $y_3 = 0$; $z_3 = (t + \varphi)_3 = (12{,}5 + 3)$ mm. Skany TOFD+PA(DS) próbki RB#28.
Fig. 9. Reflector R_3(SDH=3) $x_3 = (0+60)$ mm; $y_3 = 0$; $z_3 = (t + \varphi)_3 = (12{,}5 + 3)$ mm. TOFD+PA(DS) scans of RB#28 reference block.



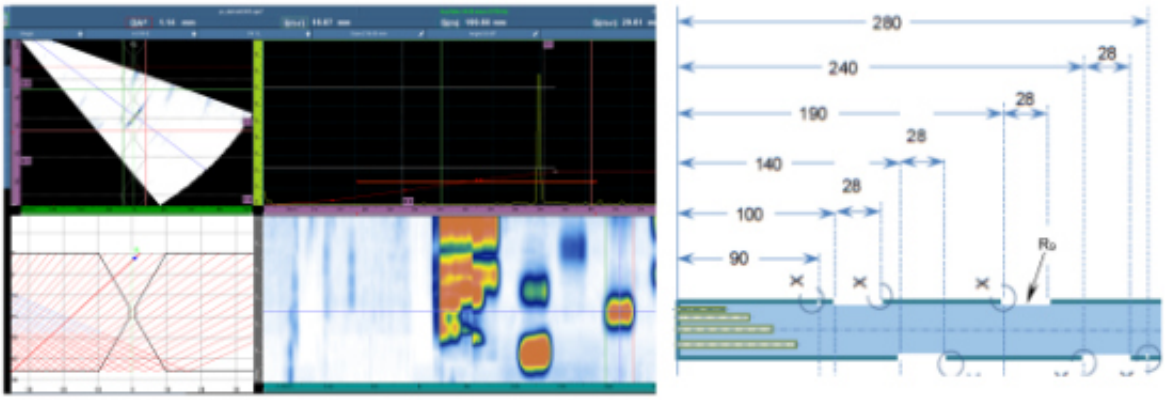
Rys. 10. Reflektory R_{6-} oraz R_7 - nacięcie w licu $x_{6,7}$ =(100 +28) mm; y_6 = 20) mm; $(h \times w)_{6,7}$ = (1 x 0,2) mm – skany PA(DS) dla próbki RB#28 od strony TOP. Skany TOFD „nie widzą" R_5; R_6 oraz R_7

Fig. 10. Reflectors R_{6-} and R_7 – notches in cap area $x_{6,7}$ =(100 +28) mm; y_6 = 20) mm; $(h \times w)_{6,7}$ = (1 x 0,2) mm PA(DS) – scans for RB#28 reference block from TOP side. On the TOFD scan the reflectors R_5; R_6 oraz R_7 are unvisible

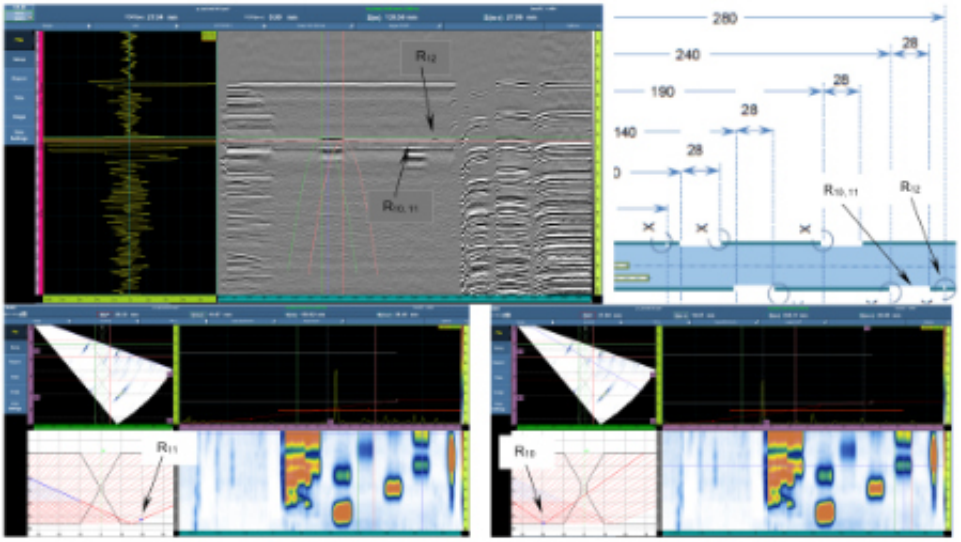


Rys. 11. Reflektor R_8 (n_{langs}=1x0,2) nacięcie w przetopie x_8 = (140 +28) mm; y_8 = 0 mm; $(h \times w)_8$ = (1 x 0,2) mm. Skany TOFD+PA(DS) próbki RB#28 od strony TOP.

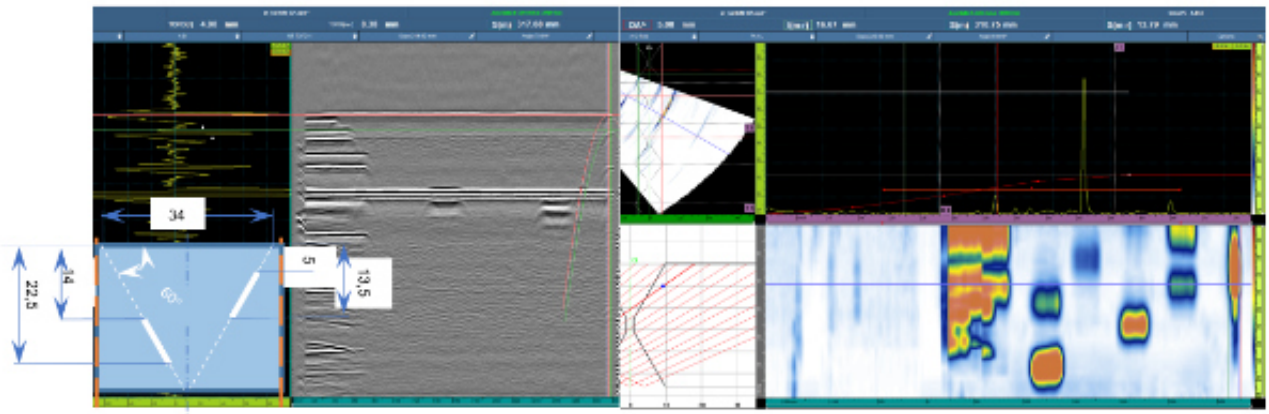
Fig. 11. Reflector R_8 (n_{langs}=1x0,2) – notch in root area x_8 = (140 +28) mm; y_8 = 0 mm; $(h \times w)_8$ = (1 x 0,2) mm. TOFD+PA(DS) scans of RB#28 reference block from TOP side.



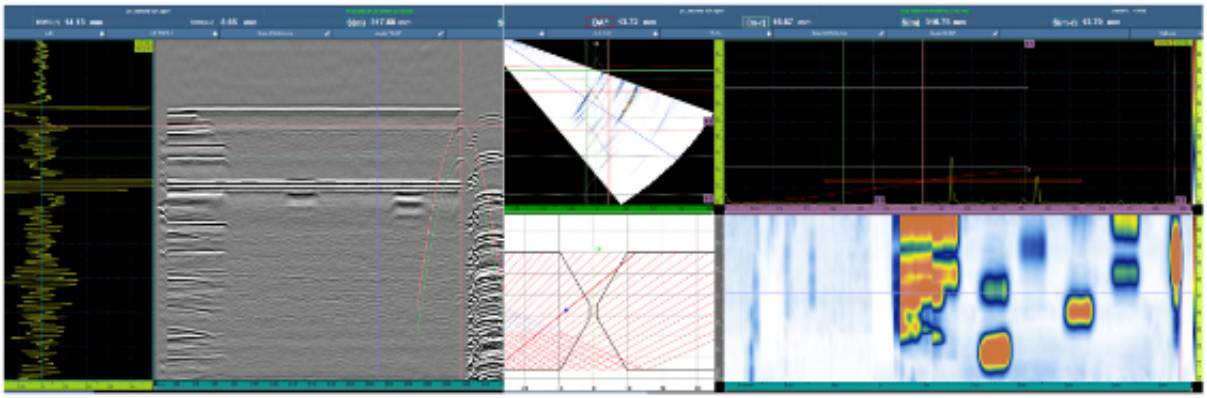
Rys. 12. Reflektor R_9 nacięcie w środku lica x_9 = (190 +28) mm; y_9 = 0 mm; $(h \times w)_9$ = (1 x 0,2) mm – wg skanu głowicą PA(DS) dla próbki RB#28 od strony TOP. Skany TOFD „nie widzą" R_9.
Fig. 12. Reflector R_9 – notch in the middle of cap x_9 = (190 +28) mm; y_9 = 0 mm; $(h \times w)_9$ = (1 x 0,2) mm PA(DS) – scan for RB#28 reference block from TOP side. On the TOFD scan the reflectors R_9; is unvisible.



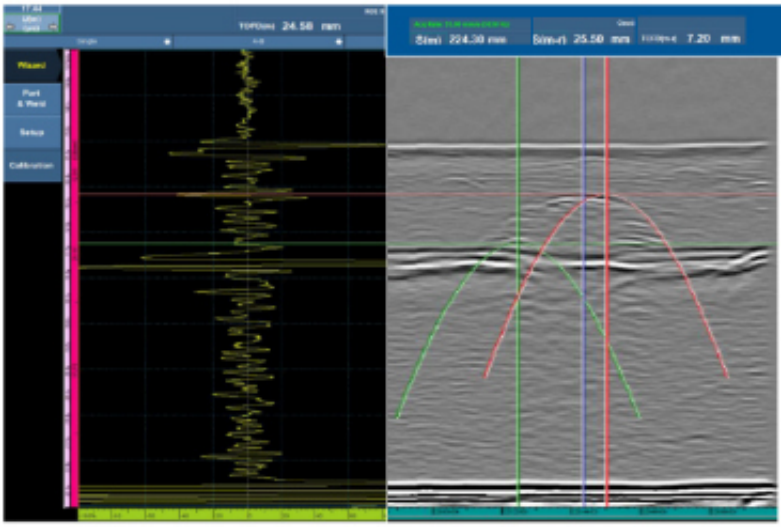
Rys. 13. Reflektory R_{10}, R_{11} oraz R_{12} - nacięcie w przetopie $x_{10,11}$ =(240 +28) mm; $y_{10,11}$ = 20) mm; x_{12} =280 mm; y_{12} = 0 mm $(h \times w)_{10,11,12}$ = (1 x 0,2) mm – skany TOFD+PA(DS).
Skany TOFD „widzą" nacięcie poprzeczne R_{12} - w przetopie w odróżnieniu od PA
Fig. 13. Reflectors R_{10}, R_{11} oraz R_{12} – notch in root area $x_{10,11}$ =(240 +28) mm; $y_{10,11}$ = 20) mm; x_{12} =280 mm; y_{12} = 0 mm $(h \times w)_{10,11,12}$ = (1 x 0,2) mm. On TOFD scan R_{12} is visible, whereas on the PA image not remarkable.



Rys. 14. Reflektor R_{13} -nacięcie na ukosowaniu spoiny x_{13} = 310 mm; z_{13} = (5 + 8,5) mm; $(h \times w)_{13}$ = (2 x 0,5) mm– TOFD+PA.
Fig. 14. Reflector R_{13} – notch on weld bevel x_{13} =310 mm; z_{13} = (5 + 8,5) mm; $(h \times w)_{13}$ = (2 x 0,5) mm – TOFD+PA.



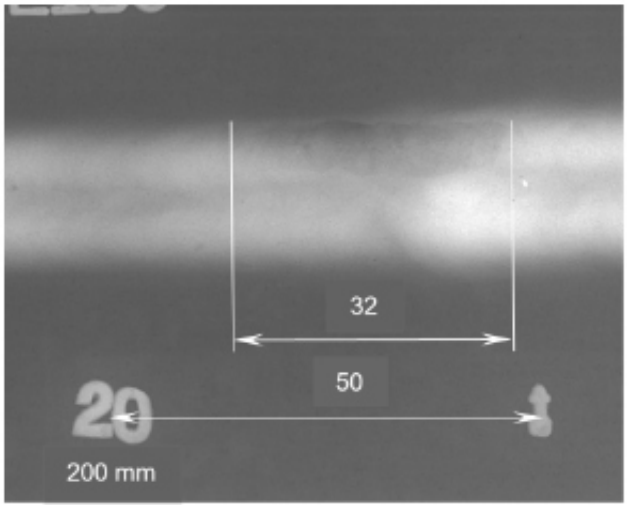
Rys. 15. Reflektor R_{14} -nacięcie na ukosowaniu spoiny x_{14} = 310 mm; z_{14} = (14 + 8,5) mm; $(h \times w)_{14}$ = (2 x 0,5) mm – skany TOFD+PA(DS).
Fig. 15. Reflector R_{14} – notch on weld bevel x_{14} = 310 mm; z_{14} = (14 + 8,5) mm; $(h \times w)_{14}$ = (2 x 0,5) mm –TOFD+PA(DS) scans.



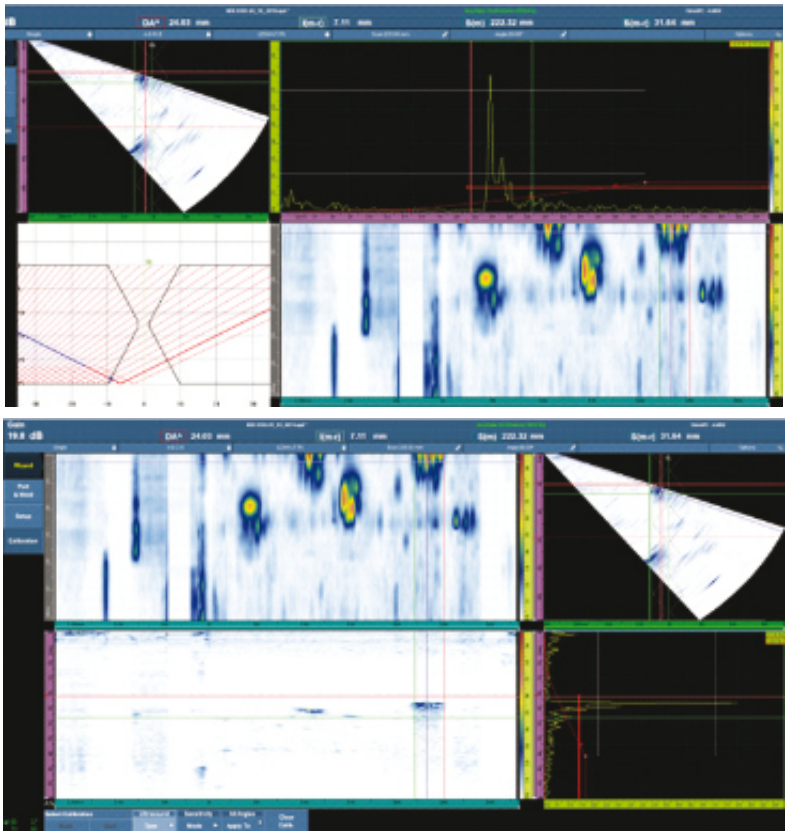
Rys. 16. Zobrazowanie B-TOFD jednej z wad (x = 224,3+ 25,5mm; h = 7,2 mm) - próbka walidacyjna.
Fig. 16. B-TOFD image one of characteristic imperfection (x = 224,3+ 25,5mm; h = 7,2 mm) - validation specimen.

6. Badania walidacyjne techniki PA+TOFD

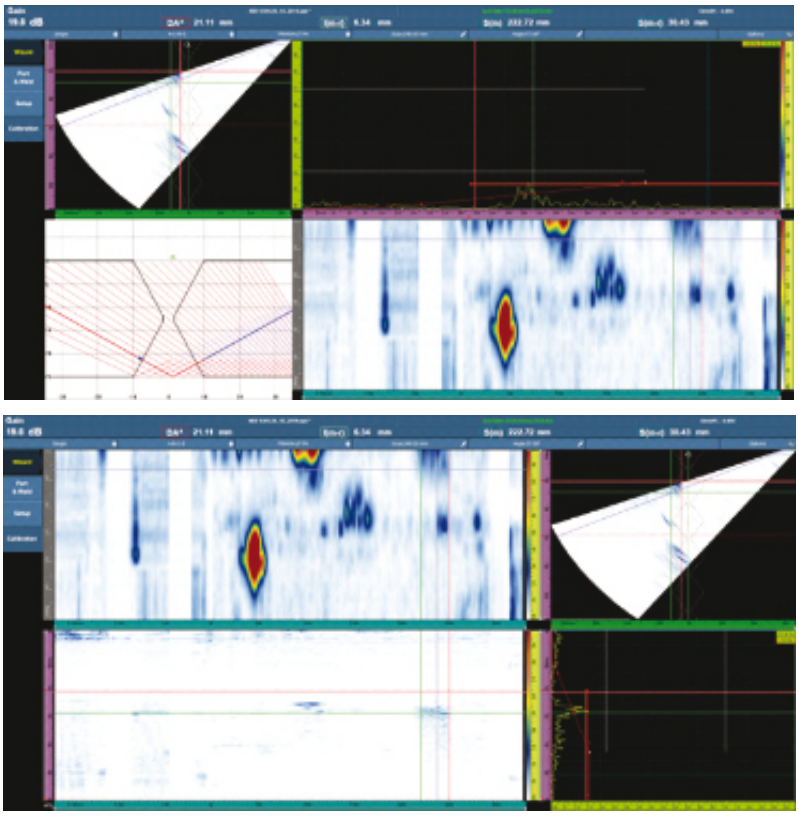
W publikacji będzie podanych kilka przykładów działań walidacyjnych i wdrożeniowych, które zawsze powinny towarzyszyć wprowadzaniu nowej techniki badawczej PA+TOFD na większych przedsięwzięciach technicznych. Temu celowi służy jednoczesne stosowanie kontroli NDT kilkoma metodami objętościowymi. Trzeba mieć przy tym na uwadze znane ograniczenia każdej metody/techniki badawczej i nie oczekiwać pokrywania wyników badania w każdym przypadku. Powyżej zamieszczono (rys.16÷19) przykład lokalizacji i wymiarowania wybranej wady w próbce walidacyjnej technikami ultradźwiękowymi TOFD oraz PA oraz radiograficzną. Należy jeszcze raz podkreślić wzajemne uzupełnianie danych o wadzie przez wspomniane techniki badawcze. Pokazane przykłady działań walidacyjnych potwierdzają wysoką wiarygodność zastosowanej techniki ultradźwiękowej PA+TOFD, która kumuluje w sobie wszystkie zalety związane z cyfrowym zapisem wyników badania wzdłuż długości złącza. Bardzo istotnym elementem wiarygodności wyniku jest mechanizacja procesu skanowania oraz dodatkowe informacje ze stref przypowierzchniowych uzyskiwane głowicami pracującymi w modzie PA, które stanowią o poprawności interpretacji wyników badania.



Rys. 17. Zobrazowanie cyfrowe radiogramu tej wady (x = 216+32 mm) - próbka walidacyjna.
Fig. 17. Digital radiograph with imperfection image (x = 216 + 32 mm) - validation specimen.



Rys. 18. Zobrazowania i wymiary tej wady (x = 222,3 + 31,6 mm; z= 24 mm) wg skanu próbki walidacyjnej głowicą PA(DS).
Fig. 18. Layout of PA(DS) scans on validation specimen – localization and dimensioning of flaw (x = 222,3 + 31,6 mm; z= 24 mm).



Rys. 19. Zobrazowania i wymiary tej wady (x = 222,7 +30,4mm; z_3=21,1mm) wg skanu próbki walidacyjnej głowicą PA(US).
Fig. 19. Layout of PA(US) scans on validation specimen – localization and dimensioning of flaw (x = 222,7+30,4 mm; z_3=21,1 mm).

7. Podsumowanie końcowe

Doświadczenia nabyte przez firmę NDTEST podczas wdrażania techniki PA+TOFD dla badania złączy spawanych potwierdzają, że stanowi ona istotny krok naprzód w stosunku do klasycznych technik radiograficznych i ultradźwiękowych, jak również stosowanej dotychczas w badaniu rurociągów - zaawansowanej techniki wielogłowicowej (głowice klasyczne jednoprzetwornikowe) TOFD+PE [1].

Należy tu podkreślić, że wdrożenie techniki PA+TOFD do praktyki przemysłowej wymaga pokonania szeregu barier technicznych i merytorycznych, związanych zarówno z mechanizacją procesu badania w ciężkich warunkach terenowych, jak też umiejętnością analizy wzajemnie powiązanych zobrazowań cyfrowych typu TOFD oraz PA.

Jako podstawowe elementy procesu wdrażania techniki PA+TOFD należy wymienić:

- kwalifikację procedury badania w oparciu o próbkę referencyjną zapewniającą wykrycie i wymiarowanie wszystkich wymaganych reflektorów w zakresie wyznaczonej objętości badania;
- walidację systemu badawczego na próbce o znanej lokalizacji i rozmiarach wad, z zapewnieniem elementów powtarzalności i odtwarzalności wyniku, co stawowi o wiarygodności sytemu i uzyskiwanych wyników.

Uwzględniając wymagania dokumentów normatywnych dla wybranych poziomów techniki badania TOFD oraz PA a także doświadczenie firmy NDTEST weryfikację nastaw najlepiej opierać na przygotowanych wcześniej próbkach odniesienia, wykonanych z materiału obiektu badanego z zachowaniem wymiarów geometrycznych (grubości i krzywizny badanego złącza).

Jako podstawowe zalety cyfrowej i zmechanizowanej techniki skanowania PA+TOFD (rys. 1) należy wymienić:

- zmniejszona awaryjność systemu ze względu na integrację aparatu na skanerze (sygnał cyfrowy przesyłany kablem ethernetowym do jednostki sterującej);
- możliwość badania złączy dla różnych średnic (tu zakres od DN 500÷1400 mm) o grubościach od 6 do 40 mm, przy stosunkowo niewielkim wzroście nakładu środków i pracochłonności;
- duża wydajność badania, nieznacznie zależną od grubości złączy – do 50÷60 złączy w ciągu dnia roboczego;
- pełny zapis cyfrowy wyników badania z całej objętości złącza i ocena wyniku badania w czasie rzeczywistym on-line;
- analizę wyników (również zdalnie na odległość) z możliwością dokładnego pomiaru położenia, długości, oraz głębokości i wysokości wad przy pomocy specjalnego oprogramowania;
- możliwość oceny fizycznych (zbliżonych do rzeczywistych) rozmiarów wskazań (wysokość i długość);
- zobrazowanie stanu złącza w przekroju podłużnym wzdłuż głębokości, co stanowi komplementarną informację do wyników badania radiograficznego;
- podwyższoną wiarygodność wyników – wynikającą z mechanizacji skanowania oraz zastosowania techniki wielu głowic pracujących w różnych modach do potwierdzania wskazań w tych samych obszarach.

Technika PA+TOFD z użyciem zintegrowanego zmechanizowanego skanera (rys. 1) została efektywnie wdrożona po raz pierwszy w Polsce przez NDTEST w roku 2019/20. Zintegrowany system PA+TOFD będzie stosowany dla badania obiektów rurociągowych o dużym zróżnicowaniu średnic i grubości, na różnego rodzaju instalacjach w przemyśle gazowniczym i petrochemicznym.

8. Literatura

[1] M. G. Silk: Accurate crack depth measurements in welded assemblies, Eighth World Conference on Nondestructive Testing, September 1976;
[2] Mackiewicz S., Górzny J., Kiersnowski M., Pawłowski Z., Ultrasonic detection and depth measurement of cracks in thick welds., XI World Conference on Non-Destructive Testing, Las Vegas 1985;
[3] Ed Ginzel: Ultrasonic Time of Flight Diffraction Book – 1st Edition, 2012, Eclipse Scintific, 260 pages
[4] Ed Ginzel: Phased Array Ultrasonic Technology - 2nd Edition 2019, Eclipse Scintific, 362 pages
[5] Ed Ginzel: Automated Ultrasonic Testing of Pipeline Girth Welds - 2nd Edition 2020, Eclipse Scintific, 322 pages
[6] M. Śliwowski: Podstawy zawansowanej technologii phased-array. Podstawy i zastosowania, wydanie 1, Warszawa 2021 stron 473
[7] M. Śliwowski: Zmechanizowane badanie ultradźwiękowe złączy spawanych techniką wielogłowicową (TOFD+PE), Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane 2013
[8] PN-EN ISO 13588:2019-04:2011, Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe. Stosowanie zautomatyzowanej techniki głowicy mozaikowej
[9] PN-EN ISO 10863:2011: Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania ultradźwiękowe – Zastosowanie techniki dyfrakcji fal ultradźwiękowych (TOFD)
[10] PN-EN ISO 19285:2017-11, Badania nieniszczące spoin. Technika ultradźwiękowe techniką głowicy mozaikowej (PAUT). Kryteria akceptacji
[11] PN-EN ISO 15626:2014-01, Badania nieniszczące spoin. Technika czasu przejścia wiązki dyfrakcyjnej (TOFD). Poziomy akceptacji

K. Schabowicz[1*], A. E. Menéndez Orellana[2], N. Andrianos[3]
1 Professor, Wrocław University of Science and Technology, Poland
2 Wrocław University of Science and Technology, Poland
3 Hellenic Mediterranean University, Heraklion, Greece

Analysis of selected non-destructive methods for diagnosis in new and old buildings

Analiza wybranych metod nieniszczących diagnostyki w nowych i starych budynkach

STRESZCZENIE

Techniki badań nieniszczących (NDT) są na dzień dzisiejszy podstawowym narzędziem stosowanym w inżynierii lądowej. Na podstawie szczegółowego przeglądu literatury przedstawiono w artykule kompleksową ocenę stanu technicznego budynku z zastosowaniem szeregu metod NDT. Ponadto przedstawiono odniesienia do publikacji zawierających opisy, zastosowania i studia przypadków każdej z metod NDT.

***Słowa kluczowe**: konstrukcje betonowe; badania nieniszczące (NDT); konserwacja oparta na stanie (CBM); monitorowanie stanu strukturalnego (SHM).*

ABSTRACT

Non-destructive Testing (NDT) techniques are, as of today, a fundamental tool in civil engineering. Based on a thorough literature review, the scope of this article comprises a comprehensive assessment of the state-of-the-art of a series of NDT methods utilized specifically for concrete diagnosis, grouped into seven categories according to their main aim. Moreover, a summary of references to publications containing descriptions, applications, and case studies of each one is also presented.

***Keywords**: concrete structures; non-destructive testing (NDT); condition-based maintenance (CBM); structural health monitoring (SHM).*

1. Non-destructive Testing (NDT) of concrete: Introduction

Reinforced concrete (RC) is one of the most widely used materials around the world. Even when understood to be a versatile and strong material which can endure significant external degradation, concrete experiences loss of integrity over time due to damage caused by chemical (alkali–silica reaction, carbonation, corrosion, crystallization, leaching, salt, and acid action…), physical (temperature variations, fatigue, overloading, shrinkage, freeze–thaw cycles...) and even biological (accumulation of organic matter, living organisms...) mechanisms. Understanding the multiple deterioration processes is crucial, as each process leads to different types of defects (corrosion of steel, cracking, spalling, delamination…) [1].

Around 3% of the world's gross domestic product (GDP), US$ 2.2 trillion, has been reported from world statistics as losses owing to premature deterioration of concrete [2]. Deterioration is, as a matter of fact, a major problem in any concrete element during its life cycle. That is where NDT methods prove indispensable.

While there is no standard definition for NDT of concrete specifically, the concept generally refers to methods that allow for objects, materials or systems to be examined without impairing their future serviceability; that is, to inspect or to measure without harm [3].

NDT methods are essential for regular monitoring, condition evaluation, quality assessment, and maintenance along different stages of the life of concrete structures. They have drastically reduced the time required to detect, analyze and diagnose structural problems. And besides facilitating condition-based maintenance (CBM), these methods have certainly opened the door to new possibilities for structural health monitoring (SHM).

The idea of this article is to serve as a guide on NDT of concrete structures, in a similar way as the Guidebook [4] published in 2002 by the International Atomic Energy Agency (IAEA) in Vienna was at that time, but with a contemporary approach aimed at updating the knowledge on concrete NDT through comments, findings, and references to conclusions from research studies and innovative works by authors around the world in recent years.

It cannot be overemphasized that, even if the main focus of this article are concrete structures, NDT not only belongs in concrete, let alone only in civil engineering. Its usefulness extends to a wide variety of industries and materials.

1.1 A brief history of NDT of concrete over time

An excellent reference on the matter can be found in the paper titled "Nondestructive Testing of Concrete: History and Challenges" by Carino (1994). From a historical perspective, the author commented on a series of milestones in the development of NDT methods. A timeline of the progress of NDT for hardened concrete along the 50 years previous to the publication of the paper in question is

*Autor korespondencyjny.
E-mail: krzysztof.schabowicz@pwr.edu.pl

Published by „Badania Nieniszczące i Diagnostyka" Publishing Agenda of SIMP
DOI: 10.26357/BNID.2022.008

described, toetheith an outline of future directions and challenges for the XXI century [5]. According to the author, the end of the XX century was an exciting time in terms of NDT of concrete, as new methods were on the horizon.

Carino emphasizes the contributions of V.M. Malhotra toward NDT development. It is worth recalling that in his 1977 landmark paper on the subject of testing cores versus in-place test methods, Malhotra made a call for a change to the status-quo for quality control of concrete. He argued that the current practice based on the standard-cured cylinder strength is ineffective, and concluded: "In order to create some semblance of order in an otherwise chaotic situation, a completely new approach has been suggested. This, of course, will involve fundamental changes in our approach to specifications and code writing, and could take some time before the concrete community accepts it" [5]. Carino quoted the latter in 1994, and in fact, Malhotra's suggestion remains now in 2022 -almost 50 years later- a goal yet to be achieved.

1.2 Classification of NDT methods

NDT methods are frequently classified by authors based on the nature of their governing principle. Nonetheless, it is also suitable, and very much helpful, to categorize these methods according to which parameters are meant to be evaluated by them. The reason why this last criteria is not so often used is likely because, in fact, the usefulness of the majority of NDT methods is not limited to a single aim.

Below, a series of contemporary NDT methods have been grouped into seven categories according to their most frequent application. Table 1 presents a summary of relevant literature for each one, in which a technical description of the methods can be found, as well as their applications, general advantages and disadvantages. Furthermore, there are also references to case studies that either illustrate the way in which the techniques prove useful for concrete diagnosis, or present findings of research work focused on their improvement.

Yet, it is important to emphasize that neither these groups, nor the listed methods, are intended to be exhaustive. Other authors present different categories which enclose additional NDT methods outside the scope of this article.

2. Fundamental challenges associated with NDT of concrete

Carino pointed out that, compared with the development of NDT methods of other materials like steel, NDT of concrete has run at a slower pace. The latter, due to the fact that concrete is an inherently more difficult material to test than steel, and the already developed technology cannot be directly transferred from one material to the other [5].

NDT challenges might, quite often, relate to the testing process itself. For instance, data collection for the Ultrasonic Echo method is usually labor-intensive and time-consuming. A careful calibration of the tomographer is required when starting a testing set, and due to its size, it is not easy to use within confined areas [20]. Another example is the IE technique, which is only effective for detecting certain

Tab. 1. Przykładowe energie uderzenia dla różnych obiektów upadających na strukturę [9].

Tab. 1. Exemplary impact energies for different objects falling on the structure [9]

Aim		NDT method	References
Evaluation of concrete quality	*Based on stress wave*	Ultrasonic pulse velocity (UPV)	*Description of the method:* [3, 6, 7, 8, 9] *Application:* [3, 6, 7, 8, 9, 10] *Case studies:* concrete diagnosis [7], research for method improvement [11]
		Acoustic emission (AE)	*Description of the method:* [6, 12] *Application:* [6, 12] *Case studies:* research for method improvement [6, 12]
		Impact-Echo (IE)	*Description of the method:* [13, 14, 15] *Application:* [13, 14, 15] *Case studies:* research for method improvement [13]
		Impulse-Response	*Description of the method:* [8, 14, 15] *Application:* [8, 14] *Case studies:* concrete diagnosis [8]
		Ultrasonic Echo	*Description of the method:* [8, 16, 17, 18, 19, 20] *Application:* [8, 16, 17] *Case studies:* concrete diagnosis [21, 22], research for method improvement [18]
	Based on imaging technologies	Infrared thermography (IRT)	*Description of the method:* [23, 24, 25, 26, 27] *Application:* [23, 24, 25] *Case studies:* concrete diagnosis [24, 25], research for method improvement [25, 26, 27]
		Radiography testing (RT)	*Description of the method:* [28, 29] *Application:* [28, 29]
		Others	Optical NDT (Fiber Optics, Electronic Speckle) [24], Imaging techniques (Shearography) [30]
Evaluation of steel reinforcement corrosion	*Chloride testing*	Rapid chloride content and profiling	*Description of the method:* [8, 31] *Application:* [8, 31] *Case studies:* concrete diagnosis [32]
		Others	Chloride titrator test strips, Potentiometric titration [3], Sweep Frequency Technique (SFT) [6]
	Percentage of corrosion, corrosion rate and progress	Half-cell potential (HCP)	*Description of the method:* [8, 33, 34] *Application:* [8, 33, 34]
		Galvanostatic pulse method	*Description of the method:* [8, 35] *Application:* [8, 35] *Case studies:* concrete diagnosis and research for method improvement [35]
		Electrical resistivity (ER)	*Description of the method:* [34, 36, 37] *Application:* [34, 36, 37] *Case studies:* concrete diagnosis [36], research for method improvement [37, 38]
		Others	Linear Polarization Resistance (LPR), Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) [39], Combined methodology of GPR and IRT [23],
			Active electrochemical, ion mobility and passivation (AECIP) testing [40]
	Carbonation depth, pH of concrete	Phenolphthalein indicator	*Description of the method:* [8, 41] *Application:* [8, 41] *Case studies:* concrete diagnosis [42]
		Rainbow indicator	*Description of the method:* [8, 43] *Application:* [8] *Case studies:* concrete diagnosis [42]
Determination of in-place compressive strength, surface hardness and adhesion		Rebound hammer (RH)	*Description of the method:* [33, 34, 44, 45, 46] *Application:* [34, 44, 45] *Case studies:* concrete diagnosis [44], research for method improvement [11, 43]
		Pull-out test	*Description of the method:* [8, 45, 47] *Application:* [8, 45]
		Pull-off test	*Description of the method:* [8, 30] *Application:* [8, 48] *Case studies:* research for method improvement [30, 48]
		Maturity	*Description of the method:* [49, 50, 51] *Application:* [49, 50]
Determination of concrete cover, rebar diameter, location of steel reinforcement		Ground penetrating radar (GPR)	*Description of the method:* [1, 38, 52, 6] *Application:* [1, 38, 52]
		Covermeters	*Description of the method:* [53] *Application:* [53, 4] *Case studies:* concrete diagnosis and research for method improvement [53]
Evaluation of permeability		Water penetration test	*Description of the method:* [8, 54] *Application:* [8, 55] *Case studies:* concrete diagnosis [54, 56]
		Moisture content	*Description of the method:* [8] *Application:* [2]
		Others	Moisture content in concrete, thermal analysis, gamma ray method, ultrasonic techniques, X-ray diffraction and scanning electron microscopy [2], Novel sensing technique using a smart antenna for the non-destructive evaluation of moisture content and deterioration in concrete blocks [2], Microwave-based SFT used for the detection of water infiltration for concrete roof structures [6]

Evaluation of permeability	Water penetration test	*Description of the method:* [8, 54] *Application:* [8, 55] *Case studies:* concrete diagnosis [54, 56]
	Moisture content	*Description of the method:* [8] *Application:* [2]
	Others	Moisture content in concrete, thermal analysis, gamma ray method, ultrasonic techniques, X-ray diffraction and scanning electron microscopy [2]. Novel sensing technique using a smart antenna for the non-destructive evaluation of moisture content and deterioration in concrete blocks [2]. Microwave-based SFT used for the detection of water infiltration for concrete roof structures [6]
Monitoring of cracks	Petrographic testing	*Description of the method:* [57, 58, 59] *Application:* [57, 58, 59]
	Crack depth and width	*Description of the method:* [8] *Application:* [8] *Case studies:* concrete diagnosis and research for method improvement [39]
	Crack movement	*Description of the method:* [8] *Application:* [8]

defects in plate-like structures, but becomes less effective in detecting smaller, deeper defects in non-plate like structures (e.g. prismatic concrete elements). Also, with the RT method, surface delaminations and small discontinuities are hard or even impossible to detect. The direction of cracks is also important, as cracks that are perpendicular to the radiation are less likely to be detected [28]. Other major disadvantages of the RT method are related to operational safety [29].

NDT challenges can, alternatively, be associated with the analysis of the retrieved data. With the Pull-off method, for instance, test results show large scatter due to the heterogeneous nature of concrete (e.g. presence of coarse aggregates underneath the metallic fixture), or due to variations among experimental conditions (e.g. depth of the partial core); and also, the measured strength may not be representative of the actual bond capacity, since the loading mode will be pure tension, thus, not fully representative of in-situ service conditions [30]. Another case is the UPV method, mainly used to detect flaws but also used to evaluate compressive strength. However, UPV values are affected by several factors, most of which do not necessarily influence the compressive strength of concrete and therefore create noise in the retrieved data [10]. Thus, the use of this method without core testing does not provide reliable predictions of concrete strength. A third example is the GPR technique, which requires a highly skilled specialist to interpret the retrieved data. This complicates the use of the method for SHM and the possibility to monitor structures over a long period of time to predict potential failures, since processing and analyzing such long-term data would be problematic.

Both of the aforementioned types of challenges come along with the ER method. Accurately interpreting ER data is complex, as the values are sensitive to various parameters related to material properties and environmental factors. In fact, the electrical current is carried by the dissolved charged ions flowing through the pore solution in the concrete, so all the factors affecting the pore structure (e.g. w/c ratio, age, cement type, pozzolanic admixtures, degree of hydration…) will also affect its electrical resistivity. Rebar diameter and spacing, rebar orientation with respect to the probe and cover thickness also cause the variation of ER values [37]. Plus, the test tends to be time consuming and often cause public inconveniences.

The two kinds of challenges also appear in the IRT technique. "Passive" IRT under natural excitation sources is dependent on weather conditions, surface orientation, color and texture of the concrete. There are contradictory reports regarding appropriate time windows for testing. The same defect will have time-varying contrast over the course of the day, and hence, understanding the environmental conditions required to provide an adequate thermal gradient is crucial [25]. For that reason, "active" IRT techniques are used more and more for damage detection, establishing a thermal gradient in the tested concrete by importing energy through an artificial external heat source. However, concrete has low thermal conductivity and is thermally inert, so it requires a lot of energy to manipulate its temperature change and initiate heat flow. Plus, non-uniform heating can lead to false positive results. Consequently, complex post-processing is often needed for thermogram analysis [26].

No single method capable of assessing all structural problems exist, and as a result, complementary NDT is essential. By means of the HCP test, for instance, the potentiometer makes no indication of the corrosion rate but only of the probability that corrosion is ongoing [34]. Therefore, additional NDT to evaluate the corrosion progress is needed. Similarly, while Petrographic testing analyzes concrete at a micro level, other NDT methods provide the data required to have a complete understanding of the structural issues. In other words, petrography alone won't be sufficient for a thorough concrete diagnosis [57].

Another example is the RH test. Manufacturers provide means for rebound numbers to be converted into compressive strength values, but these are not universal and are unreliable, unless the results are correlated to semi-destructive (or destructive) test results. Shubbar et al. (2020) suggest that higher values of compressive strength can be obtained because of surface carbonation, which causes concrete hardening. The harder the concrete, the higher the measured compressive strength, which might not be true for concrete at a greater depth. Higher values can also be obtained when spalling has occurred. On the contrary, a surface with a high moisture content will result in a lower rebound number [33]. Additional NDT as a way of backing results up is highly recommended.

On another note, many of the analyzed methods are not entirely non-destructive. With the HCP technique, for instance, it is necessary to open-up the concrete object for the probe to be in contact with the embedded rebar. The results are largely dependent on the effectiveness of electrical contact [34]. Minor surface damage is caused while carrying out Pull-out and Pull-off testing. Petrographic testing requires core extraction.

Challenges faced by NDT methods are not limited to traditional techniques. Modern tools, such as drones, are not exempt from drawbacks [60].

3. A review on the state-of-the-art of concrete NDT methods

Benefited from the remarkable technological advances of recent decades, NDT has experienced major breakthroughs, as continual improvements in their performance and capabilities have been actively pursued. For example, Howlader et al. (2015) proposed a novel magnetic adhesion mechanism for a wall-climbing robot for vertical RC structures [63].

The paper by Kot et al. (2021) summarizes recent advancements in several contemporary NDT techniques for SHM of concrete. Great attention is paid towards artificial intelligence (AI) as an important part of complex data interpretation. The authors comment on the use of deep machine learning to automate the concrete crack detection process. Other modern tools for SHM are also reviewed, such as: Fiber Optic Sensors (FOS), Camera-based techniques for monitoring the displacement of structures, and Laser Scanners, considered as LiDAR (Light Detection and Ranging) or LaDAR (Laser Detection and Ranging) systems, as part of the remote sensing technologies for detailed inspection of large structures [6].

Hüsken et al. (2021) used optical measuring techniques to study the load-bearing behavior of an RC beam. The focus of their work was on determining failure modes by optical NDT and comparing them with classical measuring methods. The bending beam was equipped with two single-mode (SM) sensor fibers. Optical deformation measurements using Digital Image Correlation (DIC) and Stereophotogrammetry (SP) were conducted [64].

Ham et al. (2015) studied the usefulness of micro-electro-mechanical sensors (MEMS) for application in air-coupled (contactless) sensing to concrete NDT. The application of MEMS towards established concrete test methods, including vibration resonance, impact-echo, ultrasonic surface wave and multi-channel analysis of surface waves (MASW) was demonstrated, and in each test application, the performance of MEMS was compared with conventional contactless and contact sensing technology [65].

Milovanović et al. (2016) pointed out how advances in signal processing, together with efficient numerical algorithms and increased access to powerful computers made it feasible to successfully implement imaging technology into NDT of concrete structures [25].

Yet, the availability of cutting-edge technology is not enough. A proper interpretation of the retrieved data is just as important. Researchers are investigating AI techniques, namely machine learning (ML) algorithms, artificial neural networks (ANNs), support vector machines (SVM), adaptive neural fuzzy inference systems (ANFIS)… to address various challenges, and also combining multiple non-destructive techniques to improve the accurateness and facilitate the obtainment of additional parameters, to enhance the diagnosis process.

Lande and Gadewar (2012) studied how the use of AI, specifically ANN techniques, is a viable strategy to develop computational tools that support the interpretation of ultrasonic methods, to reduce bias and help specialists with analyzing the great amount of test data [10].

Due to the fact that by means of the RH test and the UPV test, concrete compressive strength estimations have a large percentage of error when compared to the results of destructive tests, Ngo et al. (2021) used AI techniques (i.e. ANNs, SVM and ANFIS) to explore the relationships between the results from the two NDT tests and concrete strength [9].

Zhang et al. (2016) introduced advanced ML techniques for data analysis and interpolation of the IE method, based on the idea that the features extracted from the raw IE signals carry much richer information for capturing the IE signal patterns than the peak frequency shift used in the traditional method [13].

Researchers often combine the results of complementary NDT methods. Moczko et al. (2014) described how the Impulse-Response method can be used for fast screening of large concrete structures to determine local areas with possible flaws for further detailed analysis. Such is also the case for the IRT technique, for which researchers have carried out extensive laboratory and in-situ testing comparing its results with the ones from electromagnetic and ultrasonic methods. Milovanović et al. (2016) summarized numerous case studies where the fusion of two or more NDT methods improved the reliability of the assessment [25].

Moreover, NDT is essential in the world of research itself. Rathnarajan et al. (2017), for example, investigated carbonation rate and service life of RC systems with mineral admixtures and special cements, using the Phenolphthalein and Rainbow indicators [42].

Lastly, a fundamental problem in NDT is that the knowledge on the matter is radically heterogeneous around the world. Ten years ago, Lee et al. (2012) presented an in-depth study on the usage of NDT methods in the USA. They aimed at clarifying how, when, and where state Departments of Transportation used NDT methods for highway bridge inspections [66]. Their findings were substantially positive. On the other hand, three years ago, Martínez-Barrita et al. (2019) pointed out that the use of semi-destructive and NDT techniques in some parts of Mexico was very limited, like in Oaxaca, where their study took place [67].

For further information, extensive bibliographic reviews about NDT were also previously carried out by Verma et al. (2013) [3] and by Venkatesh et al. (2017) [43].

3.1 Standardization of NDT methods

NDT techniques have been used for decades, and at present, over 70 types of standardized methods can be used for concrete evaluation [68].

Verma et al. (2013) present a broad list of codes describing NDT methods, as part of their "Review of Nondestructive Testing Methods for Condition Monitoring of Concrete Structures" [3]. Kwan et al. (2015) also list several local and foreign reference standards for condition assessment [34]. Moczko et al. (2018) comment on the new European standard approach introduced for traditional concrete quality control (laboratory testing), a group of standards specified as EN

12390; and for testing concrete in existing structures (in-situ measurements), a group of standards specified as EN 12504 [45]. Nevertheless, even when some national and international codes of practice already incorporate NDT methods, this is still a work in progress with a long way to go.

3.2 Future outlook for NDT methods

Civil engineering as a whole is being revolutionized by tools like remote sensing, AI, the Internet of Things, optical fiber, sensors, drones, high-definition imaging tools, battery-pocket-sized computers… Hence, it is foreseeable that a bright future expects NDT. Efforts are oriented towards modeling the life of structures, processing long-term monitoring data, extracting in-depth information about material properties, enhancing the combination of complementary methods, identifying imperceptible deterioration levels, increasing ease-of-use, accuracy, efficiency; establishing traceable procedures with minimal effort and enabling unobstructed data sharing for collaboration and quality assurance of critical infrastructure [52].

Investigation towards NDT innovation is ongoing. At the end of their article, Zatar et al. (2020) anticipate that their future works will be focused on developing a climbing robot to automate the data collection process for the Ultrasonic Echo testing method, and that the software developed in their study will be extended to provide real-time visualization of concrete structures [18]. Chakraborty et al. (2019) point out that the effectiveness of ultrasonic sensors for long term cracking monitoring in real structures will be the focus of their further studies [68]. Sarker et al. (2017) conclude that even though research into the potential of ZED depth camera is still at a basic stage, experimental methods have enormous potential for infrastructure recognition and modeling. Thus, future works will focus on developing a solid framework for more sophisticated modelling techniques [62]. Needless to say, overcoming the current challenges and reaching a comprehensive standardization of these techniques, will lead to progressively wider use of the methods among researchers, technicians and engineers around the world, making it possible to routinely carry out rapid, cost-efficient, straightforward, accurate and reliable concrete diagnosis; and perhaps, substituting completely the need for destructive test methods.

4. Conclusions

Even when the methods that were reviewed on this article have been in general widely and successfully used along the past decades, there are still great challenges that must be overcome if NDT is to become an everyday part of the diagnosis of concrete structures. Neither the tools used for testing, nor the result interpretation techniques are faultless. Additional research is required, and standardization is essential. However, it is fair to say that the limitations certainly do not exceed the advantages, and that as of today, NDT techniques are a fundamental and extremely valuable tool in civil engineering.

This research was supported by Erasmus+ Program (Grant No. 101/STT/2020)

5. References

[1] M. Alsharqawi, T. Zayed and S. Abu Dabous, "Common practices in assessing conditions of concrete bridges," MATEC Web of Conferences 120, 02016 (2017), DOI: 10.1051/matecconf/201712002016, 2017.

[2] K. H. Teng, P. Kot, M. Muradov, A. Shaw, K. Hashim, M. Gkantou and A. Al-Shamma'a, "Embedded Smart Antenna for Non-Destructive Testing and Evaluation (NDT&E) of Moisture Content and Deterioration in Concrete," Sensors 2019, 19, 547; doi:10.3390/s19030547, 2019.

[3] S. K. Verma, S. S. Bhadauria and S. Akhtar, "Review of Nondestructive Testing Methods for Condition Monitoring of Concrete Structures," Journal of Construction Engineering, Hindawi Publishing Corporation, vol. 2013. Article ID 834572.

[4] Industrial Applications and Chemistry Section, International Atomic Energy Agency (IAEA), Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. Training Course Series No. 17, Vienna: Printed by the IAEA in Austria, September 2002.

[5] N. J. Carino, "Nondestructive Testing of Concrete: History and Challenges," SP-144: Concrete Technology: Past, Present, and Future, American Concrete Institute, DOI:10.14359/4456, pp. 623-678, 1994.

[6] P. Kot, M. Muradov, M. Gkantou, G. . S. Kamaris, K. Hashim and D. Yeboah, "Recent Advancements in Non-Destructive Testing Techniques for Structural Health Monitoring," Applied Sciences 2021, 11, 2750, 2021.

[7] L. Pedreros, F. Cárdenas, N. Ramírez and E. Forero, "NDT Non-Destructive Test for Quality Evaluation of Concrete specimens by Ultrasonic Pulse Velocity measurement," IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 844 (2020) 012041, 2020.

[8] Germann Instruments, "Products by Application," [Online]. Available: https://germann.org/products-by-application. [Accessed March 2022].

[9] T. Q. L. Ngo, Y. R. Wang and D. L. Chiang, "Applying Artificial Intelligence to Improve On-Site Non-Destructive Concrete Compressive Strength Tests," Crystals 2021, 11, 1157. https://doi.org/10.3390/cryst11101157, 2021.

[10] P. S. Lande and A. S. Gadewar, "Application of Artificial Neural Networks in Prediction of Compressive Strength of Concrete by Using Ultrasonic Pulse Velocities," IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). ISSN: 2278-1684, vol. 3, no. 1, pp. 34-42, Sep-Oct. 2012.

[11] B. Youcef, K. Said and A.-B. Khoudja, "Prediction of concrete strength by non-destructive testing in old structures: Effect of core number on the reliability of prediction," MATEC Web of Conferences 149, 02007 (2018), CMSS-2017, https://doi.org/10.1051/matecconf/201814902007, 2018.

[12] T.-M. Oh, M.-K. Kim, J.-W. Lee, H. Kim and M.-J. Kim, "Experimental Investigation on Effective Distances of Acoustic Emission in Concrete Structures," Applied Sciences 10, 6051, 2020.

[13] J. K. Zhang, W. Yan and D. M. Cui, "Concrete Condition Assessment Using Impact-Echo Method and Extreme Learning Machines," Sensors 2016, 16, 447; doi:10.3390/s16040447, 2016.

[14] A. Moczko and M. Moczko, "Modern NDT Systems for Structural Integrity Examination of Concrete Bridge Structures," Procedia Engineering 91, XXIII R-S-P seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (23RSP) (TFoCE 2014), doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.086, p. 418 – 423, 2014.

[15] A. G. Davis, "Impact-Echo and Impulse Response Testing," Workshop on new technologies for NDT of roads and bridges, 1998 Transportation Research Board Annual Conference, January 1998.

[16] S. Küttenbaum, A. Taffe, T. Braml and S. Maack, "Reliability assessment of existing bridge constructions based on results of non-destructive testing," MATEC Web of Conferences 199, 06001 (2018), https://doi.org/10.1051/matecconf/201819906001, 2018.

[17] O. Aguirre, I. Vidaud, L. Peña and E. Vidaud, "Evaluación de Integridad Estructural mediante Tomografía Tridimensional Ultrasónica (MIRA), Primera parte," Construcción y Tecnología en Concreto, June 2013.

[18] W. A. Zatar, H. D. Nguyen and H. M. Nghiem, "Ultrasonic pitch and catch technique for non-destructive testing of reinforced concrete slabs," Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, https://doi.org/10.1186/s43065-020-00012-z, 2020.

[19] O. Aguirre, I. Vidaud, L. Peña and E. Vidaud, "Evaluación de Integridad Estructural mediante Tomografía Tridimensional Ultrasónica (MIRA), Segunda parte," Construcción y Tecnología en Concreto, July 2013.

[20] C. Germann Petersen and H. D. Orozco Recillas, "Non-destructive testing of joints in precast element structures," Concrete Solutions: Proceedings of Concrete Solutions, 6th International Conference on Concrete Repair, Thessaloniki, Greece. ISBN 978-1-138-03008-4, pp. 229-234, 2016.

[21] E. Krawczyk, "Praca Dyplomowa Magisterska: Analiza wybranych metod nieniszczących do badania konstrukcji betonowych dostępnych jednostronnie (in Polish)," Politechnika Wrocławska, Wrocław, Academic Year 2019/2020.

[22] A. Kwiecińska, "Master's Diploma Thesis: Analysis of selected non-destructive methods for concrete diagnosis," Politechnika Wrocławska, Wrocław, Academic Year 2017/2018.

[23] M. Solla, S. Lagüela, N. Fernández and I. Garrido, "Assessing Rebar Corrosion through the Combination of Nondestructive GPR and IRT Methodologies," Remote Sensing 2019, 11, 1705; doi:10.3390/rs11141705, 2019.

[24] Y. K. Zhu, G. Y. Tian, R. S. Lu and H. Zhang, "A Review of Optical NDT Technologies," Sensors 2011, 11, 7773-7798; doi:10.3390/s110807773, ISSN 1424-8220, 2011.

[25] B. Milovanović and I. Banjad Pečur, "Review of Active IR Thermography for Detection and Characterization of Defects in Reinforced Concrete," Journal of Imaging 2016, 2, 11; doi:10.3390/jimaging2020011, 2016.

[26] B. Milovanović, M. Gaši and S. Gumbarević, "Principal Component Thermography for Defect Detection in Concrete," Sensors 2020, 20, 3891; doi:10.3390/s20143891, 2020.

[27] J. Huh, V. H. Mac, Q. H. Tran, K. Y. Lee, J. I. Lee and C. Kang, "Detectability of Delamination in Concrete Structure Using Active Infrared Thermography in Terms of Signal-to-Noise Ratio," Applied Sciences 2018, 8, 1986; doi:10.3390/app8101986, 2018.

[28] S. Nasrazadani and S. Hassani, "Modern analytical techniques in failure analysis of aerospace, chemical, and oil and gas industries," in Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Oil and Gas Industry, First Edition, Elsevier, 2016.

[29] VicRoads, "Technical Note: Non-Destructive Testing (NDT) of Concrete in Structures," December 2010. [Online]. Available: https://www.vicroads.vic.gov.au. [Accessed April 2022].

[30] A. Billon-Filiot, F. Taillade, M. Quiertant, J. M. Hénault, J. C. Renaud, R. Maurin and K. Benzarti, "Development of an Innovative Non-Destructive and Field-Oriented Method to Quantify the Bond Quality of Composite Strengthening Systems on Concrete Structures," Materials 2020, 13, 5421; doi:10.3390/ma13235421, 2020.

[31] E. Poulsen, "Chloride Profiles: Analysis and Interpretation of Observations," AEClaboratory, 1995.

[32] L. O. Nilsson, "Durability concept; pore structure and transport processes," in Advanced Concrete Technology, Elsevier, 2003.

[33] A. A. Shubbar, Z. S. Al-khafaji, M. S. Nasr and M. W. Falah, "Using non-destructive tests for evaluating flyover footbridge: Case study," KBES, 2020.

[34] A. Kwan and P. L. Ng, "Building Diagnostic Techniques and Building Diagnosis: The Way Forward," P.W. Tse et al. (eds.), Engineering Asset Management - Systems, Professional Practices and Certification, Lecture Notes in Mechanical Engineering, DOI 10.1007/978-3-319-09507-3_74, pp. 849-862, November 2015.

[35] S. Sathiyanarayanan, P. Natarajan, K. Saravanan, S. Srinivasan and G. Venkatachari, "Corrosion monitoring of steel in concrete by galvanostatic pulse technique," Cement & Concrete Composites 28 (2006), doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.03.005 , pp. 630-637, 2006.

[36] K. Hornbostel, T. Danner and M. R. Geiker, "Non-destructive Test Methods for Corrosion Detection in Reinforced Concrete Structures," Nordic Concrete Research – Publ. No. NCR 62 – Article 3, DOI: 10.2478/ncr-2019-0005, no. 1, pp. 41-61, 2020.

[37] K. P. V. Robles, J.-J. Yee and S.-H. Kee, "Effect of the Geometrical Constraints to the Wenner Four-Point Electrical Resistivity Test of Reinforced Concrete Slabs," Sensors 2021, 21, 4622. https://doi.org/10.3390/s21134622, 2021.

[38] Z. M. Sbartaï, S. Laurens, J. Rhazi, J. P. Balayssac and G. Arliguie, "Using radar direct wave for concrete condition assessment: Correlation with electrical resistivity," Journal of Applied Geophysics 62 (2007), doi:10.1016/j.jappgeo.2007.02.003, p. 361–374, 2007.

[39] J. H. Castorena-González, U. Martin, C. Gaona-Tiburcio, R. E. Núñez-Jáquez, F. M. Almeraya-Calderón, J. M. Bastidas and D. M. Bastidas, "Modeling Steel Corrosion Failure in Reinforced Concrete by Cover Crack Width 3D FEM Analysis," Frontiers in Materials, doi: 10.3389/fmats.2020.00041, vol. 7, no. 41, February 2020.

[40] R. W. Arndt, "Next Generation Building Diagnostics – Corrosion Detection," in Fifth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT5), London, 2019.

[41] V. Rimshin and P. Truntov, "Determination of carbonation degree of existing reinforced concrete structures and their restoration," E3S Web of Conferences 135, 03015 (2019), ITESE-2019, https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913503015, 2019.

[42] S. Rathnarajan and R. G. Pillai, "Carbonation rate and service life of reinforced concrete systems with mineral admixtures and special cements," in CORCON, Mumbai, September 2017.

[43] P. Venkatesh and M. Alapati, "Condition Assessment of Existing Concrete Building Using Non-Destructive Testing Methods for Effective Repair and Restoration - A Case Study," Civil Engineering Journal, http://dx.doi.org/10.28991/cej-030919, vol. 3, no. 10, October 2017.

[44] A. Borosnyói, "NDT Assessment of existing concrete structures: Spatial analysis of rebound hammer results recorded in-situ," Engineering Structures and Technologies, ISSN 2029-882X / eISSN 2029-8838, 2015 7(1), doi:10.3846/2029882X.2015.1085331, pp. 1-12, 2015.

[45] A. Moczko and M. Moczko, "In-situ examination of the concrete quality: European standard approach," MATEC Web of Conferences 196, 02045 (2018), XXVII R-S-P Seminar 2018, Theoretical Foundation of Civil Engineering, https://doi.org/10.1051/matecconf/201819602045, 2018.

[46] Technischen Universität München (TUM), "TUM Wiki-System," [Online]. Available: https://wiki.tum.de/. [Accessed April 2022].

[47] N. J. Carino, "In-Place Strength Without Testing Cores: The Pullout Test," in 6th International Seminar on Advances in Cement & Concrete Technology for Sustainable Development.

[48] S. Czarnecki, "Non-destructive evaluation of the bond between a concrete added repair layer with variable thickness and a substrate layer using ANN," Procedia Engineering 172 (2017), doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.049, p. 194–201, 2017.

[49] N. J. Carino and H. S. Lew, "The Maturity Method: From Theory to Application," in Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, Washington, D.C., 2001.

[50] COMMAND Center concrete temperature and maturity system, "The Maturity Method: Why You Should Validate Your Maturity Curve," June 2019. [Online]. Available: https://www.commandcenterconcrete.com/maturity-method-why-validate-maturity-curve/. [Accessed May 2022].

[51] BERRA Construction Products, "What Is Concrete Maturity?," [Online]. Available: https://www.berraproducts.com.au/what-is-concrete-maturity/. [Accessed May 2022].

[52] O. G. Erhimona and J. Andrew, "Recent advances in non-destructive testing of concretes and structures: An outlook," Journal of Civil Engineering and Construction Technology, DOI: 10.5897/JCECT2019.0494, pp. 20-31, 2019.

[53] N. J. Carino, "Performance of Electromagnetic Covermeters for Nondestructive Assessment of Steel Reinforcement," NISTIR 4988, National Institute of Standards and Technology, December 1992.

[54] A. Moczko and M. Moczko, "GWT – New Testing System for „in-situ" Measurements of Concrete Water Permeability," Procedia Engineering 153 (2016), XXV Polish – Russian – Slovak Seminar "Theoretical Foundation of Civil Engineering", p. 483–489, 2016.

[55] A. I. Cark, "The Influences of Silica Fume and Curing Temperature on Water Permeability of Concrete," [Online]. Available: https://www.germanninstruments.com/wp-content/uploads/2022/01/Cark-A.-I.-The-influence-of-silica-fume-and-curing-temperature-on-water-permeability-of-concrete.pdf. [Accessed May 2022].

[56] K. G. Trezos, I. P. Sfikas and D. I. Pavlou, "Water Permeability of Self Compacting Concrete," 3rd fib International Congress, 2010.

[57] D. Rothstein, "Petrography: What It Can and Cannot Do," AC Business Media, Inc. Construction Network, January 2014. [Online]. Available: https://www.forconstructionpros.com/concrete/article/11248215/petrography-what-it-can-and-cannot-do-for-concrete-contractors. [Accessed April 2022].

[58] "Petrographic Examination of Concrete," Concrete Research & Testing, LLC (CRT), [Online]. Available: http://www.concretetesting.com/petrographic-examinations-concrete/. [Accessed April 2022].

[59] A. Snyder, "What Can Petrographic Analysis Tell You About the Condition of Concrete Structures?," RJ Lee Group, December 2014. [Online]. Available: https://www.rjlg.com/2014/12/petrography-tell-you-about-concrete-structures/. [Accessed April 2022].

[60] E. Ciampa, L. De Vito and M. R. Pecce, "Practical issues on the use of drones for construction inspections," XXVI AIVELA National Meeting, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1249 (2019) 012016, doi:10.1088/1742-6596/1249/1/012016, 2019.

[61] Vlaamse Drone Federatie (EUKA), Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB), Vlaams agentschap Innoveren & Ondernemen (VLAIO), "Drones als hulpmiddel: Inzichten in nieuwe werkprocessen op de bouwwerf (Drones as a tool: Insights into new work processes on the construction site)," VIS-project, in Dutch, January 2020.

[62] M. M. Sarker, T. A. Ali, A. Abdelfatah, S. Yehia and A. Elaksher, "A Cost-Effective Method for Crack Detection and Measurement on Concrete Surface," The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W8, 5th International Workshop LowCost 3D – Sensors, Algorithms, Applications, Hamburg, Germany, November 2017.

[63] O. F. Howlader and T. P. Sattar, "Finite Element Analysis based Optimization of Magnetic Adhesion Module for Concrete Wall Climbing Robot," International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), vol. 6, no. 8, 2015.

[64] G. Hüsken, S. Pirskawetz, D. Hofmann, F. Basedau, K. P. Gründer and D. Kadoke, "The load-bearing behavior of a reinforced concrete beam investigated by optical measuring techniques," Materials and Structures (2021) 54:102, https://doi.org/10.1617/s11527-021-01699-6, 2021.

[65] S. Ham and J. S. Popovics, "Application of Micro-Electro-Mechanical Sensors Contactless NDT of Concrete Structures," Sensors 2015, 15; doi:10.3390/s150409078, pp. 9078-9096, 2015.

[66] S. Lee and N. Kalos, "Bridge inspection practices using non-destructive testing methods," Journal of Civil Engineering and Management, 2015, ISSN 1392-3730 / eISSN 1822-3605, vol. 21(5), p. 654–665, 2015.

[67] R. Martínez-Barrita, H. López-Calvo, H. Gómez-Barranco and A. Muciño-Vélez, "Diagnosis of the deterioration state of a reticular reinforced concrete roof using non-destructive and semi-destructive techniques," Revista de Ingeniería Civil, vol. 3, no. 7, pp. 12-20, March 2019.

[68] J. Chakraborty, A. Katunin, P. Klikowicz and M. Salamak, "Early Crack Detection of Reinforced Concrete Structure Using Embedded Sensors," Sensors 2019, 19, 3879; doi:10.3390/s19183879, 2019.

[69] S. A. Rizwan, M. A. Qureshi and F. A. Najam, "In-Situ Health Assessment of a Poorly Executed Pre-Stressed In-Service Concrete Bridge and Suggesting a Rehabilitation Strategy – a Case Study," Procedia Engineering 54 (2013), doi: 10.1016/j.proeng.2013.03.058, pp. 636-647, 2013.

Marek Śliwowski*
NDTEST Sp. z o.o. - Warszawa

Analiza porównań biegłości badania złącza spawanego

Analysis of proficiency tests of welded joint

STRESZCZENIE

Analizę przeprowadzono na podstawie dwóch programów badania biegłości autoryzowanych przez klub POLLAB w ramach sekcji BADAŃ MATERIAŁOWYCH oraz programu badań międzylaboratoryjnych organizowanego przez firmę NDTEST.
W roku 2019 zostały zainicjowane programy biegłości badań nieniszczących takiej samej próbki złącza spawanego:
– radiograficzną techniką błonową - PT 11/19-20 – RTF [1];
– ultradźwiękową techniką ręczną - PT 12/19-20 – UTman. [2];
– ultradźwiękową techniką phased-array - ILC 2/19-20 – UT-PA [3].
Programy zrealizowano z udziałem ponad 30 laboratoriów w okresie około 2 lat ze względu na znane ograniczenia obiektywne.
Analiza, przeprowadzona na podstawie sprawozdań końcowych dla każdego z programów, dotyczyła wybranych wskazań nieakceptowanych, scharakteryzowanych przez istotne parametry ich lokalizacji i rozmiarów. Badania biegłości pozwoliły ocenić „odległość" od wartości referencyjnych dla wyników uzyskiwanych różnymi metodami/technikami badawczymi przez poszczególne laboratoria, przywoływane tu w formie losowo przydzielonych kodów.
Ocena opierała się na opracowaniach statystycznych, dobrze ugruntowanych w tego typu badaniach biegłości. Niezależnie porównano również niektóre parametry wad, określane niezależnie dwoma objętościowymi metodami badań nieniszczących. Wnioski trzech programów biegłości w obszarze badań nieniszczących stanowią bardzo istotny wkład w rozwój laboratoriów badawczych, w kontekście wiarygodności uzyskiwanych wyników badania.

ABSTRACT

The analysis has been carried out on the base of two proficiency tests authorized by society club POLLAB within the frame of Materials Testing section and the interlaboratory comparison program authorized by NDTEST company.
At the end of 2019 there have been initiated two proficiency programs in the non-destructive testing area on the same welded joint sample using:
– radiographic analogous film technique - PT 11/19-20 – RTF [1];
– ultrasonic manual technique - PT 12/19-20 – UTman. [2];
– ultrasonic phased-array technique - ILC 2/19-20 – UT-PA [3]..
The programs have been performed by about 30 laboratories in the period of about 2 years on account of known objective limitations.
The analysis has been done on the base of final reports for each test and was focussed on the chosen unaccepted indications, characterized by essential parameters of its localization and size. The proficiency tests allow to evaluate the" distance" to reference values for results parameters achieved by each laboratory, coded here by secret randomly designated numbers. The assessment is based on statistical treatments, very good established in proficiency evaluation.
Some parameters of imperfections have been compared as a two independently values determined by applied volumetric testing techniques. The conclusions from these proficiency tests in the non-destructive area provided the real contribution in the testing laboratory development in view of reliability of testing results.

1. Laboratoria biorące udział w badaniach biegłości

Do obydwu badań biegłości zgłosiło akces 35 laboratoriów, z których 2 zrezygnowały z porównań po nadaniu numerów kodowych. W rezultacie w opracowaniu brak jest wyników dla laboratoriów o numerach kodowych 5 raz 12.

1.1 Radiograficzna technika błonowa PT 11/19-20 – RT_F

Do udziału w badaniach biegłości dotyczących badań radiograficznych – techniką błonową zgłosiło akces 27 laboratoriów. W rezultacie w opracowaniu brak jest wyników dla numerów kodowych: 1, 5, 8, 12, 14, 25, 26, oraz 27.

Spośród 27 laboratoriów 13 posiadało akredytację PCA, 23 miało uznanie UDT a 1 nie posiadało ani akredytacji ani uznania UDT. Wśród uczestników 23 laboratoria należą do stowarzyszenia Pollab, pozostałe deklarowały chęć przystąpienia do Sekcji Badań Materiałowych.

Listę uczestników w kolejności niezwiązanej z tajnymi kodami laboratoriów przedstawiono poniżej:

1) Baltic Test Sp. z o.o. - Gdańsk akredyt. PCA ---; uzn. UDT LBU-226/06-18 Pollab ---
2) Bombardier Test Sp. z o.o - Wrocław. akredyt. PCA AB675 uzn. UDT --- Pollab 1038
3) Doosan Babcock Energy Polska S.A. akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-046/06-18 Pollab 1096
4) Ferrum S.A. - Katowice akredyt. PCA A 1623 uzn. UDT LBU-017/09-20 Pollab ---
5) KIWA Sp. z o.o - Warszawa akredyt. PCA AB1487 uzn. UDT LBU-020/27-19 Pollab 133
6) Mostostal Wechta Sp. z o.o - Słupca akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-08617-17 Pollab 656
7) Mostastal Zabrze S.A. akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-048/07-17 Pollab 309
8) Navitest Sp. z o.o - Gdańsk akredyt. PCA

*Autor korespondencyjny.
E-mail: m.sliwowski@ndtest.com.pl

Published by „Badania Nieniszczące i Diagnostyka" Publishing Agenda of SIMP
DOI: 10.26357/BNID.2022.009

AB1646 uzn. UDT LBU-046/06-18 Pollab 944
9) NDTEST Sp. z o.o - Warszawa akredyt. PCA AB1307 uzn. UDT LBU-289/27-18 Pollab 745
10) Odlewnia Śrem Sp. z o.o akredyt. PCA AB 040 uzn. UDT LBU-046/06-18 Pollab 944
11) 11) PAK Serwis S.A.- Konin akredyt. PCA AB1008 uzn. UDT LBU-090/17-19 Pollab 944
12) PALAB Sp. z o.o - Poznań akredyt. PCA AB 608 uzn. UDT LBU-072/19-19 Pollab 720
13) PGE GiEK S.A.- Dolna Odra akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-105/24-18 Pollab 766
14) PLB TEST Jacek Kozłowski–Ruda Ś akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-200/09-18 Pollab 792
15) PPUH "AR" Sp. z o.o - Szczecin akredyt. PCA AB1524 uzn. UDT LBU-072/19-19 Pollab 91
16) PUH TEST Sp. z o.o – Gorzów Wlk. akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-008/8-17 Pollab 328
17) RAFAKO S.A.- Racibórz akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-113/19-19 Pollab 576
18) SEFAKO Fabryka Kotłów S.A.-Sędz. akredyt. PCA --- uzn. UDT LBZ-211/10 Pollab 979
19) ŚCBJ Sp. z o.o. – Ostrowiec Świętok. akredyt. PCA AB1336 uzn. UDT LBU-182/10-18 Pollab 859
20) Technic-Control Sp. z o.o. – Szczecin akredyt. PCA AB 080 uzn. UDT LBU-091/24-19 Pollab 666
21) TDT – Kraków akredyt. PCA AB1141 uzn. TD-Cert. 3 006 2008 L Pollab 837
22) UDT CLDT – Warszawa akredyt. PCA AB 001 uzn. UDT. --- Pollab 045
23) Wagony Świdnica S.A. akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-014/26-17 Pollab 316
24) ZA "Puławy" S.A. akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-065/13-18 Pollab 400
25) ZEC Diagpom Sp. z o.o - Wrocław akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-116/28-19 Pollab ---
26) ZKS FERRUM S.A. - Katowice akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-011/09-18 Pollab ---
27) ZRK Koszalin akredyt. PCA --- uzn. UDT --- Pollab 1074

1.2 Ręczne badania ultradźwiękowe PT 12/19-20 – UT_{man}

Ostatecznie w badaniu biegłości ręcznych badań ultradźwiękowych ocenie podlegały 33 laboratoria, wśród których 15 posiadało akredytację PCA, 29 miało uznanie UDT a 2 nie posiadały ani akredytacji ani uznania UDT. Spośród uczestników 28 laboratoriów należy do stowarzyszenia Pollab, pozostałe deklarowały chęć przystąpienia do Sekcji Badań Materiałowych.

Listę uczestników w kolejności niezwiązanej z kodami laboratoriów przedstawiono poniżej:

1) Baltic Test Sp. z o.o. - Gdańsk akredyt. PCA ---; uzn. UDT LBU-226/06-18 Pollab ---
2) Bombardier Test Sp. z o.o - Wrocław. akredyt. PCA AB675 uzn. UDT --- Pollab 1038
3) Doosan Babcock Energy Polska S.A. akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-046/06-18 Pollab 1096
4) Ferrum S.A. - Katowiceakredyt. PCA A 1623 uzn. UDT LBU-017/09-20 Pollab ---
5) Huta Bankowa Sp. z o.o.-Dąbrowa G. akredyt. PCA --- uzn. UDT --- Pollab 368
6) IN-BUL Mirosław Bulczak-Sierakow akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-270/06-17 Pollab 931
7) Inżynieria Materiałowa – wydział PW akredyt. PCA A 1075 uzn. UDT LBU-249/27-19 Pollab 839
8) KIWA Sp. z o.o - Warszawa akredyt. PCA AB1487 uzn. UDT LBU-020/27-19 Pollab 133
9) KOLI Sp. z o.o – Banino k/Gdańska akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-108/06-17 Pollab 367
10) MEG Sp. z o.o - Warszawa akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-244/27-18 Pollab 687
11) Mostostal Wechta Sp. z o.o - Słupca akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-08617-17 Pollab 656
12) Mostastal Zabrze S.A. akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-048/07-17 Pollab 309
13) Navitest Sp. z o.o - Gdańsk akredyt. PCA AB1646 uzn. UDT LBU-046/06-18 Pollab 944
14) NCBJ LBM Świerk akredyt. PCA AB 025 uzn. UDT LBU-038/17-17 Pollab 126
15) NDTEST Sp. z o.o - Warszawa akredyt. PCA AB1307 uzn. UDT LBU-289/27-18 Pollab 745
16) Odlewnia Śrem Sp. z o.o akredyt. PCA AB 040 uzn. UDT LBU-046/06-18 Pollab 944
17) PAK Serwis S.A.- Konin akredyt. PCA AB1008 uzn. UDT LBU-090/17-19 Pollab 944
18) PALAB Sp. z o.o - Poznań akredyt. PCA AB 608 uzn. UDT LBU-072/19-19 Pollab 720
19) PGE GiEK S.A.- Dolna Odra akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-105/24-18 Pollab 766
20) PLB TEST Jacek Kozłowski–Ruda Ś akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-200/09-18 Pollab 792
21) PPUH "AR" Sp. z o.o - Szczecin akredyt. PCA AB1524 uzn. UDT LBU-072/19-19 Pollab 91
22) PUH TEST Sp. z o.o – Gorzów Wlk. akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-008/8-17 Pollab 328
23) RAFAKO S.A.- Racibórz akredyt. PCA ---

uzn. UDT LBU-113/19-19 Pollab 576

24) SEFAKO Fabryka Kotłów S.A.-Sędz. akredyt. PCA --- uzn. UDT LBZ-211/10 Pollab 979
25) ŚCBJ Sp. z o.o. – Ostrowiec Świętok. akredyt. PCA AB1336 uzn. UDT LBU-182/10-18 Pollab 859
26) Technic-Control Sp. z o.o. – Szczecin akredyt. PCA AB 080 uzn. UDT LBU-091/24-19 Pollab 666
27) TDT – Kraków akredyt. PCA AB1141 uzn. TD-Cert. 3 006 2008 L Pollab 837
28) UDT CLDT – Warszawa akredyt. PCA AB 001 uzn. UDT. --- Pollab 045
29) Wagony Świdnica S.A. akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-014/26-17 Pollab 316
30) ZA "Puławy" S.A. akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-065/13-18 Pollab 400
31) ZEC Diagpom Sp. z o.o - Wrocław akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-116/28-19 Pollab ---
32) ZKS FERRUM S.A. - Katowice akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-011/09-18 Pollab ---
33) ZRK Koszalin akredyt. PCA --- uzn. UDT --- Pollab 1074

2. Laboratoria biorące udział w badaniach międzylaboratoryjnych ILC

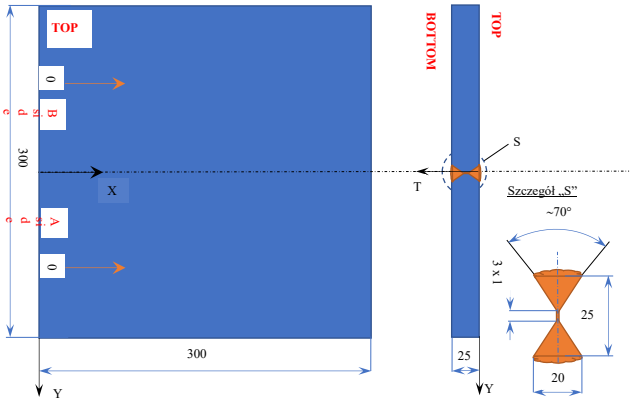
Do badania ILC zgłosiło akces 5 spośród 35 laboratoriów, które brały udział w przedstawionych powyżej badaniach biegłości.

2.1 Ultradźwiękowa technika phased-array ILC 2/19-20 – UT-PA

Ostatecznie w badaniu biegłości ILC w zakresie ultradźwiękowej techniki UT-PA ocenie podlegało 5 laboratoriów, wśród których 4 posiadało akredytację PCA, wszystkie 5 laboratoriów ani akredytacji ani uznania UDT. Wszystkich 5 uczestników posiadało uznanie UDT i należa ło do stowarzyszenia Pollab.

Listę uczestników w kolejności niezwiązanej z kodami laboratoriów przedstawiono poniżej:

1) KOLI Sp. z o.o – Banino k/Gdańska akredyt. PCA --- uzn. UDT LBU-108/06-17 Pollab 367
2) Navitest Sp. z o.o - Gdańsk akredyt. PCA AB1646 uzn. UDT LBU-046/06-18 Pollab 944
3) NDTEST Sp. z o.o - Warszawa akredyt. PCA AB1307 uzn. UDT LBU-289/27-18 Pollab 745
4) Technic-Control Sp. z o.o. – Szczecin akredyt. PCA AB 080 uzn. UDT LBU-091/24-19 Pollab 666
5) UDT CLDT – Warszawa akredyt. PCA AB 001 uzn. UDT. UDT Pollab 045



Rys. 1. Badany element w postaci płyty # 25 mm oznaczony Nr NDE 9305 -ze spoiną typu X, w której w czasie spawania implementowano wady w obszarze złącza. Na rysunku oznaczono punkt odniesienia „*0*", obszary badania *A* oraz *B* oraz powierzchnie górną „TOP" oraz dolną „BOTTOM" złącza dla jednoznacznej lokalizacji wskazań przy badaniu *RT* oraz *UT*.

3. Przedmiot porównań biegłości

Przedmiotem badania biegłości PT 11/19-20/RT_F [1], PT 12/19-20/UT_{man} [2] oraz ILC 2/19-20/UT-PA [3] jest certyfikowana próbka ze stali węglowej, o wymiarach 300x300x25mm, ze złączem spawanym wykonanym ręcznie, o ukosowaniu X (por. Rys. 1) . Złącze oznakowane jest od strony lica spoiny (TOP): numerem ***NDE-9305*** znakiem początku pomiarów i strzałką oznaczającą kierunek badań. Złącze przygotowane jest do badania od strony 2-go lica spoiny (BOTTOM) ze znakiem początku pomiarów i strzałką oznaczającą kierunek badań. Jednoznacznie zdefiniowane są również obszary przeszukiwania w przyjętym układzie współrzędnych – obszar „A" strona dodatnich wartości Y oraz obszar „B" strona ujemnych wartości Y.

4. Organizacja badań biegłości

Każdy uczestnik porównań biegłości **PT 11/19-20/RT_F**, **PT 12/19-20/UT_{man}** oraz **ILC 2/19-20/UT-PA** bazował na sporządzonej przez organizatora instrukcji porównań badania RT i/lub UT i otrzymywał:

- Program badania biegłości, zawierający ramowy opis organizacji badań;
- Wzór protokołu badania **RT_F–W-00/19 – PT 11/19** i/lub **UT_{man}–W-00/19 – PT 12/19** oraz **UTPA_W-00/19 – ILC 2/19** gdzie organizator będzie przydzielał numery protokołów wg sporządzonej powyżej listy uczestników danego porównania;
- deklarację poufności;
- instrukcję porównań **RT_F_W** i/lub **UT_{man}_W** oraz **UTPA_W**
- harmonogram organizacji badania i obiegu próbki pomiędzy uczestnikami;
- poufny kod laboratorium, przydzielony losowo przez organizatora – wspólny dla obydwu badań biegłości **PT** ale inny w przypadku badań **ILC**.

Badania zostały wykonane w laboratoriach instytucji uczestniczących w porównaniach i każdorazowo przesyłanie

próbki odbywało się na koszt i odpowiedzialność kierownictwa laboratorium, które aktualnie wykonywało testy zgodnie z przygotowanym przez organizatora harmonogramem. Pierwotnie koniec badań był zaplanowany na czerwiec 2020 roku, na skutek sytuacji epidemiologicznej powstały istotne opóźnienia. Jednocześnie wiele laboratoriów nie dotrzymywało terminów, niekoniecznie z powodów obiektywnych, a także zgłaszali się nowi chętni, dopisywani do grudnia 2020 roku. Ostatecznie spowodowało to zakończenie programu w styczniu 2021.

Wyniki udokumentowane zostały w postaci sprawozdań dostarczonych do organizatora badań, których identyfikacja jest poufna i pełna treść w gestii organizatora, natomiast dane potrzebne do porównań identyfikowane są przez poufny kod laboratorium.

Wyniki porównań (z zachowaniem zasad poufności) opracował Specjalista Badań Nieniszczących, posiadający certyfikaty 3-go stopnia we wszystkich metodach badań nieniszczących – Marek Śliwowski.

5. Technika badania

Badania zostały wykonane zgodnie z zaleceniami odpowiedniej instrukcji porównań, przy czym szczegółowy wybór techniki badania pozostawiono do indywidualnego wyboru, tak aby każde laboratorium miało możliwość optymalizacji techniki do zadania badawczego.

5.1 Radiograficzna technika błonowa - PT 11/19-20/ RT_F

Do wykonania badań użyto wyposażenia będącego w zasobach poszczególnych laboratoriów, zgodnie z wymaganiami instrukcji:

- zapewnienie klasy badania co najmniej ***B*** wg ***PN-EN ISO 17636-1***;
- zakres badania – 100% długości spoiny + SWC i na szerokości, co najmniej 10 mm od linii wtopienia spoiny w całej jej objętości;
- aparaty rentgenowskie (gammagraficzne) – zidentyfikowane nazwą i nr fabrycznym oraz statusem aktualnego sprawdzania;
- zapewnienie wykrywalności wskaźnikowej na błonie w klasie co najmniej ***B*** wg ***PN-EN ISO 17636-1***;
- zapewnienie gęstości optycznej obrazu na błonie w klasie co najmniej ***B*** wg ***PN-EN ISO 17636-1***;
- zapewnienie odpowiednich warunków dla przeglądania, interpretacji, wymiarowania i oceny zgodności uzyskiwanych wyników badania radiograficznego – błonowego;

5.1.1. Klasyfikacja wskazań, poziomy rejestracji i akceptacji

Klasyfikacja wykrytych wad powinna się z wykorzystaniem następujących kroków:

- rodzaj wady wg ***PN-EN ISO 6520-1***;
- położenie: x_{pocz}, y_{pocz};
- rozmiar: l_x, l_y
- poziom akceptacji ustalony został indywidualnie przez koordynującego badanie jako ***AL1*** wg ***PN-EN ISO 10675-1*** i przy ocenie zgodności należało wyspecyfikować właściwe kryteria akceptacji;
- norma ***PN-EN ISO 17636-1*** nie precyzuje poziomu zapisu wskazań. Ustalenie poziomu rejestracji wskazań pozostawiono do indywidualnego wyboru oceniającego radiogram, z takim zastrzeżeniem, że rozmiary zidentyfikowanych wad powinny być co najmniej równe lub przekraczać wymiary graniczne poziomu ***AL1*** wg ***PN-EN ISO 10675-1***;

5.2 Ultradźwiękowa technika ręczna – PT 12/19-20/ UT_{man}

Do wykonania badań użyto wyposażenia będącego w zasobach poszczególnych laboratoriów, zgodnie z wymaganiami instrukcji:

- zapewnienie klasy badania co najmniej ***B*** wg ***PN-EN ISO 17640***;
- zakres badania – 100% długości spoiny + SWC i na szerokości, co najmniej 10 mm od linii wtopienia spoiny w całej jej objętości;
- aparaty ultradźwiękowe , cyfrowe – zidentyfikowane nazwą i nr. fabrycznym oraz statusem aktualnego badania (nie wszystkie laboratoria podają status badania aparatu);
- głowice jednoprzetwornikowe, na ogół 4 MHz, kąty 70, 60 i/lub 45;
- nastawa czułości badania DAC/TCG (DSDH=3) = 80 % FSH przy wykorzystaniu próbki odniesienia przygotowanej wg ***PN-EN ISO 16811:2014-06***;
- weryfikacja, korekcja strat przeniesienia i kontrola nastaw – próbki referencyjne zgodne z wymaganiami klasy B wg ***PN-EN ISO 17640***.

5.2.1. Klasyfikacja wskazań, poziomy rejestracji i akceptacji

Klasyfikacja wykrytych wad powinna się z wykorzystaniem następujących kroków:

- rodzaj wady: małe i duże ;
- położenie: x_{pocz}, y_{pocz}, t_{pocz};
- rozmiar: $l_x/\Delta H_u$, $l_y/\Delta H_u$;
- poziom akceptacji ustalony został indywidualnie przez koordynującego badanie jako ***AL2*** wg ***PN-EN ISO 11666*** i przy ocenie zgodności należało wyspecyfikować właściwe kryteria akceptacji;
- ustalenie poziomu rejestracji wskazań należało przyjąć jako: ***AL2*** - 4 dB;
- oceniający wyniki badań powinien dokonać wyboru sposobu wymiarowania wskazań, przez podanie poziomu wskazania echa wady ΔH_u względem krzywej DAC/TCG w dB oraz określenie ewentualnej długości l_u (jeśli obwiednia wskazuje na wadę dużą).

5.3 Ultradźwiękowa technika phased-array – ILC 2/19-20/ UT-PA

Do wykonania badań użyto wyposażenia będącego w zasobach poszczególnych laboratoriów, zgodnie z wymaganiami instrukcji:

- zapewnienie klasy badania co najmniej ***B*** wg ***PN-EN ISO 13588***;
- zakres badania – 100% długości spoiny + SWC i na szerokości, co najmniej 10 mm od linii wtopienia spoiny w całej jej objętości;
- Aparaty ultradźwiękowe phased-array firmy Olympus typu Omniscan z opcją PA i TOFD lub firmy Sonatest typu Veo z opcją PA i TOFD - zidentyfikowane nazwą i nr fabrycznym oraz statusem aktualnego badania (laboratorium CLDT nie podaje statusu badania);
- Głowice przetwornikowe PA:
  - Laboratorium Navitest zastosowało pojedynczą głowicą PA firmy Olympus - 5L16-06x10 (przetworniki f = 5 MHz; 16 elementów x (0,6x10) mm, klin o kacie nominalnym 55);
  - Laboratorium NDTEST zastosowało 2 głowice PA firmy Olympus – 5L32-A31 (przetworniki f = 5 MHz; 32 elementy x (0,6x10) mm, klin o kącie nominalnym 55) w układzie skanera umożliwiającego jednoczesne sprzężone skanowanie z obu stron spoiny ;
  - Laboratorium Control - Technic zastosowało 2 głowice PA firmy Olympus – 5L16-A10 (przetworniki f = 5 MHz; 16 elementów x (0,6x10) mm, klin o kącie nominalnym 55) w układzie skanera umożliwiającego jednoczesne sprzężone skanowanie z obu stron spoiny;
  - Laboratorium CLDT zastosowało 2 głowice PA firmy Olympus – 5L32-A31 (przetworniki f = 5 MHz; 32 elementy x (0,6x10) mm, klin o kącie nominalnym 55) w układzie skanera umożliwiającego jednoczesne sprzężone skanowanie z obu stron spoiny;
  - Laboratorium Koli zastosowało 2 głowice PA firmy Sonatest – X2-PF-5.0M16E0.0P (przetworniki f = 5 MHz; 16 elementów x (0,6x10) mm, klin o kącie nominalnym 36) w układzie skanera umożliwiającego jednoczesne sprzężone skanowanie z obu stron spoiny;
- Nastawa czułości badania – TCG (D_{SDH}=3) = 80 % FSH przy wykorzystaniu próbki wzorcowej PA wg ***ISO 19675***;
- Weryfikacja, korekcja strat przeniesienia i kontrola nastaw – próbki referencyjne zgodne z wymaganiami klasy B lub C wg P***N-EN ISO 13588***.

5.3.1. Klasyfikacja wskazań, poziomy rejestracji i akceptacji

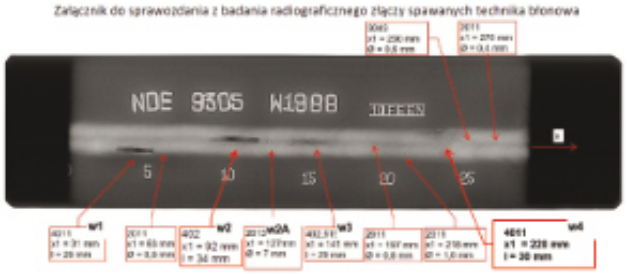
Klasyfikacja wykrytych wad powinna się z wykorzystaniem następujących kroków:

- rodzaj wady: małe i duże ;
- położenie: x_{pocz}, y_{pocz}, t_{pocz};
- rozmiar: l_x /h_x/ΔH_u, l_y / h_y/ΔH_u;
- poziom akceptacji ustalony został indywidualnie przez koordynującego badanie jako ***AL2*** wg ***PN-EN ISO 11666*** i przy ocenie zgodności należało wyspecyfikować właściwe kryteria akceptacji;
- Poziom akceptacji ustalony został indywidualnie przez koordynującego badanie jako ***AL1*** (wskazania dyfrakcyjne)/ ***AL2*** (wskazania amplitudowe) wg ***PN-EN ISO 19285*** i przy ocenie zgodności należało wyspecyfikować właściwe kryteria akceptacji;
- Ustalenie poziomu zapisu wskazań PA należało przyjąć jako ***AL2*** - 4 dB, biorąc pod uwagę ampltudę sygnału;
- Informacje uzyskiwane techniką badawczą PA są znacznie obszerniejsze w porównaniu z klasycznymi ultradźwiękami opartymi na głowicach jednoprzetwornikowych i technice cha. Chodzi tu o możliwości uzyskiwania zarówno ech odbitych jak też dyfrakcyjnych (tzw. backwall diffraction) od tych samych wad przy pomocy głowic PA. Możliwe to jest dzięki wysokiej klasie aparatury (wysoki SNR) jak też stosowanym czułościom badania.
- Zatem oceniający wyniki badań powinien dokonać wyboru sposobu wymiarowania wskazań, tak jak to sugerują normy **PN-EN ISO 13588/PN-EN ISO 19285**, albo poprzez określenie długości $\boldsymbol{l_u}$ i wysokości $\boldsymbol{h_u}$ (jeśli echa dyfrakcyjne są wyraźne i rozdzielone) lub przez określenie długości i poziomu wskazania echa wady $\boldsymbol{\Delta H_u}$ względem krzywej TCG w dB (jeśli echa dyfrakcyjne są słabe i nierozdzielone lub niewidoczne). W konsekwencji wiąże się to z wyborem odpowiedniej ścieżki wyboru kryteriów akceptacji tak jak sugeruje norma ***PN-EN ISO 19285***.

6. Porównanie i analiza wyników badania biegłości

W tym rozdziale przedstawiono porównania wyników badań złącza przedstawionych przez poszczególne laboratoria. Dla przeprowadzenia porównań wybrano cztery duże wskazania nieakceptowane oraz jedną wadę objętościową akceptowaną - typu gniazdo pęcherzy, dla których udokumentowano położenie i rozmiary charakterystyczne oraz powierzchnię strony złącza, przez którą przeprowadzono prześwietlenie.

Na Rys. 2 podano przykładowy obraz zdigitalizowanego radiogramu analogowego złącza spawanego NDE 9305 – ekspozycja wykonana od strony TOP przez jednego z uczestników badania biegłości PT 11/19-20. Wybrane do analizy wady oznaczono symbolami: **w1**, **w2**, **w3**, **w4** oraz **w2A** – dla gniazda pęcherzy



Rys. 2. Przykładowy obraz zdigitalizowanego radiogramu analogowego złącza spawanego NDE 9305 ze wskazaniem wad przyjętych do analizy – ekspozycja wykonana od strony TOP przez jednego z uczestników badania biegłości PT 11/19-20

6.1 Ocena statystyczna

Dla przeprowadzenia analizy porównań należy zastanowić się nad wyborem wartości odniesienia, które pozwolą ocenić względną odległość wyników uzyskiwanych przez poszczególne laboratoria w postaci parametru z_{score}

$$z_{score} = z_{x,\mu} = \left|\frac{x - \mu}{\sigma}\right|,$$

gdzie: x wartość wyniku pomiarowego, μ wartość odniesienia – oczekiwana (dla dostatecznie dużej próby losowej – wartość średnia standardowa), σ wartość odchylenia standardowego ocenianych wyników pomiarowych.

Jako wartość odniesienia przyjmuje się wartość średniej i odchylenie standardowego z wyników pomiarowych, pod warunkiem że rozkład jest zbliżony do normalnego, a to wiąże się z dostatecznie dużą liczbą statystyki pomiarowej. Dla każdego z ocenianych parametrów wad wytypowanych do analizy zostały przeliczone wartości średniej standardowej - μ_{STD} i wynikające z rozkładu odchylenie standardowe – σ_{STD}.

6.2 Wzorcowe dane odniesienia dla badania PT 12/19-20/ UT_{man}

Dla wyboru wartości referencyjnej (zbliżonej do rzeczywistej lokalizacji wad) opracowujący analizę PT 12/19-20 – UT_{man} miał możliwość wyboru parametrów podanych w certyfikacie wytwórcy próbki **NDE 9305**, ale jako bardziej wiarygodne wyniki lokalizacji i rozmiaru wskazań okazały się obrazy radiografii błonowej. Z punktu widzenia określenia rzeczywistej lokalizacji wskazań, wybór radiografii wydaje się bardziej racjonalny i jednocześnie pozwoli to ocenić wzajemną korelację z wynikiem średniej standardowej μ_{STD} dla 33 laboratoriów biorących udział w porównaniu.

Parametry odniesienia wad wybranych do analizy (w stosunku do radiogramu):

w1 ($X_{1,RT}$ = 31 mm; $l_{X1,RT}$ = 26 mm; $X_{śr1,RT}$ = 44 mm; $Y_{1,RT}$=+6±8 mm; $Y_{śr1,RT}$ =7 mm);

w2 ($X_{2,RT}$ = 92 mm; $l_{X2,RT}$ = 34 mm; $X_{śr2,RT}$ = 109 mm; $Y_{2,RT}$ =-1±1 mm; $Y_{śr2,RT}$ = 0 mm);

w3 ($X_{3,RT}$ = 141 mm; $l_{X3,RT}$ = 29 mm; $X_{śr3,RT}$ = 155,5 mm; $Y_{3,RT}$ =-1±1 mm; $Y_{śr3,RT}$= 0 mm);

w4 ($X_{4,RT}$ = 220 mm; $l_{X4,RT}$ = 30 mm; $X_{śr4,RT}$ = 235 mm; $Y_{4,RT}$ =-2±8 mm; $Y_{śr4,RT}$=-5 mm).

Do analizy szacowano również położenie środka wykrytych wad nieakceptowanych, ponieważ w rozkładzie statystycznym w wielu sytuacjach lepiej oddaje ono konfigurację i umiejscowienie względem niego długości wskazania.

6.3 Wzorcowe dane odniesienia dla badania PT 11/19-20/ RT_F

Dla wyboru wartości referencyjnej opracowujący analizę PT 11/19-20 – $RT_{błona}$ miał możliwość wyboru parametrów badania biegłości PT 12/19-20 – UT_{man}, przeprowadzonego równolegle techniką ultradźwiękową dla tej samej próbki **NDE 9305**. Z punktu widzenia określenia rzeczywistej lokalizacji wskazań, wybór średniej standardowej $\mu_{STD,UT}$ dla 27 laboratoriów biorących udział w porównaniu radiograficznym, wydaje się racjonalny.

Parametry odniesienia wad nieakceptowanych wybranych do analizy (wynikający z opracowania statystycznego badania biegłości PT 12/19-20 – UT_{man}):

w1 ($\mu_{X1,UT}$ = 32,82 mm; $\mu_{lX1,UT}$ = 25,96 mm; $\mu_{Xmax1,UT}$ = 58,15 mm; $\mu_{Xśr1,UT}$ = 45,75 mm;)

w2 ($\mu_{X2,UT}$ = 93,79 mm; $\mu_{lX2,UT}$ = 33,20 mm; $\mu_{Xmax2,UT}$ = 123,92 mm; $\mu_{Xśr2,UT}$ = 109,61 mm;)

w3 ($\mu_{X3,UT}$ = 142,55 mm; $\mu_{lX3,UT}$ = 28,81 mm; $\mu_{Xmax3,UT}$ = 167,00 mm; $\mu_{Xśr2,UT}$ = 154,69 mm;)

w4 ($\mu_{X4,UT}$ = 227,39 mm; $\mu_{lX4,UT}$ = 29,63 mm; $\mu_{Xmax4,UT}$ = 252,42 mm; $\mu_{Xśr4,UT}$ = 239,69 mm;).

Dla celów analizy szacowano również położenie środka wykrytych wad nieakceptowanych, ponieważ w rozkładzie statystycznym w wielu sytuacjach lepiej oddaje ono konfigurację i umiejscowienie względem niego długości wskazania.

6.4 Wzorcowe dane odniesienia dla badania ILC 2/19-20/ UT-PA

Dla wyboru wartości referencyjnej (zbliżonej do rzeczywistej lokalizacji wad) opracowujący analizę PT 12/19-20 – UT_{man} miał możliwość wyboru parametrów podanych w certyfikacie wytwórcy próbki NDE 9305, ale jako bardziej wiarygodne wyniki lokalizacji i rozmiaru wskazań okazały się obrazy radiografii błonowej. Z punktu widzenia określenia rzeczywistej lokalizacji wskazań, wybór radiografii wydaje się bardziej racjonalny i jednocześnie pozwoli to ocenić wzajemną korelację z wynikiem średniej standardowej μ_{STD} dla 33 laboratoriów biorących udział w porównaniu.

Parametry odniesienia wad wybranych do analizy (w stosunku do radiogramu):

w1 ($X_{1,RT}$ = 31 mm; $l_{X1,RT}$ = 26 mm; $X_{śr1,RT}$ = 44 mm; $Y_{1,RT}$=+6±8 mm; $Y_{śr1,RT}$ =7 mm);

w2 ($X_{2,RT}$ = 92 mm; $l_{X2,RT}$ = 34 mm; $X_{śr2,RT}$ = 109 mm; $Y_{2,RT}$ =-1±1 mm; $Y_{śr2,RT}$ = 0 mm);

w3 ($X_{3,RT}$ = 141 mm; $l_{X3,RT}$ = 29 mm; $X_{śr3,RT}$ = 155,5 mm; $Y_{3,RT}$ =-1±1 mm; $Y_{śr3,RT}$= 0 mm);

w4 ($X_{4,RT}$ = 220 mm; $l_{X4,RT}$ = 30 mm; $X_{śr4,RT}$ = 235 mm; $Y_{4,RT}$ =-2±8 mm; $Y_{śr4,RT}$=-5 mm).

Do analizy szacowano również położenie środka wykrytych wad nieakceptowanych, ponieważ w rozkładzie statystycznym w wielu sytuacjach lepiej oddaje ono konfigurację i umiejscowienie względem niego długości wskazania

6.5 Kryteria analizy – ocena względnego rozproszenia wyniku z_{score}

Analizie poddano szczegółowo wszystkie wyniki (na radiogramach RT lub skanach UT oraz UTPA) – określając rozproszenie wyników w postaci parametru zscore,μ dla każdego wskazania i każdego laboratorium.

W drugiej części tabeli porównano statystyczne wyniki zscore,μ z wynikami referencyjnymi zscore,ref dla wybranych parametrów każdego wskazania.

W oparciu o uzyskane wartości wskaźnika zscore, wyniki klasyfikowane będą poniższych kryteriów (por. Tablica 1):

$|\mathbf{z}| \leq 1$ – wynik dobry (wartości w przedziale ±{0, 1σ} – wyróżnione kolorem zielonym);

$1 < |\mathbf{z}| \leq 2$ – wynik zadowalający (wartości w przedziale ±{1σ, 2σ} – wyróżnione kolorem niebieskim);

$2 < |\mathbf{z}| < 3$ – wynik wątpliwy (wartości w przedziale ±{2σ, 3σ} – wyróżnione kolorem purpurowym);

$|\mathbf{z}| \geq 3$ – wynik niezadowalający (wartości w przedziale ±{3σ, .. } – wyróżnione kolorem czerwonym).

W analizie przedstawiono porównania parametrów wad nieakceptowanych (oznaczonych symbolami **w1**, **w2**, **w3** oraz **w4** – przewidzianych jako obligatoryjne do wykrycia).

W zestawieniach porównawczych są one identyfikowane dla każdego laboratorium w postaci kodów: lab 1 ÷ lab 35.

Pod uwagę brano lokalizację początku oraz środka a także rozmiary charakterystyczne (długość, zamiennie koniec wady) i ocenę zgodności z wymaganiami.

6.6 Wybór parametrów wskazań poddanych analizie

W obydwu programach biegłości analizowano wady nieakceptowane: **w1**, **w2**, **w3** oraz **w4** wg wskazań prezentowanych na Rys.2.

6.6.1. Parametry wskazań w badaniu radiograficznym – PT-11/19-20/RT

Z punktu widzenia kryteriów akceptacji w pierwszej kolejności należy brać pod uwagę:

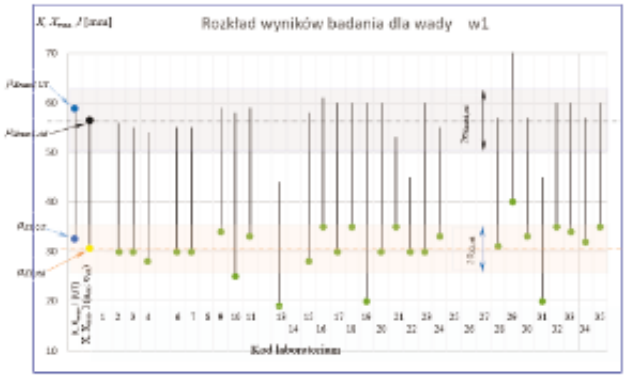
- początek wskazania w kierunku osi X; koniec wskazania w kierunku osi X_{max}; środek wskazania w kierunku osi $X_{śr}$;
- początek wskazania w kier. poprz. Y; koniec wskazania w kier. poprz. Y_{max};
- długość nieciągłości w kierunku: osi spoiny – l_x (ew. w poprzecznym – l_y);
- ocena zgodności wad wg przyjętych kryteriów akceptacji.

Tab. 1 Badanie radiograficzne - wyniki dla wskazania ***w1***

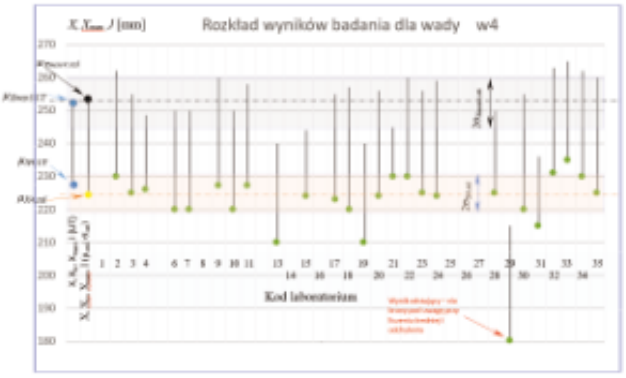
POROWNANIE WYNIKÓW BADANIA - wada w1								
Nazwa obiektu_nr wady_lab kod	Współrzędne i parametry wady							
	X [mm]	l_x [mm]	X_{max} [mm]	$X_{środka}$ [mm]	Y [mm]	A	NA	
NDE 9305_w1_lab 2	30,0	28,0	58,0	43,0	---		X	
NDE 9305_w1_lab 3	30,0	25,0	55,0	42,5	---		X	
NDE 9305_w1_lab 4	28,0	26,0	54,0	41,0	---		X	
NDE 9305_w1_lab 6	30,0	25,0	55,0	42,5	---		X	
NDE 9305_w1_lab 7	30,0	25,0	55,0	42,5	---		X	
NDE 9305_w1_lab 9	34,0	25,0	59,0	46,5	---		X	
NDE 9305_w1_lab 10	25,0	33,0	58,0	41,5	---		X	
NDE 9305_w1_lab 11	33,0	26,0	59,0	46,0	---		X	
NDE 9305_w1_lab 13	19,0	25,0	44,0	31,5	---		X	
NDE 9305_w1_lab 15	28,0	30,0	58,0	43,0	---		X	
NDE 9305_w1_lab 16	35,0	26,0	61,0	48,0	---		X	
NDE 9305_w1_lab 17	30,0	25,0	55,0	42,5	---		X	
NDE 9305_w1_lab 18	35,0	25,0	55,0	47,5	---		X	
NDE 9305_w1_lab 19	20,0	20,0	40,0	30,0	---		X	
NDE 9305_w1_lab 20	30,0	25,0	55,0	42,5	---		X	
NDE 9305_w1_lab 21	35,0	27,0	62,0	48,5	---		X	
NDE 9305_w1_lab 22	30,0	25,0	55,0	42,5	---		X	
NDE 9305_w1_lab 23	30,0	26,0	56,0	43,0	---		X	
NDE 9305_w1_lab 24	33,0	25,0	58,0	46,5	---		X	
NDE 9305_w1_lab 28	31,0	26,0	57,0	44,0	---		X	
NDE 9305_w1_lab 29	40,0	35,0	75,0	57,5	---		X	
NDE 9305_w1_lab 30	33,0	24,0	57,0	45,0	---		X	
NDE 9305_w1_lab 31	20,0	25,0	45,0	32,5	--		X	
NDE 9305_w1_lab 32	35,0	25,0	60,0	47,5	---		X	
NDE 9305_w1_lab 33	34,0	26,0	60,0	47,0	---		X	
NDE 9305_w1_lab 34	32,0	25,0	57,0	45,5	---		X	
NDE 9305_w1_lab 35	35,0	25,0	60,0	47,5	---		X	

Tab. 2 Wyniki analizy parametru z_{score} dla wskazania ***w1*** – w badaniu radiograficznym

Szacowanie parametru z_{score} - dla wybranych parametrów wady w1								
Dane odniesienia - statystyka wskazań RT (i odniesienie do statystyki wskazań UT)								
Przeciwległość – X_1 [mm]			Długość – l_x [mm]			Kierunkowość – $X_{śr4,1}$ [mm]			Środek – $X_{śr1}$ [mm]		
4,85	30,55	32,82	2,73	25,06	25,38	6,18	58,33	58,15	5,40	43,54	45,75
z_{score} - dla wybranych parametrów wady w1								
Kod	z_{X1}	$z_{X1,UT}$	z_{lx}	$z_{lx,UT}$	$z_{Xśr4,1}$	$z_{Xśr4,1,UT}$	$z_{Xśr1}$	$z_{Xśr1,UT}$
lab 2	0,11	0,58	0,01	0,23	0,05	0,32	0,10	0,51
lab 3	0,11	0,58	0,25	0,14	0,20	0,46	0,19	0,60
lab 4	0,53	0,99	0,01	0,23	0,34	0,62	0,47	0,88
lab 6	0,11	0,58	0,25	0,14	0,20	0,46	0,19	0,60
lab 7	0,11	0,58	0,25	0,14	0,20	0,46	0,19	0,60
lab 9	0,71	0,24	0,25	0,14	0,59	0,12	0,57	0,14
lab 10	1,14	1,61	2,59	2,79	0,24	0,02	0,34	0,79
lab 11	0,51	0,04	0,01	0,23	0,59	0,12	0,46	0,05
lab 13	2,38	3,09	0,25	0,14	1,61	1,78	2,23	2,94
lab 15	0,53	0,87	1,47	1,69	0,24	0,02	0,10	0,51
lab 16	0,62	0,45	0,01	0,23	0,69	0,57	0,83	0,42
lab 17	0,11	0,58	0,25	0,14	0,20	0,46	0,19	0,60
lab 18	0,62	0,45	0,25	0,14	0,20	0,46	0,73	0,32
lab 19	2,18	2,64	2,18	1,93	2,40	2,67	2,51	2,92
lab 20	0,11	0,58	0,25	0,14	0,20	0,46	0,19	0,60
lab 21	0,62	0,45	1,24	1,35	0,83	0,57	0,82	0,51
lab 22	0,11	0,58	0,25	0,14	0,20	0,46	0,19	0,60
lab 23	0,11	0,58	0,01	0,23	0,05	0,32	0,10	0,51
lab 24	0,51	0,04	0,25	0,14	0,24	0,02	0,38	0,05
lab 28	0,09	0,38	0,01	0,23	0,10	0,17	0,09	0,32
lab 29	1,55	1,48	3,31	3,52	2,74	2,47	2,58	2,18
lab 30	0,51	0,04	0,72	0,51	0,10	0,17	0,27	0,14
lab 31	2,18	2,64	0,25	0,14	1,66	1,93	2,04	2,45
lab 32	0,62	0,45	0,25	0,14	0,54	0,27	0,73	0,32
lab 33	0,71	0,24	0,01	0,23	0,54	0,27	0,64	0,23
lab 34	0,20	0,17	0,25	0,14	0,10	0,17	0,18	0,23
lab 35	0,62	0,45	0,25	0,14	0,54	0,27	0,73	0,32



Rys. 3. Rozkład wyników badania radiograficznego dla wady „*w1*" (zielone punkty – początek, czarne pionowe linie – długość wskazania), uzyskanych przez laboratoria (kody) na tle średnich statystycznych parametrów μ_{std} oraz σ_{std} dla tej wady: – początek $X_{1,std} = \mu_{x1,\,std} \pm \sigma_{x1,\,std}$; – (kolor żółty); koniec wady $X_{max1,std} = \mu_{Xmax1,\,std} \pm \sigma_{Xmax1,std}$ – (kolor czarny); oraz długość l_{x2} (pośrednio – jako różnica początku i końca wady). Naniesiono również pasy odchylenia standardowego dla początku (kolor morski) i końca wady (kolor szary). Dla porównania pokazano także parametry wady otrzymane z badania ultradźwiękowego UT (niebieskie punkty - początku i końca wady a czarna linia – długość wskazania)



Rys. 4. Rozkład wyników badania radiograficznego dla wady „w4" (zielone punkty – środek, czarne linie – długość wskazania), uzyskanych przez laboratoria (kody) na tle średnich statystycznych parametrów μ_{std} oraz σ_{std} dla tej wady: – początek $X_{4,std} = \mu_{x4,\,std} \pm \sigma_{x4,\,std}$; – (kolor żółty); koniec wady $X_{max4,std} = \mu_{Xmax4,\,std} \pm \sigma_{Xmax4,std}$ – (kolor czarny); oraz długość l_{x2} (czarna linia ciągła – jako różnica początku i końca wady). Naniesiono również pasy odchylenia standardowego dla środka (kolor seledynowy) i końca wady (kolor szary). Dla porównania pokazano także parametry wady otrzymane z badania ultradźwiękowego UT (niebieskie punkty - początku i końca wady a czarna linia – długość wskazania). Zaznaczono również wyniki odstające, które nie powinny być brane przy liczeniu parametrów statystycznych rozkładu.

6.6.1.1. Przykładowe wyniki analizy w badaniu radiograficznym – PT-11/19-20/RT$_F$

Poniżej przedstawiono analizę i interpretację graficzną rozkładu parametrów dla wady ***w1***:

- wyniki badania radiograficznego - Tablica 1
- parametru z_{score} - Tablica 2
- wykresy rozkładu wybranych przykładowo parametrów wady ***w1***:
  - X, X_{max} ,l [mm] – Rys. 3
  - porównanie z wynikami statystycznymi badania ultradźwiękowego -UT.

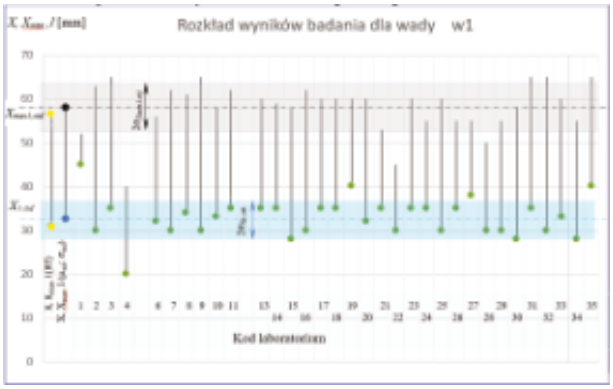
W dalszej kolejności przedstawiono analizę i interpretację rozkładu parametrów dla wady ***w4***:

- wykresy rozkładu wybranych przykładowo parametrów wady ***w4***:
  - X, X_{max} ,l [mm] – Rys. 4
  - porównanie z wynikami statystycznymi badania ultradźwiękowego -UT.

6.6.2. Parametry wskazań w badaniu ultradźwiękowym ręcznym – PT-12/19-20/UT$_{man}$

Z punktu widzenia kryteriów akceptacji w pierwszej kolejności należy brać pod uwagę:

- początek wskazania w kierunku osi X; koniec wskazania w kierunku osi X_{max}; środek wskazania w kierunku osi $X_{śr}$;
- początek wskazania w kier. poprz. Y; koniec wskazania w kier. poprz. Y_{max};
- początek wskazania w kier. głębok. T; koniec wskazania w kier. głębok. T_{max};
- długość nieciągłości w kierunku osi spoiny – l_x (ew. w poprzecznym – l_y i głębokości – l_t);
- ocena amplitudowa poziomu wskazania względem ustalonej czułości badania ΔH_u;
- ocena zgodności wad wg przyjętych kryteriów akceptacji



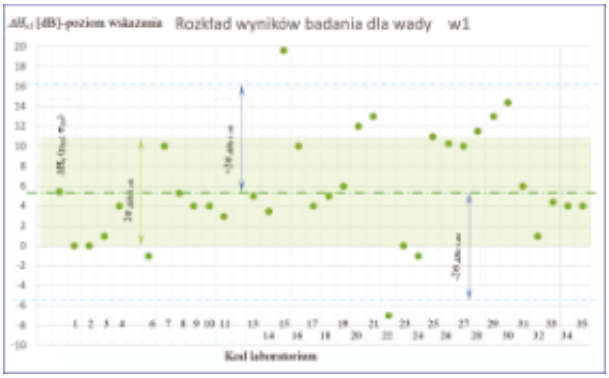
Rys. 5. Rozkład wyników badania ultradźwiękowego dla wady „w1" (zielone punkty – początek, czarne linie – długość wskazania), uzyskanych przez laboratoria (kody) na tle średnich statystycznych parametrów μ_{std} oraz σ_{std} dla tej wady: – początek $X_{1,std} = \mu_{x1,\,std} \pm \sigma_{x1,\,std}$; – (kolor niebieski); koniec wady $X_{max1,std} = \mu_{Xmax1,\,std} \pm \sigma_{Xmax1,std}$ – (kolor czarny); oraz długość l_{x2} (pośrednio – jako różnica początku i końca wady). Naniesiono również pasy odchylenia standardowego dla początku (kolor niebieski) i końca wady (kolor szary). Na rysunku pokazano także dla porównania parametry wady otrzymane z radiografii błonowej RT (żółte punkty – początku i końca wady oraz czarna linia – długość wskazania)

Tab. 3 Badanie ultradźwiękowe ręczne - wyniki dla wskazania ***w1***

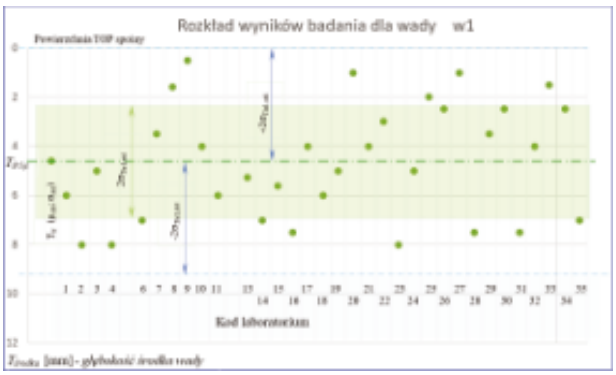
PORÓWNANIE WYNIKÓW BADANIA - wada w1 Examination results comparison										
Numer złącza_ nr wady_lab kod rodz.wady_imperfection No_lab code	Współrzędne i parametry wady Coordinates and parameters of imperfection							Zgodność z wymaganiami Acceptance		Uwagi Remarks
	X [mm]	l [mm]	Xmax [mm]	Y [mm]	h [mm]	T [mm]	ΔH [dB]	A	NA	
NDE 9305_w1 _lab 1	45,0	7	48,5	+ 3	1	6	0	X		
NDE 9305_w1 _lab 2	30,0	33,0	46,5	+ 4	—	8	+0		X	
NDE 9305_w1 _lab 3	35,0	30,0	50,0	+ 5	2	5	+ 1		X	
NDE 9305_w1 _lab 4	20,0	20,0	30,0	+ 10	—	8	+ 4		X	
NDE 9305_w1 _lab 5	32,0	24,0	44,0	+ 9	1	3 ÷ 11	- 1		X	
NDE 9305_w1 _lab 7	30,0	32,0	46,0	0	6	1 ÷ 6	+ 10		X	
NDE 9305_w1 _lab 8	34,0	27,0	47,5	+6	—	1,6	+ 5,3		X	
NDE 9305_w1 _lab 9	30,0	35	47,5	+2÷10	8	0,5	+ 4		X	
NDE 9305_w1 _lab 10	33,0	25,0	45,5	+ 5	—	1÷7	+ 4		X	
NDE 9305_w1 _lab 11	35,0	27,0	48,5	+4÷+6	2	4 ÷ 8	+ 3		X	
NDE 9305_w1 _lab 13	35,0	25,0	47,5	+ 7	2	0,5	+ 5		X	
NDE 9305_w1 _lab 14	35,0	24,0	47,0	+ 8	—	7	+ 3,4		X	
NDE 9305_w1 _lab 15	28,0	30,0	43,9	+ 9	—	5,8	+19,6		X	
NDE 9305_w1 _lab 16	30,0	32,9	45,5		3	6÷11	+10		X	
NDE 9305_w1 _lab 17	35,0	25,0	47,5	+ 5	2	4	+ 4		X	
NDE 9305_w1 _lab 18	35,0	25,0	47,5	+ 5	—	6	+ 5		X	
NDE 9305_w1 _lab 19	40,0	20,0	50	+ 5	—	2 ÷ 6	+ 6		X	
NDE 9305_w1 _lab 20	32,0	28,0	46,0	+ 8	3	1	+12		X	
NDE 9305_w1 _lab 21	35,0	18,0	44,0	+ 5	3	4	+13		X	
NDE 9305_w1 _lab 22	30,0	15,0	37,5	0	3	3	- 7	X		
NDE 9305_w1 _lab 23	35,0	25,0	47,5	+ 7	1	7 ÷ 9	+ 0		X	
NDE 9305_w1 _lab 24	35,0	20,0	45,0	+ 8	2	5	- 1		X	
NDE 9305_w1 _lab 26	30,0	30,0	45,9	+ 10	—	2	+ 11		X	
NDE 9305_w1 _lab 26	35,0	20,0	45,0	+ 5	—	2,5	+10,3		X	
NDE 9305_w1 _lab 27	38,0	17,0	46,5	+10	—	1	+11,5		X	
NDE 9305_w1 _lab 28	30,0	20,0	40,0	+ 6	3	3 ÷ 12	+ 0		X	
NDE 9305_w1 _lab 29	30,0	25,0	47,5	+ 3	3	3,5	+ 13		X	
NDE 9305_w1 _lab 30	28,0	30,0	43,9	+ 5	2	0 ÷ 5	+ 14,4		X	
NDE 9305_w1 _lab 31	35,0	30,0	50,0	+ 3	1	0 ÷ 15	+ 6		X	
NDE 9305_w1 _lab 32	30,0	35,0	47,5	+ 5	—	3 ÷ 6	+ 1		X	
NDE 9305_w1 _lab 33	33,0	27,0	46,5	+10	—	1,5	+4,4		X	
NDE 9305_w1 _lab 34	28,0	27,0	41,5	+ 4	—	2,5	+ 4		X	
NDE 9305_w1 _lab 35	40,0	25,0	52,5	+ 5 nie wg	3	7	+ 4		X	

Tab. 4 Wyniki analizy parametru zscore dla wskazania ***w1*** – w badaniu ultradźwiękowym

Szacowe wielk. parametru z_{score} - dla wybranych parametrów wady w1										
Dane odniesienia (statystyka wskazań UT)										
Początek wskazania X_P [mm]		Długość wskazania l_{UT} [mm]		Koniec wskazania X_{max} [mm]		Środek wskazania $Y_{śr}$ [mm]		Głębokość środka wad $T_{śr}$ [mm]		Poziom wskazania ΔH [dB]
σ_{X_P}	μ_{X_P}	$\sigma_{l_{UT}}$	$\mu_{l_{UT}}$	$\sigma_{X_{max}}$	$\mu_{X_{max}}$	$\sigma_{Y_{śr}}$	$\mu_{Y_{śr}}$	$\sigma_{T_{śr}}$	$\mu_{T_{śr}}$	$\sigma_{\Delta H}$	$\mu_{\Delta H}$
4,38	32,82	5,93	25,38	5,68	58,15	2,38	6,41	2,29	+4,88	5,48	5,45
z_{score} - dla wybranych parametrów wady w1										
Kod	z_{X_P}	$z_{l_{UT}}$		$z_{X_{max}}$		$z_{Y_{śr}}$		$z_{T_{śr}}$		$z_{\Delta H}$
lab 1	2,79	3,10		1,10		1,20		0,61		0,99
lab 2	0,64	1,28		0,87		1,00		1,40		0,99
lab 3	0,50	0,78		1,23		0,10		0,18		0,01
lab 4	2,94	0,91		3,25		1,57		1,48		0,26
lab 6	0,19	0,23		0,39		1,35		1,05		1,18
lab 7	0,64	1,12		0,68		1,50		0,48		0,83
lab 8	0,27	0,27		0,51		0,10		1,32		0,03
lab 9	0,64	1,62		1,23		0,15		1,80		0,26
lab 10	0,04	0,08		0,03		0,62		0,48		0,26
lab 11	0,50	0,27		0,68		0,62		0,61		0,45
lab 13	0,50	0,06		0,33		0,70		0,29		0,08
lab 14	0,50	0,29		0,15		0,70		1,05		0,37
lab 15	1,10	0,68		0,03		1,14		0,44		2,58
lab 16	0,65	0,05		0,68		0,04		1,27		0,83
lab 17	0,50	0,06		0,33		0,10		0,26		0,26
lab 18	0,50	0,06		0,33		0,62		0,61		0,08
lab 19	1,64	0,01		0,33		0,62		0,26		0,10
lab 20	0,19	0,56		0,33		1,35		1,58		1,19
lab 21	0,50	1,24		0,82		0,04		0,26		1,38
lab 22	0,65	1,75		2,36		2,15		0,70		2,27
lab 23	0,50	0,06		0,33		0,40		1,49		0,99
lab 24	0,50	0,01		0,56		1,14		0,18		1,18
lab 25	0,65	0,78		0,33		1,57		1,14		1,01
lab 26	0,50	0,91		0,56		0,62		0,99		0,08
lab 27	1,10	1,41		0,56		1,57		1,58		1,19
lab 28	0,65	0,91		1,40		0,48		1,27		0,99
lab 29	0,65	0,06		0,56		0,84		0,04		1,38
lab 30	1,11	0,78		0,03		0,18		0,92		1,03
lab 31	0,50	0,78		1,23		1,27		1,37		0,10
lab 32	0,65	1,62		1,23		0,62		0,26		0,01
lab 33	0,04	0,27		0,33		1,57		1,35		0,19
lab 34	1,11	0,27		0,56		1,00		0,92		0,26
lab 35	0,50	0,06		1,23		0,04		1,05		0,26



Rys. 6. Rozkład wyników badania ultradźwiękowego dla wady „w1" (zielone punkty), uzyskanych przez laboratoria na tle średnich statystycznych parametrów μ_{std} oraz σ_{std} dla tej wady: poziom wskazania wady – $\Delta H_{u1}=\mu_{\Delta Hu1,\,std}\pm\sigma_{\Delta Hu\,1,std}$ w [dB] - (linia przerywana – kolor zielony). Naniesiono również pasy odchylenia standardowego (kolor jasnozielony). Liniami niebieskimi (przerywanymi) podano także położenia dla podwójnego odchylenia standardowego $\Delta H_{u\,\mu}=\mu_{\,\Delta Hu1,\,std}\pm 2\sigma_{\Delta Hu\,1,std}$ w [mm]



Rys. 7. Rozkład wyników badania ultradźwiękowego dla wady „w1" (zielone punkty), uzyskanych przez laboratoria na tle średnich statystycznych parametrów μ_{std} oraz σ_{std} dla tej wady: głębokość środka wady względem powierzchni TOP spoiny – $T_{śr1}=\mu_{Tśr1,\,std}\pm\sigma_{Tśr1,std}$ w [mm] – (linia przerywana – kolor zielony). Naniesiono również pasy odchylenia standardowego (kolor jasnozielony). Liniami niebieskimi (przerywanymi) podano także położenia dla podwójnego odchylenia standardowego $T_{śr1\mu}=\mu_{Tśr1,\,std}\pm 2\,\sigma_{Tśr1,std}$ w [mm].

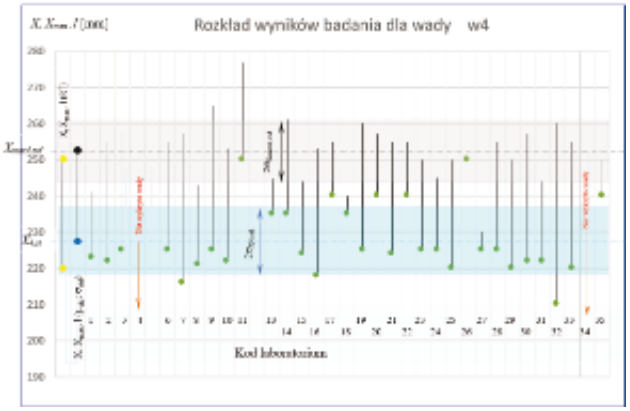
6.6.2.1. Przykładowe wyniki analizy w badaniu ultradźwiękowym – PT-12/19-20/UT$_{man}$

Na kolejnych stronach przedstawiono analizę i interpretację graficzną rozkładu parametrów dla wady w1:

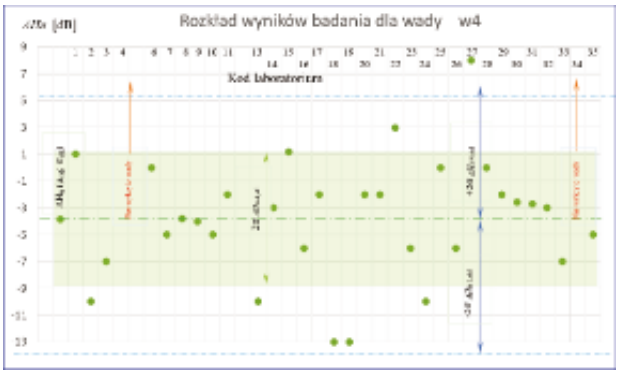
- wyniki badania ultradźwiękowego - Tablica 3
- parametru z_{score} – Tablica 4
- wykresy rozkładu wybranych przykładowo parametrów wady w1:
  - X, X_{max} ,l [mm] – Rys. 5
  - ΔH_{u1} [dB] – Rys 6
  - $T_{środka}$ [mm] – Rys. 7
  - porównanie z wynikami badania radiograficznego – RT.

W dalszej kolejności przedstawiono analizę i interpretację graficzną rozkładu parametrów dla wady w4:

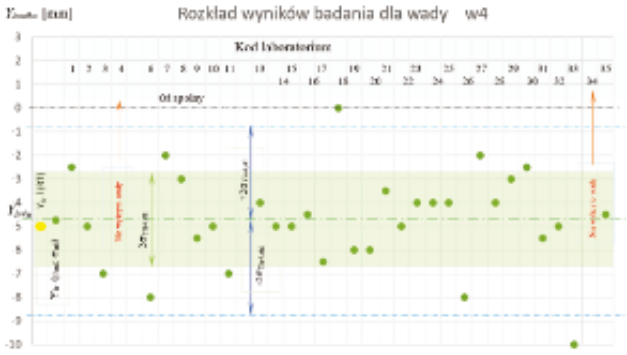
- wykresy rozkładu wybranych parametrów wady w4:
  - X, X_{max} ,l [mm] – Rys. 8
  - ΔH_{u1} [dB] – Rys 9
  - $Y_{środka}$ [mm] – Rys. 10;
  - porównanie z wynikami badania radiograficznego - RT.



Rys. 8. Rozkład wyników badania ultradźwiękowego dla wady „w4" (zielone punkty – początek, czarna linie – długość wskazania), uzyskanych przez laboratoria (kody) na tle średnich statystycznych parametrówμ_{std} oraz σ_{std} dla tej wady: - początek $X_{4,std} = \mu_{x4,\ std} \pm \sigma_{x4,\ std}$; – (kolor niebieski); koniec wady $X_{max4,std} = \mu_{Xmax4,\ std} \pm \sigma_{Xmax4,std}$ oraz długość l_{x4} (pośrednio – jako różnica początku i końca wady). Naniesiono również pasy odchylenia standardowego dla początku (kolor niebieski) i końca wady (kolor szary). Na rysunku pokazano dla porównania parametry wady otrzymane z radiografii błonowej RT (żółte punkty – początku i końca wady oraz czarna linia – długość wskazania)



Rys. 9. Rozkład wyników badania ultradźwiękowego dla wady „w4" (zielone punkty), uzyskanych przez laboratoria na tle średnich statystycznych parametrów μ_{std} oraz σ_{std} dla tej wady: poziom wskazania wady – $\Delta H_{u4\mu} = \mu_{\ \Delta Hu4,\ std} \pm \sigma_{\Delta Hu\ 4,std}$ w [dB] – (linia przerywana – kolor zielony). Naniesiono również pasy odchylenia standardowego (kolor jasnozielony) Liniami niebieskimi (przerywanymi) podano także położenia dla podwójnego odchylenia standardowego $\Delta H_{u4\mu} = \mu_{\ \Delta Hu4,\ std} \pm 2\ \sigma_{\Delta Hu\ 4,std}$ w [mm].



Rys. 10. Rozkład wyników badania ultradźwiękowego dla wady „w4" (zielone punkty), uzyskanych przez laboratoria na tle średnich statystycznych parametrów μ_{std} oraz σ_{std} dla tej wady: środek wady poprzecznie do osi spoiny – $Y_{śr4\mu} = \mu_{Yśr4,\ std} \pm \sigma_{Yśr4,std}$ w [mm] – (linia przerywana - kolor zielony). Naniesiono również pasy odchylenia standardowego (kolor jasnozielony). Liniami niebieskimi (przerywanymi) podano również położenia dla podwójnego odchylenia standardowego $Y_{śr4\mu} = \mu_{Yśr4,\ std} \pm 2\ \sigma_{Yśr4,std}$ w [mm].Na rysunku pokazano także dla porównania parametry wady otrzymane z radiografii błonowej RT (żółty punkt).

6.6.3. Parametry wskazań w badaniu ultradźwiękowym phased -array – ILC 2/19-20/UT-PA

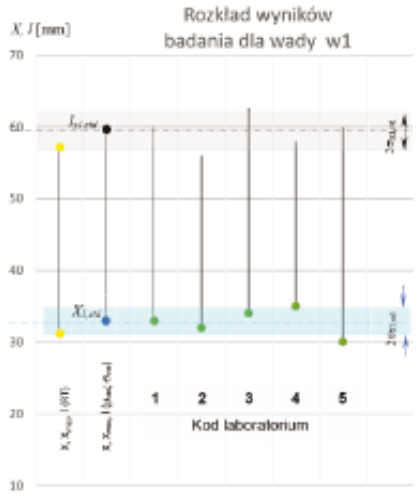
Z punktu widzenia kryteriów akceptacji w pierwszej kolejności należy brać pod uwagę:

- początek wady – X;
- długość (koniec) wady – l_x, (X_{max});
- poziom wskazania względem krzywej DAC/TCG – ΔHu [dB];
- wysokość wskazania w kierunku głębokości – h_t [mm];
- ocena zgodności wad wg wyspecyfikowanych kryteriów akceptacji;
- wartość środka wskazania w kierunku poprzecznym względem osi spoiny – $Y_{śr}$
- wartość środka wskazania w kierunku głębokości spoiny – $T_{śr}$.

6.6.3.1. Przykładowe wyniki analizy w badaniu ultradźwiękowym – ILC 2/19-20/UT-PA

Na kolejnych stronach przedstawiono analizę i interpretację graficzną rozkładu parametrów dla wady w1:

- wyniki badania ultradźwiękowego PA oraz obliczeń parametru z_{score} – Tablica 5
- wykresy rozkładu wybranych przykładowo parametrów wady w1:
  - X, X_{max} ,l [mm] – Rys. 11
  - $Y_{środka}$ [mm] – Rys. 12
  - ΔH_{u1} [dB] – Rys 13
  - $T_{środka}$ [mm] – Rys. 14
  - h_{t1} [mm] – Rys. 15
  - porównanie z wynikami badania radiograficznego – RT.



Rys. 11. Rozkład wyników badania UTPA dla wady „w1" (zielone punkty – początek, czarne linie – długość wskazania), uzyskanych przez laboratoria (kody) na tle średnich statystycznych parametrów μ_{std} oraz σ_{std} dla tej wady: – początek $X_{1,std} = \mu_{x1,std} \pm \sigma_{x1,std}$ – (kolor niebieski) oraz długość l_{x1} – (kolor czarny). Naniesiono również pasy odchylenia standardowego dla początku (kolor niebieski) i długości wady (kolor szary). Na rysunku pokazano także dla porównania parametry wady otrzymane z radiografii błonowej RT (żółte punkty – początku i końca wady oraz czarna linia – długość wskazania)

Tab. 5 Badanie ultradźwiękowe PA – wyniki dla wskazania ***w1*** i analiza parametru z_{score}

POROWNANIE WYNIKÓW BADANIA - wada w1

Numer złącza, strona spoiny / nr wady_lab kod	Techniczne warunki badania	Współrzędne i parametry wady							Zgodność z wymaganiami A-akceptl NA-nieakceptl		Uwagi
		X_1 [mm]	l_{x1} [mm]	X_{x2} [mm]	$Y_{ś1}$ [mm]	$T_{ś1}$ [mm]	ΔH_{u1} [dB]	h_{z1} [mm]	A	NA	
NDE 9305_TOP w1 PA(A1) lab 1	1	31,4	26,8	45,8	+6	0÷6÷3,0	+3	8		X	
NDE 9305_TOP w1 PA(B) * lab 1	1	34,5	25,5	47,25	+7,5	0÷7,5÷3,75	-1	7		X	
NDE 9305_TOP w1 PA(A) lab 2	2	32,0	24	44,0	6÷0÷+7,5	1÷0÷+4,0	+0	7		X	
NDE 9305_BOTTOM w1 PA(A) lab 3	3	34,0	26,7	48,35	3÷12÷+7,5	1÷9÷+6,5	+6	8,9		X	
NDE 9305_BOTTOM w1 PA(A) lab 4	4	35	23	46,5	2,5÷6÷+6,25	1÷8÷+4,0	-2	6,5		X	
NDE 9305_TOP w1 PA(A1/B) lab 5	5	30	30	45	+10	5,25	+10	10,5		X	

*) W opisie skanu przez PA(A1/PA(B) – oznaczono położenie głowicy od strony A lub B złącza – odpowiednio

Szeregowanie parametru z_{score} - dla wybranych parametrów wady w1

Dane odniesienia (statystyka wskazań UT_{PA})

Początek wskazania X_1 [mm]		Długość wskazania l_{x1} [mm]		Średnie wskazania $Y_{ś1}$ [mm]		Głębokość środka wsk. $T_{ś1}$ [mm]		Wysokość wskazania h_{z1} [mm]		Poziom wskazania ΔH_{u1} [dB]	
$\sigma_{x1,std}$	$\mu_{x1,std}$	$\sigma_{lx1,std}$	$\mu_{lx1,std}$	$\sigma_{Yś1,std}$	$\mu_{Yś1,std}$	$\sigma_{Tś1,std}$	$\mu_{Tś1,std}$	$\sigma_{hz1,std}$	$\mu_{hz1,std}$	$\sigma_{\Delta Hu1,std}$	$\mu_{\Delta Hu1,std}$
1,81	32,82	2,64	26,67	2,99	+6,0	0,68	+4,06	1,37	+7,88	4,55	+5,0

z_{score} - dla wybranych parametrów wady w1

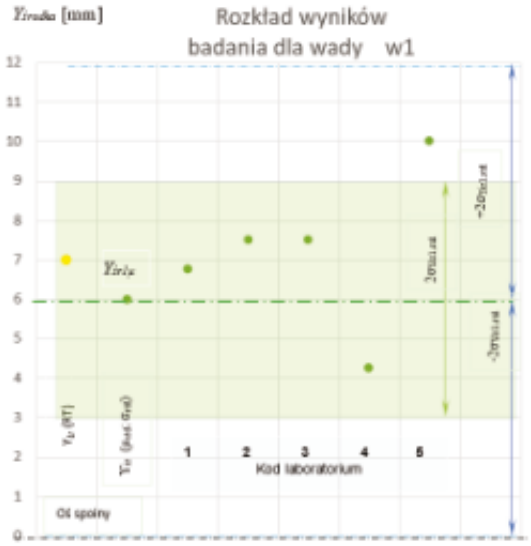
Kod	z_{X1}	z_{lx1}	$z_{Yś1}$	$z_{Tś1}$	z_{hz1}	$z_{\Delta Hu1}$
lab 1	0,55	0,18	0,25	1,04	0,33	0,22
lab 2	0,45	1,01	0,50	0,12	0,71	0,66
lab 3	0,65	0,77	0,50	0,82	0,67	1,10
lab 4	1,21	1,39	0,75	0,12	1,08	1,10
lab 5	1,56	1,26	1,34	1,71	1,84	1,54

Dane odniesienia (statystyka wskazań UT_{PA} i/lub radiografii RT)

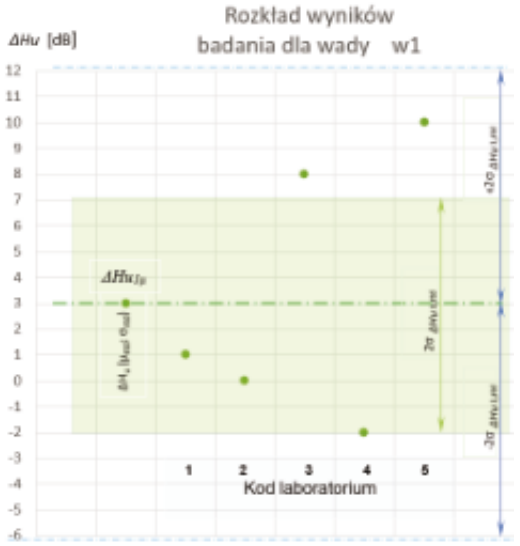
Początek wskazania – X_1 [mm]			Długość wskazania – l_{x1} [mm]			Średnie wskazania – $X_{śr}$ [mm]			Średnie wskazania – $Y_{śr}$ [mm]		
$\sigma_{x1,std}$	$\mu_{x1,std}$	$X_{1,RT}$	$\sigma_{lx1,std}$	$\mu_{lx1,std}$	$l_{x1,RT}$	$\sigma_{Xśr,std}$	$\mu_{Xśr,std}$	$X_{śr,RT}$	$\sigma_{Yśr,std}$	$\mu_{Yśr,std}$	$Y_{śr,RT}$
1,81	32,82	31	2,64	26,67	26	1,43	46,15	44,0	2,99	+6,0	+7,0

z_{score} - dla wybranych parametrów wady w1

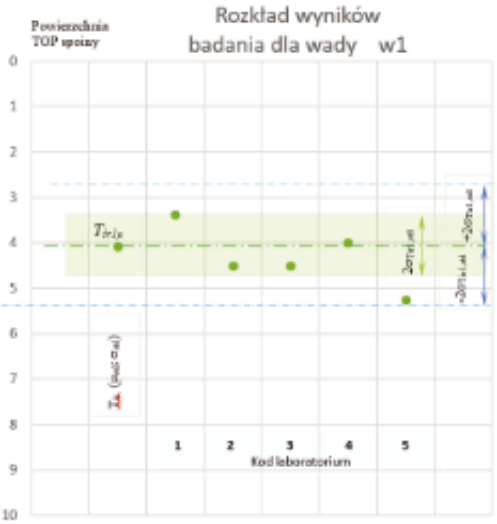
Kod	$z_{X1,RT}$	$z_{lx1,RT}$	z_{X1}	z_{lx1}	$z_{Xśr,RT}$	$z_{Xśr}$	$z_{Yśr,RT}$	$z_{Yśr}$
lab 1	0,55	1,02	0,18	0,44	0,27	0,54	0,25	0,08
lab 2	0,45	0,55	1,01	0,76	1,50	0,0	0,50	0,17
lab 3	0,65	1,06	0,77	1,02	1,54	3,04	0,50	0,17
lab 4	1,21	2,21	1,39	1,14	0,24	1,75	0,75	0,92
lab 5	1,56	0,55	1,26	1,51	0,80	0,70	1,34	1,00



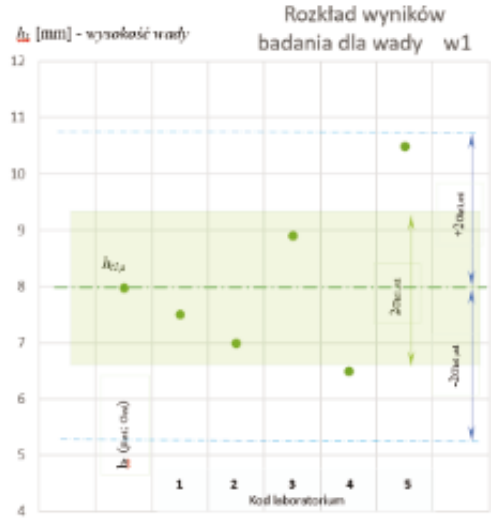
Rys. 12. Rozkład wyników badania ultradźwiękowego UTPA dla wady „w1" (zielone punkty), uzyskanych przez laboratoria na tle średnich statystycznych parametrów μ_{std} oraz σ_{std} dla tej wady: - środek wady poprzecznie do osi spoiny – $Y_{śr1\mu} = \mu_{Yśr1,std} \pm \sigma_{Yśr1,std}$ w [mm] – (linia przerywana – kolor zielony). Naniesiono również pasy odchylenia standardowego (kolor jasnozielony). Liniami niebieskimi (przerywanymi) podano również położenia dla podwójnego odchylenia standardowego $Y_{śr1\mu} = \mu_{Yśr1,std} \pm 2\sigma_{Yśr1,std}$ w [mm]. Na rysunku pokazano także dla porównania parametry wady otrzymane z radiografii błonowej RT (żółty punkt).



Rys. 13. Rozkład wyników badania ultradźwiękowego UTPA dla wady „w1" (zielone punkty), uzyskanych przez laboratoria na tle średnich statystycznych parametrów μ_{std} oraz σ_{std} dla tej wady: poziom wskazania wady - $\Delta H_{u1} = \mu_{\Delta Hu1,std} \pm \sigma_{\Delta Hu\ 1,std}$ w [dB] - (linia przerywana - kolor zielony). Naniesiono również pasy odchylenia standardowego (kolor jasnozielony). Liniami niebieskimi (przerywanymi) podano także położenia dla podwójnego odchylenia standardowego $\Delta H_{u1\mu} = \mu_{\Delta Hu1,std} \pm 2\sigma_{\Delta Hu1,std}$ w [mm]



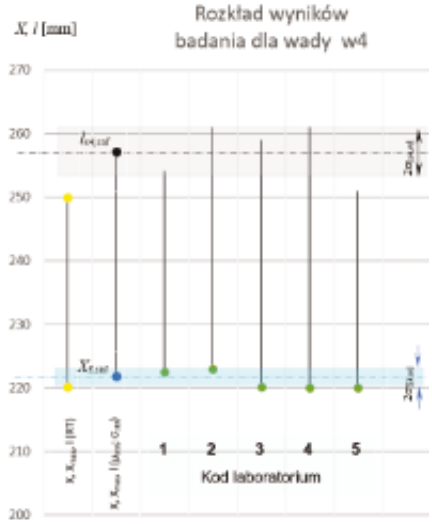
Rys. 14. Rozkład wyników badania ultradźwiękowego UT_{PA} dla wady „w1" (zielone punkty), uzyskanych przez laboratoria na tle średnich statystycznych parametrów μ_{std} oraz σ_{std} dla tej wady: głębokość środka wady względem powierzchni TOP spoiny – $T_{śr1} = \mu_{Tśr1,\,std} \pm \sigma_{Tśr1,std}$ w [mm] – (linia przerywana – kolor zielony). Naniesiono również pasy odchylenia standardowego (kolor jasnozielony). Liniami niebieskimi (przerywanymi) podano także położenia dla podwójnego odchylenia standardowego $T_{śr1\mu} = \mu_{Tśr1,\,std} \pm 2\sigma_{Tśr1,std}$ w [mm]



Rys. 15. Rozkład wyników badania ultradźwiękowego UTPA dla wady „w1" (zielone punkty), uzyskanych przez laboratoria na tle średnich statystycznych parametrów μ_{std} oraz σ_{std} dla tej wady: wysokość wady – $h_{t1} = \mu_{ht1,\,std} \pm \sigma_{ht1,std}$ w [mm] – (linia przerywana – kolor zielony). Naniesiono również pasy odchylenia standardowego (kolor jasnozielony). Liniami niebieskimi (przerywanymi) podano także położenia dla podwójnego odchylenia standardowego $T_{ht1\mu} = \mu_{ht1,std} \pm 2\sigma_{ht1,std}$ w [mm]

Na kolejnych stronach przedstawiono analizę i interpretację graficzną rozkładu parametrów dla wady w4:

- wyniki badania ultradźwiękowego PA oraz obliczeń parametru z_{score} – Tablica 6
- wykresy rozkładu wybranych przykładowo parametrów wady w4:
  - X, X_{max}, l [mm] – Rys. 16
  - $Y_{środka}$ [mm] – Rys. 17
  - ΔH_{u1} [dB] – Rys 18
  - $T_{środka}$ [mm] – Rys. 19
  - h_{t1} [mm] – Rys. 20
  - porównanie z wynikami badania radiograficznego – RT.



Rys. 16. Rozkład wyników badania UTPA „w4" (zielone punkty – początek, czarne linie – długość wskazania), uzyskanych przez laboratoria (kody) na tle średnich statystycznych parametrów μ_{std} oraz σ_{std} dla tej wady: – początek $X_{4,std} = \mu_{x4,std} \pm \sigma_{x4,std}$ – (kolor niebieski) oraz długość l_{x3} – (kolor czarny). Naniesiono również pasy odchylenia standardowego dla początku (kolor niebieski) i długości wady (kolor szary). Na rysunku pokazano także dla porównania parametry wady otrzymane z radiografii błonowej RT (żółte punkty – początku i końca wady oraz czarna linia – długość wskazania)

Tab. 6 Badanie ultradźwiękowe PA- wyniki dla wskazania w4 i analiza parametru z_{score}

PORÓWNANIE WYNIKÓW BADANIA - wada w4 (z_{score})
Examination results comparison

Numer złącza, strona spoiny / nr wady_lab kod	Technicznie warunki badania	Współrzędne i parametry wady							Zgodność z wymaganiami A - akceptacja NA - nie akceptacja		Uwagi
		X_w [mm]	l_w [mm]	X_{kl} [mm]	$Y_{śr}$ [mm]	$T_{śr}$ [mm]	$\Delta H_{śr}$ [dB]	h_w [mm]	A	NA	
NDE 9305_TOP w3_PA(A)_lab 1	1	222.7	31.6	238.5	-8.5	15 ÷24 =19.5	-6	8.0		X	
NDE 9305_TOP w3_PA(B)_lab 1	1	222.3	31.6	238.1	-8.0	16 ÷24 =20.0	0	8.0		X	
NDE 9305_TOP w3_PA(A)_lab 2	2	223	38	242.0	-6÷-0 =-3.0	17 ÷25 =21.0	-9	8.0		X	
NDE 9305_TOP w3_PA(B)_lab 2	2	223	38	242.0	-6÷-0 =-3.0	17÷25 =21.0	-9	8.0		X	
NDE 9305_BOTTOM w3_PA(A)_lab 3	3	220.1	38.9	239.5	-6÷-5.5 =-5.25	17.5÷23 = 20.0	-3.3	5.5		X	
NDE 9305_BOTTOM w3_PA(A)_lab 4	4	220	41	240.5	-6÷-12 = -9	18.5÷24. 5= 21.5	-2	6		X	
NDE 9305_TOP w3_PA(A i B)_lab 5	5	220	31	235.5	-4	17.5÷25 =20.25	+0	7.5		X	

Szacowanie parametru z_{score} - dla wybranych parametrów wady w4

Dane odniesienia (statystyka wskazań UT$_{PA}$)

Początek wskazania X_{kl} [mm]		Długość wskazania l_{wl} [mm]		Środek wskazania $Y_{śrl}$ [mm]		Głębokość środka wsk. $T_{śrl}$ [mm]		Wysokość wskazania h_{wl} [mm]		Poziom wskazania ΔH_{wl} [dB]	
$\sigma_{Xkl,std}$	$\mu_{Xkl,std}$	$\sigma_{lwl,std}$	$\mu_{lwl,std}$	$\sigma_{Yśrl,std}$	$\mu_{Yśrl,std}$	$\sigma_{Tśrl,std}$	$\mu_{Tśrl,std}$	$\sigma_{hwl,std}$	$\mu_{hwl,std}$	$\sigma_{\Delta Hwl,std}$	$\mu_{\Delta Hwl,std}$
1,37	221,86	3,87	35,73	2,59	-5,96	1,37	21,04	0,99	7,29	3,59	-4,19

z_{score} - dla wybranych parametrów wady w1

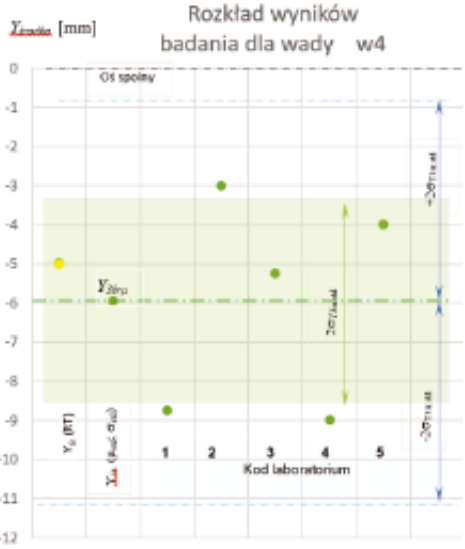
Kod	z_{Xkl}	z_{lwl}	$z_{Yśrl}$	$z_{Tśrl}$	z_{hwl}	$z_{\Delta Hwl}$
lab 1	0,68	1,07	1,08	0,94	0,72	0,33
lab 2	0,64	0,59	1,14	0,29	0,72	1,33
lab 3	1,13	0,82	0,27	0,76	1,81	0,25
lab 4	1,14	1,35	1,17	0,32	1,30	0,61
lab 5	1,14	1,22	0,76	0,58	0,31	1,17

Dane odniesienia (statystyka wskazań UT$_{PA}$ i/lub radiografii RT)

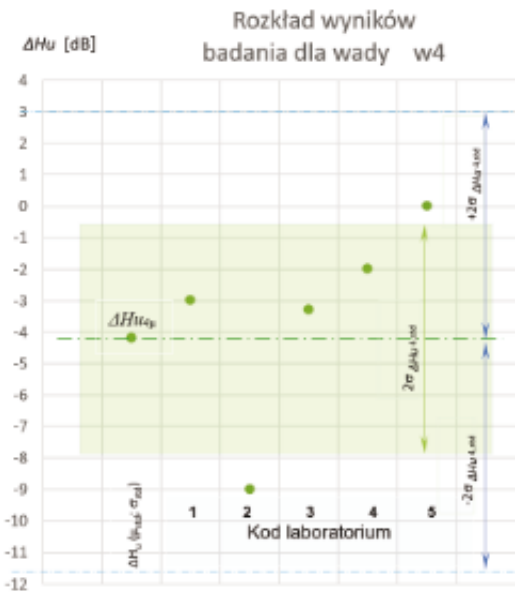
Początek wskazania – X_{kl} [mm]			Długość wskazania – l_{wl} [mm]			Środek wskazania – $X_{śrl}$ [mm]			Środek wskazania – $Y_{śrl}$ [mm]		
$\sigma_{Xkl,std}$	$\mu_{Xkl,w}$	$X_{kl,RT}$	$\sigma_{lwl,std}$	$\mu_{lwl,w}$	$l_{wl,RT}$	$\sigma_{Xśrl,std}$	$\mu_{Xśrl,std}$	$X_{śrl,RT}$	$\sigma_{Yśrl,std}$	$\mu_{Yśrl,std}$	$Y_{śrl,RT}$
1,37	221,86	220	3,87	35,73	30,0	2,15	239,44	235,0	2,59	-5,96	-5,0

z_{score} - dla wybranych parametrów wady w4

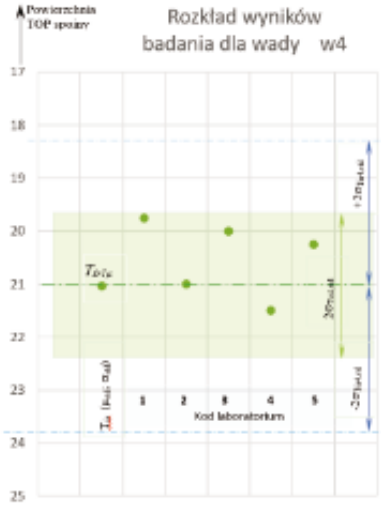
Kod	z_{Xkl}	$z_{Xkl,RT}$	z_{lwl}	$z_{lwl,RT}$	$z_{Xśrl}$	$z_{Xśrl,RT}$	$z_{Yśrl}$	$z_{Yśrl,RT}$
lab 1	0,68	1,13	1,07	0,41	0,44	1,27	1,08	1,45
lab 2	1,05	2,19	0,59	2,06	0,99	2,70	1,14	0,77
lab 3	1,13	0,97	0,82	2,30	0,02	1,74	0,27	0,44
lab 4	1,14	0,00	1,35	2,84	0,37	2,12	1,17	0,10
lab 5	1,14	0,00	1,22	0,26	1,52	0,19	0,76	0,39



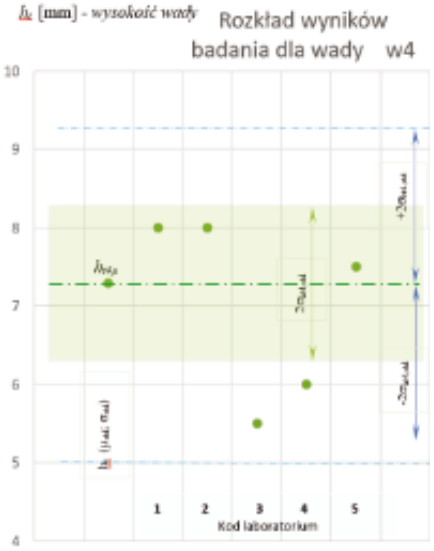
Rys. 17. Rozkład wyników badania ultradźwiękowego UTPA dla wady „w4" (zielone punkty), uzyskanych przez laboratoria na tle średnich statystycznych parametrów μ_{std} oraz σ_{std} dla tej wady: – środek wady poprzecznie do osi spoiny – $Y_{śr4\mu} = \mu_{Yśr4,\ std} \pm \sigma_{Yśr4,std}$ w [mm] – (linia przerywana – kolor zielony). Naniesiono również pasy odchylenia standardowego (kolor jasnozielony). Liniami niebieskimi (przerywanymi) podano również położenia dla podwójnego odchylenia standardowego $Y_{śr4\mu} = \mu_{Yśr4,\ std} \pm 2\sigma_{Yśr4,std}$ w [mm]. Na rysunku pokazano także dla porównania parametry wady otrzymane z radiografii błonowej RT (żółty punkt)



Rys. 18. Rozkład wyników badania ultradźwiękowego UTPA dla wady „w4" (zielone punkty), uzyskanych przez laboratoria na tle średnich statystycznych parametrów μ_{std} oraz σ_{std} dla tej wady: poziom wskazania wady - $\Delta H_{u1} = \mu_{\Delta Hu4,\ std} \pm \sigma_{\Delta Hu4,std}$ w [dB] - (linia przerywana - kolor zielony). Naniesiono również pasy odchylenia standardowego (kolor jasnozielony). Liniami niebieskimi (przerywanymi) podano także położenia dla podwójnego odchylenia standardowego $\Delta H_{u4\mu} = \mu_{\Delta Hu4,\ std} \pm 2\sigma_{\Delta Hu4,std}$ w [dB]



Rys. 19 Rozkład wyników badania ultradźwiękowego UTPA dla wady „w4" (zielone punkty), uzyskanych przez laboratoria na tle średnich statystycznych parametrów μ_{std} oraz σ_{std} dla tej wady: głębokość środka wady względem powierzchni TOP spoiny – $T_{śr4} = \mu_{Tśr4,\ std} \pm T_{śr4,std}$ w [mm] – (linia przerywana – kolor zielony). Naniesiono również pasy odchylenia standardowego (kolor jasnozielony). Liniami niebieskimi (przerywanymi) podano także położenia dla podwójnego odchylenia standardowego $T_{śr4\mu} = \mu_{Tśr4,std} \pm 2\sigma_{Tśr4,std}$ w [mm]



Rys. 20 Rozkład wyników badania ultradźwiękowego UTPA dla wady „w4" (zielone punkty), uzyskanych przez laboratoria na tle średnich statystycznych parametrów μ_{std} oraz σ_{std} dla tej wady: wysokość wady – $h_{t4} = \mu_{ht4,std} \pm \sigma_{ht4,std}$ w [mm] – (linia przerywana – kolor zielony). Naniesiono również pasy odchylenia standardowego (kolor jasnozielony). Liniami niebieskimi (przerywanymi) podano także położenia dla podwójnego odchylenia standardowego
$T_{ht4\mu} = \mu_{ht4,std} \pm 2\sigma_{ht4,std}$ w [mm]

7. Analiza końcowa – podsumowanie badań biegłości

7.1 Radiograficzna technika błonowa PT 11/19-20 – RTF

Analiza wybranych wyników badań będzie polegała na stwierdzeniu, czy:

- wszystkie obligatoryjne wady złącza zostały wykryte i sklasyfikowane:
  - wada **w1** wszystkie 27 laboratoriów wykryło tę niedoskonałość;
  - wada **w2** 26 laboratoriów wykryło tę niedoskonałość, 1 laboratorium (lab 29) nie wykryło wady;
  - wada **w3** wszystkie 27 laboratoriów wykryło tę niedoskonałość;
  - wada **w4** wszystkie 27 laboratoriów wykryło tę niedoskonałość;
- wada akceptowana wady złącza - nieobligatoryjna została wykryta i sklasyfikowana:
- wada w2A 26 laboratoriów wykryło tę niedoskonałość, 1 laboratorium (lab 15) nie zapisywało tej wady;
- dla wszystkich wykrytych wskazań wykonano lokalizację i wymiarowanie wad oraz podano poziom tych wyników na tle średniej statystycznej – jako parametr $z_{score} = z_{x\mu}$

1) wada **w1**
- 23 laboratoria osiągnęły wynik zadowalający dla położenia X oraz rozmiaru l_x ($z_{x\mu} \leq 2$);
- 4 laboratoria (lab 13, lab 19, lab 29, lab 31) osiągnęły wynik wątpliwy dla położenia X oraz rozmiaru l_x ($2 < z_{x\mu} \leq 3$);
- wybrane wyniki porównań można prześledzić w Tablicy 1, 2 oraz na wykresach – Rys.3;
- dla porównania oceny statystycznej na Rys.3 podano parametry położenia i rozmiarów wady, wynikające z oceny statystycznej badania biegłości UT;
- szczegółowe wyniki porównań można prześledzić w opracowaniu [1]

2) wada **w2**:
- 22 laboratoria osiągnęły wynik zadowalający dla położenia X oraz rozmiaru l_x ($z_{x\mu} \leq 2$);
- 2 laboratoria (lab 13, lab 31) osiągnęły wynik wątpliwy dla położenia X oraz rozmiaru l_x ($2 < z_{x\mu} \leq 3$);
- 3 laboratoria osiągnęły wynik niezadawalający ($z_{x\mu} > 3$) dla położenia X, oraz rozmiarów wady - (lab 15, lab 19) natomiast lab 29 nie wykryło wskazania;
- szczegółowe wyniki porównań można prześledzić w opracowaniu [1].

3) wada **w3**:
- 24 laboratoria osiągnęły wynik zadowalający dla położenia X oraz rozmiaru l_x ($z_{x\mu} \leq 2$);
- 3 laboratoria (lab 3, lab 13, lab 19) osiągnęły wynik wątpliwy dla położenia X oraz rozmiaru l_x ($2 < z_{x\mu} \leq 3$);
- szczegółowe wyniki porównań można prześledzić w opracowaniu [1].

4) wada **w4**:
- 21 laboratoriów osiągnęło wynik zadowalający dla położenia X oraz rozmiaru l_x ($z_{x\mu} \leq 2$);
- 4 laboratoria (lab 13, lab 15, lab 19, lab 31) osiągnęły wynik wątpliwy dla położenia X oraz rozmiaru l_x ($2 < z_{x\mu} \leq 3$);
- 2 laboratoria osiągnęły wynik niezadawalający ($z_{x\mu} > 3$) dla położenia X, oraz rozmiarów wady - (lab 21, lab 29);
- wybrane wyniki porównań i oceny statystycznej można prześledzić w na wykresie – Rys.4;
- szczegółowe wyniki porównań można prześledzić w opracowaniu [1];

5) wada **w2A** akceptowana:
- 21 laboratoriów osiągnęło wynik zadowalający dla położenia X oraz rozmiaru l_x ($z_{x\mu} \leq 2$);
- 1 laboratorium (lab 15) nie zapisywało wady, uznając ją za akceptowaną;
- 3 laboratoria (lab 7, lab 19. lab 31) osiągnęło wynik wątpliwy dla położenia X oraz rozmiaru l_x ($2 < z_{x\mu} \leq 3$);
- 2 laboratoria osiągnęły wynik niezadawalający ($z_{x\mu} > 3$) dla położenia X, oraz rozmiarów wady - (lab 7, lab 29);
- szczegółowe wyniki porównań można prześledzić w opracowaniu [1].

- dla wszystkich wykrytych wskazań wykonano ocenę zgodności z kryteriami akceptacji:
  - wada w1 wszystkie 27 laboratoriów oceniło wadę jako nieakceptowaną;
  - wada w2 26 laboratoriów oceniło wadę jako nieakceptowaną, 1 (lab 29)– nie wykryło wskazania, co jest równoznaczne z akceptacją wady;
  - wada w3 wszystkie 27 laboratoriów oceniło wadę jako nieakceptowaną;
  - wada w4 wszystkie 27 laboratoriów oceniło wadę jako nieakceptowaną;
  - wada w2A 10 laboratoriów oceniło wadę jako nieakceptowaną, 17 laboratoriów oceniło wadę jako akceptowaną, natomiast 1 (lab 15);– nie klasyfikowało wskazania, co jest równoznaczne z akceptacją wady. To było powodem, że wyniki dla wady w2A potraktowano informacyjnie i nie są uwzględniane w końcowej ocenie biegłości.

Podsumowując porównania biegłości w odniesieniu dla wszystkich 4 wad nieakceptowanych, podlegających obligatoryjnemu wykryciu dla całego złącza spawanego - próbki NDE 9305, należy stwierdzić, że przy średniej liczbie parametrów oceny statystycznej $z_{x\mu}$ dla każdej wady (X, l_x, X_{max}, $X_{śr}$ oraz akceptacja A/NA) – tylko 4 laboratoria (lab 15, lab 19, lab 21, lab 29) spośród ogólnej liczby 27, wykazało wyniki niezadowalające $z_{x\mu} > 3$ lub brak wykrycia wady. Wyniki oceny niepewnej ($2<z_{x\mu}\leq 3$) pozostawiono do indywidualnej oceny każdego laboratorium oraz decyzji strony audytorskiej.

7.2 Ultradźwiękowa technika ręczna PT 12/19-20 – UTman

Analiza wybranych wyników badań będzie polegała na stwierdzeniu, czy:

- wszystkie obligatoryjne wady złącza zostały wykryte i sklasyfikowane:
  - wada w1 wszystkie 33 laboratoria wykryły tę niedoskonałość;
  - wada w2 wszystkie 33 laboratoria wykryły tę niedoskonałość;
  - wada w3 32 laboratoria wykryły tę niedoskonałość, 1 laboratorium (lab 29) – nie wykryło wady;
  - wada w4 31 laboratoriów wykryło tę niedoskonałość - w tym 2 laboratoria (lab 26, lab 27) sklasyfikowały tę wadę jako punktową, natomiast 2 laboratoria (lab 4, lab 34) – nie wykryło wady;
- dla wszystkich wykrytych wskazań wykonano lokalizację i wymiarowanie wad oraz jaki jest poziom tych wyników na tle średniej statystycznej – parametr $z_{score} = z_{x\mu}$

1) wada **w1**:
- 30 laboratoriów osiągnęło wynik zadowalający dla położenia X, Y,T, rozmiaru l_x oraz poziomu wady ($z_{x\mu}\leq 2$);
- 1 laboratorium (lab 22) osiągnęło wynik wątpliwy dla położenia X,Y,T, rozmiaru l_x oraz poziomu wady ($2 < z_{x\mu} \leq 3$);
- 2 laboratoria (lab 1, lab 4) osiągnęły wynik niezadawalający dla położenia X, Y,T, rozmiaru l_x oraz poziomu wady ($z_{x\mu} > 3$);
- wybrane wyniki porównań można prześledzić w Tablicy 3 i 4 oraz na wykresach – Rys.5, Rys.6 oraz Rys.7;
- dla porównania oceny statystycznej na Rys.5. podano parametry położenia i rozmiarów wady, wynikające z oceny RT;
- szczegółowe wyniki porównań można prześledzić w opracowaniu [2].

2) wada **w2**:
- 26 laboratoriów osiągnęły wynik zadowalający dla położenia X, Y,T, rozmiarów oraz poziomu wady ($z_{x\mu}$ 2);
- 5 laboratoriów (lab 1, lab 11, lab 22, lab 32, lab 34) osiągnęło wynik wątpliwy dla położenia X,Y,T, rozmiarów oraz poziomu wady ($2<z_{x\mu}\leq 3$);
- 2 laboratoria (lab 26, lab 27) osiągnęły wynik niezadawalający dla położenia X, Y,T, rozmiarów oraz poziomu wady ($z_{x\mu} > 3$);
- szczegółowe wyniki porównań można prześledzić w opracowaniu [2].

3) wada **w3**:
- 25 laboratoriów osiągnęły wynik zadowalający dla położenia X,Y,T, rozmiarów oraz poziomu wady ($z_{x\mu}\leq 2$);
- 4 laboratoria (lab 1, lab 11, lab 15, lab 25) osiągnęły wynik wątpliwy dla położenia X, Y,T, rozmiarów oraz poziomu wady ($2 < z_{x\mu}\leq 3$);
- 4 laboratoria (lab 6, lab 26, lab 27, lab 29) osiągnęły wynik niezadawalający dla położenia X, Y,T, rozmiarów oraz poziomu wady ($z_{x\mu} > 3$);
- szczegółowe wyniki porównań można prześledzić w opracowaniu [2].

4) wada **w4**:
- 21 laboratoriów osiągnęły wynik zadowalający dla położenia X, Y, T, rozmiarów oraz poziomu wady ($z_{x\mu}\leq 2$);
- 9 laboratoriów (lab 11, lab 15, lab 18, lab 19, lab 27, lab 28, lab 32, lab 33, lab 35) osiągnęło wynik wątpliwy dla położenia X,Y,T, rozmiarów oraz poziomu wady ($2 < z_{x\mu}\leq 3$);
- 3 laboratoria (lab 4, lab 26, lab 34) osiągnęły wynik niezadawalający dla położenia X, Y,T, rozmiarów oraz poziomu wady ($z_{x\mu} > 3$);
- wybrane wyniki porównań można prześledzić na wykresach – Rys.8, Rys.9 oraz Rys.10;
- dla porównania oceny statystycznej i na Rys. 8 podano parametry położenia i rozmiarów wady, wynikające z oceny RT;
- szczegółowe wyniki porównań można prześledzić w opracowaniu [2].
- dla wszystkich wykrytych wskazań wykonano ocenę zgodności z kryteriami akceptacji:

- wada w1 31 laboratoriów oceniło wadę jako nieakceptowaną, 2 (lab 1, lab 22) – uznały jako zgodną z kryteriami akceptacji;
- wada w2 wszystkie 33 laboratoria oceniły wadę jako nieakceptowaną;
- wada w3 32 laboratoria oceniło wadę jako nieakceptowaną - w tym1 laboratorium (lab 27) sklasyfikowało tę wadę jako punktową – nieakceptowaną, 1 (lab 29);– nie wykryło wskazania, co jest równoznaczne z akceptacją wady;
- wada w4 26 laboratoriów oceniło wadę jako nieakceptowaną - w tym 2 laboratoria (lab 26, lab 27) sklasyfikowały tę wadę jako punktową – nieakceptowaną; 5 laboratoriów (lab 8, lab 13, lab 18, lab 26, lab 35) sklasyfikowało tę wadę jako – akceptowaną; natomiast -2 laboratoria (lab 4, lab 34) – nie wykryły wskazania, co jest równoznaczne z akceptacją wady.

Podsumowując porównania wyników w odniesieniu dla wszystkich 4 wad nieakceptowanych, podlegających wykryciu dla całego złącza spawanego - próbki NDE 9305, należy stwierdzić, że przy stosunkowo dużej liczbie parametrów oceny statystycznej $z_{x\mu}$ dla każdej wady (*X,* l_x*,* ΔH_u*, Y, T* oraz akceptacja A/NA) – tylko 7 laboratoriów wykazało wyniki niezadowalające zxμ > 3 (lab 1, lab 4, lab 6, lab 26, lab 27, lab 29, lab 34).

Wyniki oceny niepewnej ($2 < z_{x\mu} \leq 3$) pozostawiono do indywidualnej oceny każdego laboratorium oraz decyzji strony audytorskiej

7.3 Ultradźwiękowa technika phased-array ILC 2/19-20 – UT-PA

Analiza wybranych wyników badań pozwala na stwierdzenie, że:

- wszystkie wady złącza zostały wykryte i sklasyfikowane:
- laboratorium lab 1 przeprowadziło skanowanie i opis wyników tylko od strony TOP;
- laboratorium lab 2 przeprowadziło skanowanie i opis wyników od strony TOP i BOTTOM;
- laboratorium lab 3 przeprowadziło skanowanie i opis wyników od strony TOP i BOTTOM;
- laboratorium lab 4 przeprowadziło skanowanie i opis wyników od strony BOTTOM
- laboratorium lab 5 przeprowadziło skanowanie i opis wyników tylko od strony TOP;
- wszystkie laboratoria dokonały lokalizacji i rozmiarów wad wykorzystując ustawienia kursorów i odpowiednie algorytmy szacowania rozmiarów wskazań;
- szacowanie parametru zscore,RT względem wyników referencyjnych lokalizacji i rozmiarów wad z radiografii ma charakter informacyjny i stanowi ilustrację komplementarności obydwu metod objętościowych;
- szczegółowe wyniki porównań można prześledzić w opracowaniu [3].

Klasyfikacja położenia i rozmiarów wad – porównanie parametru z_{score}:

- wada **w1**:
  - wszystkie laboratoria osiągnęły wynik zadowalający dla położenia X, Y i T oraz rozmiarów wady (z 2),
  - 4 laboratoria (lab 1, lab 2, lab 3, lab 4) osiągnęły wynik dobry (z 1,50) dla położenia *X, Y i T* oraz rozmiarów wady;
  - szczegółowe wyniki porównań można prześledzić w opracowaniu [3]
- wada w2:
  - wszystkie laboratoria osiągnęły wynik zadowalający dla położenia *X, Y i T* oraz rozmiarów wady (z 2);
  - 1 laboratorium (lab 4) osiągnęło wynik bardzo dobry (z 1,0) dla położenia *X, Y i T* oraz rozmiarów wady
  - 2 laboratoria (lab 1, lab 5)osiągnęły wynik dobry (z 1,50) dla położenia *X, Y i T* oraz rozmiarów wady;
  - szczegółowe wyniki porównań można prześledzić w opracowaniu [3]
- wada w3:
  - wszystkie laboratoria osiągnęły wynik zadowalający dla położenia *X, Y i T* oraz rozmiarów wady (z 2);
  - 1 laboratorium (lab 3) osiągnęło wynik bardzo dobry (z 1,0) dla położenia *X, Y i T* oraz rozmiarów wady;
  - 2 laboratoria (lab 1, lab 2) osiągnęły wynik dobry (z 1,50) dla położenia *X, Y i T* oraz rozmiarów wady;
  - szczegółowe wyniki porównań można prześledzić w opracowaniu [3]
- wada w4:
  - wszystkie laboratoria osiągnęły wynik zadowalający dla położenia *X, Y i T* oraz rozmiarów wady (z 2);
  - 4 laboratoria (lab 1, lab 2, lab 4, lab 5) osiągnęły wynik dobry (z 1,50) dla położenia *X, Y i T* oraz rozmiarów wady;
  - szczegółowe wyniki porównań można prześledzić w opracowaniu [3]
  - ocena zgodności wad z kryteriami akceptacji:
- wszystkie laboratoria oceniły analizowane wady jako nieakceptowalne ze względu na długość i wysokość wskazania;
- wszystkie laboratoria oceniły referencyjny poziom amplitudy wskazania wady - ΔH_u w [dB] i osiągnęły wynik zadowalający (z 2) dla wszystkich wad;
- szczegółowe wyniki porównań można prześledzić w opracowaniu [3].

Podsumowując szczegółowe wyniki porównań można prześledzić w opracowaniu [2] porównania wyników warto podkreślić, że dla wszystkich parametrów charakteryzujących wadę, technika ultradźwiękowa

PA pozwoliła osiągać uśrednione rezultaty z dobrym przybliżeniem do ich rzeczywistego obrazu lokalizacji i rozmiaru, co przekładało się na osiąganie zadowalającego wyniku dla parametru zscore 2 dla wszystkich wykrytych wad, czyli dla całego złącza przez wszystkie laboratoria biorące udział w porównaniu.

8. Wnioski

8.1 Radiograficzna technika błonowa PT 11/19-20 – RTF

Na podstawie przeprowadzonej analizy należy stwierdzić, że wszystkie laboratoria przeprowadziły badanie tego samego złącza spawanego: próbki NDE 9305, zgodnie z załączoną instrukcją i wykorzystując podobne elementy techniki badania.

Badania wykonano standardową aparaturą (lampy rentgenowski lub defektoskopy izotopowe), zapewniającą utrzymanie klasy badania B wg PN-EN ISO 17636-1, identyfikowaną nazwą i nr fabrycznym oraz statusem aktualnego badania (nie wszystkie laboratoria podają statusu badania aparatu). Nastawa czułości badania odbywała się z zastosowaniem wykrywalności pręcikowej wg PN-EN ISO 17636-1.

Przy nastawie czułości badania należało szczególnie zwrócić uwagę na zapewnienie wykrywalności i gęstości optycznej w klasie B wg PN-EN ISO 17636-1, ponieważ może to wpływać istotnie na określanie obrazu wskazań przy ocenie negastoskopowej, a tym samym na ocenę zgodności z wymaganiami.

Laboratoria poprawnie przeprowadziły badania obowiązkowych 4 nieciągłości w złączu spawanym oznaczonym NDE 9305 techniką radiografii błonowej i tylko 1 spośród 27 laboratoriów wykryło wszystkie wskazania, co stanowi 3,7% ogólnej liczby uczestniczących w porównaniu biegłości.

Według szacowania wskaźnika $z_{x\mu}$ dla wszystkich analizowanych wad, należy stwierdzić, że przy istotnej liczbie wskaźników oceny statystycznej $z_{x\mu}$ dla parametrów każdej wady (X, l_x, X_{max}, $X_{śr}$ oraz akceptacja A/NA) – tylko 4 laboratoria wykazały wyniki niezadowalające ($z_{x\mu} > 3$), co stanowi 14,8% ogólnej liczby uczestniczących w porównaniach biegłości.

Przeprowadzenie badania biegłości dla techniki radiografii błonowej, w oparciu o istotny zakres parametrów lokalizowanych wad (X, l_x, X_{max}, $X_{śr}$), należy uznać za bardzo ważne dla środowiska laboratoriów NDTa uzyskane wyniki badania stanowią cenny materiał szkoleniowy i porównawczy.

8.2 Ultradźwiękowa technika ręczna PT 12/19-20 – UTman

Na podstawie przeprowadzonej analizy należy stwierdzić, że wszystkie laboratoria przeprowadziły badanie tego samego złącza spawanego: próbki NDE 9305, zgodnie z załączoną instrukcją i wykorzystując podobne elementy techniki badania.

Badania wykonano standardową aparaturą cyfrową, zapewniającą utrzymanie klasy badania B wg PN-EN ISO 17640, identyfikowaną nazwą i nr fabrycznym oraz statusem aktualnego badania (nie wszystkie laboratoria podają statusu badania aparatu). Zastosowano głowice jednoprzetwornikowe, na ogół o częstotliwości 4 MHz i kątach wprowadzenia 70, 60 i/lub 45. Nastawa czułości badania odbywała się z zastosowaniem techniki DAC/TCG = 80% FSH przy wykorzystaniu próbki odniesienia (DSDH=3) wg PN-EN ISO 16811:2014-06. Weryfikacja, korekcja strat przeniesienia i kontrola nastaw na próbkach referencyjnych i badanym obiekcie zgodnie z wymaganiami klasy B wg PN-EN ISO 17640.

Przy nastawie czułości badania należało szczególnie zwrócić uwagę na określenie poprawki na straty przeniesienia, ponieważ może to wpływać istotnie na określanie poziomu wskazań przy ocenie amplitudowej, a tym samym na ocenę zgodności z wymaganiami.

Laboratoria poprawnie wykonały ultradźwiękowe badania obowiązkowych 4 nieciągłości w złączu spawanym oznaczonym NDE 9305 i 30 laboratoriów wykryło wszystkie wskazania a 3 laboratoria nie wykryły po 1 wskazaniu, co stanowi 9% ogólnej liczby uczestniczących w porównaniach biegłości.

Według szacowania wskaźnika $z_{x\mu}$ dla wszystkich analizowanych wad, należy stwierdzić, że przy stosunkowo dużej liczbie wskaźników oceny statystycznej $z_{x\mu}$ dla parametrów każdej wady (X, lx, ΔH_u, Y, T oraz akceptacja A/NA) – tylko 7 laboratoriów wykazało wyniki niezadowalające ($z_{x\mu} > 3$), co stanowi 21% ogólnej liczby uczestniczących w porównaniach biegłości.

Przeprowadzenie badania biegłości dla ultradźwiękowych badań ręcznych, w oparciu o szeroki zakres parametrów lokalizowanych wad (X, l_x, ΔH_u, Y, T), należy uznać za bardzo ważne a uzyskane wyniki badania stanowią cenny materiał szkoleniowy i porównawczy.

8.3 Ultradźwiękowa technika phased-array ILC 2/19-20 – UT-PA

Na podstawie przeprowadzonej analizy należy stwierdzić, że wszystkie laboratoria przeprowadziły badanie tego samego złącza spawanego: próbki NDE 9305, zgodnie z łączona instrukcją i wykorzystując podobne elementy techniki badania. Badania wykonano aparaturą wysokiej klasy, zapewniającą wystarczająco wysoki stosunek sygnału do szumu. Zastosowano głowice PA częstotliwości 5 MHz, przy czym 2 laboratoria dysponowały przetwornikami 16-elementowymi a 2 32-elementowymi, które powalają generować skany zaawansowane (tzw. compound scan).

Parametry nastaw badania zgodne z wymaganiami. Przy nastawie czułości badania należy zwrócić uwagę na określenie poprawki na starty przeniesienia, ponieważ może to wpływać istotnie na określanie

poziomu wskazań przy ocenie amplitudowej.

Laboratoria poprawnie wykonały ultradźwiękowe badania UT-PA i wykryły wszystkie obowiązkowe t.j. nieakceptowane nieciągłości w złączu spawanym oznaczonych NDE 9305. Wg szacowania wskaźnika dla wszystkich analizowanych wad wszystkie laboratoria uzyskały wynik zadowalający.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że zaawansowana technika ultradźwiękowa phased-array – UTPA pozwala na uzyskiwanie przez niektóre laboratoria rezultatów z dobrym przybliżeniem do średnich statystycznych.

Przeprowadzenie porównań biegłości ILC -UT-PA należy w przedstawionym zakresie należy uznać za bardzo ważne a uzyskane wyniki badania porównawczego stanowią cenny materiał szkoleniowy.

Wynik badania porównawczego należy uznać za zadowalający.

9. Bibliografia

[1] Analiza porównań biegłości PT 11/19-20/ RTbłona – Badania radiograficzne złącza spawanego techniką błonową – organizator Sekcja Badań Materiałowych klubu POLLAB, koordynator dr inż. Marek Śliwowski, wyd. 1/2021, Warszawa

[2] Analiza porównań biegłości PT 12/19-20/ UTman – Ręczne badania ultradźwiękowe złącza spawanego – organizator Sekcja Badań Materiałowych klubu POLLAB, koordynator dr inż. Marek Śliwowski, wyd. 1/2021. Warszawa

[3] Analiza porównań międzylaboratoryjnych ILC 2/19-20/ UT-PA – Ultradźwiękowa technika phased-array – PA - badanie złącza spawanego – organizator Laboratorium NDTEST, koordynator dr inż. Marek Śliwowski, wyd. 2/2022, Warszawa.

Marcin Lewandowski[1*], Jakub Rozbicki[1], Hanna Smach[1], Piotr Karwat[1], Arkadiusz Szczurek[2], Jolanta Sala[2], Alicja Bera[2]

[1] *Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN,* [2] *Baltic 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 przebadanie 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. 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.

*Autor korespondencyjny.
E-mail: mlew@ippt.pan.pl

Published by „Badania Nieniszczące i Diagnostyka" Publishing Agenda of SIMP
DOI: 10.26357/BNID.2022.010

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 możliwości 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 prowadnicami do automatyzacji procesu skanowania spoin.

2.1 Symulacje wiązek ultradźwiękowych

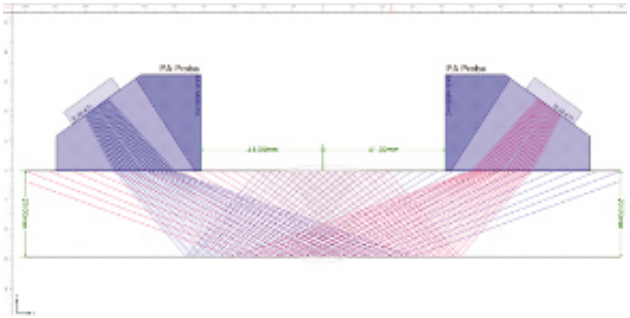
Korzystając z dedykowanego oprogramowania BeamTool v9 do symulacji wiązek ultradźwiękowych w badaniach nieniszczących, przeprowadzono badania mające na celu określenie pokrycia badania spoiny za pomocą typowych głowic Phased-Array z klinem o kącie 55^0.

Symulacje przeprowadzono dla próbek złączy spawanych o grubościach: od 15 mm do 29 mm oraz złącza doczołowego typu kołnierzowego 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,
- odchylania wiązki (zakres kątów).

Obecnie, metodą state-of-the-art do skanowania spoin jest tryb „Compound", który realizuje jedoczesne przesuwanie apertury nadawczej oraz odchylanie 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-plany 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 40^0–70^0 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 40^0-70^0 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-zautomatyzowanych 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 przebadanie metodami VT, MT/PT, UT, RT, UTPA. Wszystkie próbki z modelowymi wadami/niezgodnościami zostały sklasyfikowane zgodnie z normą ISO-6520 na sześć następujących grup

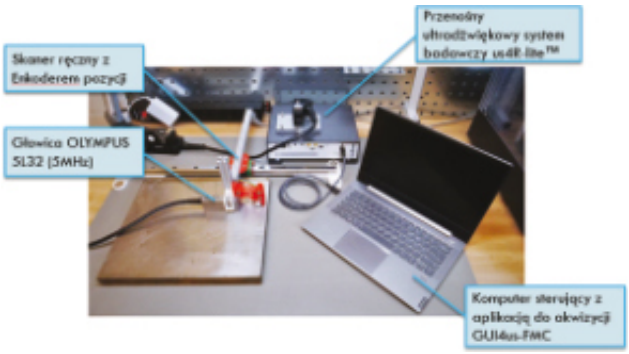
1) pęknięcia,
2) pustki,
3) wtrącenia stałe,
4) braki przetopu, przyklejenia,
5) niezgodności odchylenia kształtu,
6) pozostałe niezgodności spawalnicze.

W każdej z sześciu grup wad/niezgodności znalazło się od 28 do 30 modelowych próbek. Przy tworzeniu grup uwzględniono: 3 grupy asortymentowe x 3 najczęściej stosowane metody w każdej grupie asortymentowej x 3 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

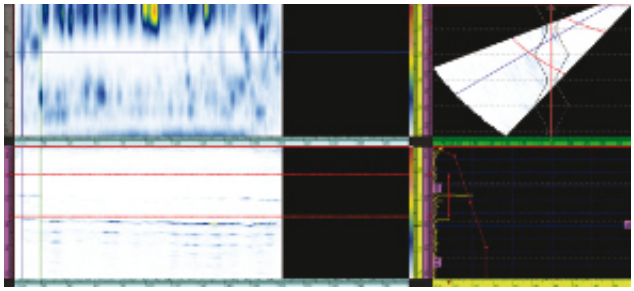


Rys. 2. Laboratoryjny skaner badawczy us4R-lite do badań próbek spoin spawanych dla sekcji płaskich metodą UTPA-FMC.
Fig. 2. Laboratory test scanner us4R-lite for testing weld specimens for flat sections by the UTPA-FMC method

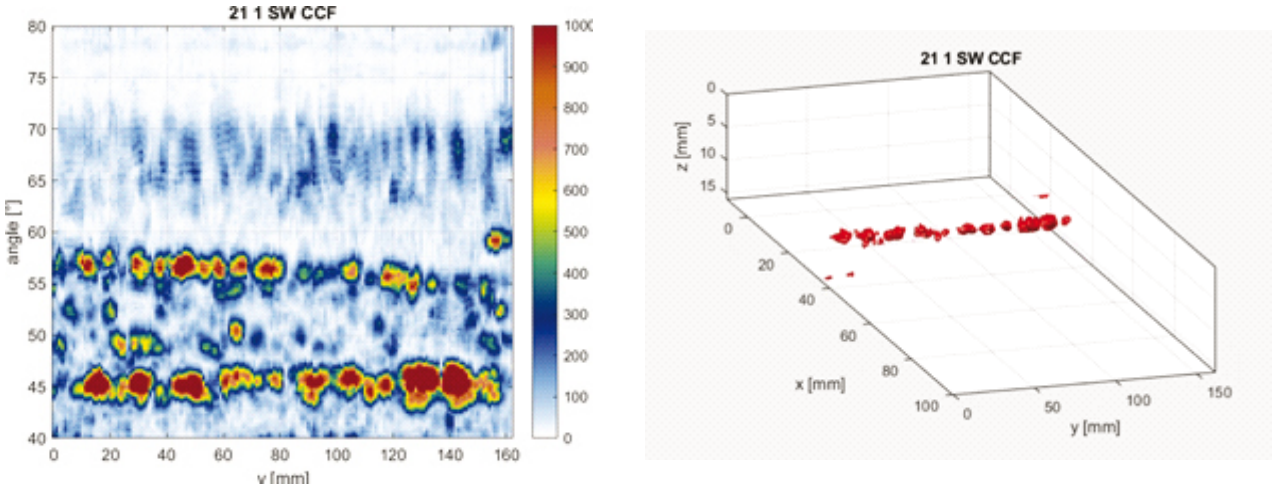
umożliwia podłączenie głowic Phased-Array Olympus — tych samych, które były stosowane z aparatem OmniScan X3. Do wczesnej oceny laboratoryjnej został opracowany ręczny skaner mechaniczny z programowalnym koderem położenia (Rys. 2). Metoda akwizycji ultradźwięków jest definiowana programowo i umożliwia 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 przesyłać 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 prowadnicami 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 i 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.

Jakub Spytek[1], Kajetan Dziedziech[1],Łukasz Ambroziński[1], Łukasz Pieczonka[1*]
[1]*Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Robotyki i Mechatroniki, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków*

Obrazowanie wad w strukturach cienkościennych z wykorzystaniem ultradźwiękowych fal prowadzonych

Damage imaging in thin-walled structures using guided ultrasonic waves

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono nowatorską technikę badań nieniszczących struktur cienkościennych bazującą na estymacji lokalnej liczby falowej ultradźwiękowych fal prowadzonych. Technika bazuje na punktowym wzbudzeniu fal ultradźwiękowych i rejestracji odpowiedzi drganiowych na siatce punktów w obszarze zainteresowania z wykorzystaniem skanującego wibrometru laserowego. Wzbudzenie może być zrealizowane bezkontaktowo za pomocą impulsu lasera, bądź kontaktowo za pomocą przetwornika piezoelektrycznego. Praca omawia podstawy teoretyczne metody oraz jej zastosowania praktyczne. Skuteczność działania omawianej metody zilustrowano na przykładzie jednorodnej płyty aluminiowej oraz niejednorodnej warstwowej płyty kompozytowej.

***Słowa kluczowe**: ultradźwięki, fale prowadzone, struktury cienkościenne, techniki laserowe*

ABSTRACT

In this paper we present a novel nondestructive testing technique for plate-like structures, using the local wavenumber estimation of ultrasonic guided waves. The technique is based on the excitation of ultrasonic waves and measuring the full-field response on a grid of points in the area of interest with a scanning laser vibrometer. The excitation can be realized using a non-contact laser pulse or a piezoelectric transducer. The paper discusses theoretical background of the technique and its practical applications. The efficacy of the proposed approach is demonstrated on a homogeneous aluminum plate and an inhomogeneous layered composite plate.

***Keywords**: ultrasound, guided waves, thin-walled structures, laser techniques*

1. Wprowadzenie

Kontrola jakości i monitorowanie stanu technicznego struktur cienkościennych jest istotnym zagadnieniem w wielu gałęziach przemysłu. Przykładowo, poszycia samolotów narażone są na uszkodzenia ze względu na wiele czynników zewnętrznych, takich jak grad, uderzenia piorunów lub kolizje podczas załadunku i rozładunku. Powstałe uszkodzenia, mimo iż często niewidoczne gołym okiem, powodują znaczące osłabienie struktury i stwarzają poważne zagrożenie w dalszej eksploatacji. Wykrywanie uszkodzeń w strukturach tego typu jest jednak procesem czasochłonnym i skomplikowanym. Wobec tego istnieje zapotrzebowanie na szybsze i niezawodne metody inspekcji.

W ostatnich latach zaproponowano wiele metod detekcji uszkodzeń w strukturach cienkościennych [1]. Wśród nich są metody bazujące na pomiarze pełnego pola propagacji fal prowadzonych przy użyciu bezkontaktowych czujników drgań [2]-[4]. Podejście takie umożliwia wizualizację lokalnych interakcji pomiędzy polem falowym, a uszkodzeniami w strukturze. W tym celu stosuje się techniki przetwarzania sygnałów, aby uwidocznić subtelne zmiany cech fal Lamba. Jednym z bardziej zaawansowanych podejść jest technika estymacji lokalnej liczby falowej (ang. Local Wavenumber Estimation, LWE) znana także w literaturze jako spektroskopia liczby falowej (ang. Acoustic Wavenumber Spectroscopy, AWS). W literaturze naukowej wykazano skuteczność tej metody dla różnego rodzaju struktur, takich jak płyty jednorodne, rury, kompozyty oraz płyty klejone [5]-[10].

W tej pracy przedstawiamy opracowany system pomiarowy bazujący na technice spektroskopii liczby falowej do wykrywania uszkodzeń w strukturach cienkościennych. Do pomiaru pola falowego wykorzystujemy bezkontaktowy skanujący wibrometr laserowy (SLDV), a do wymuszenia impulsowe źródło laserowe lub ceramiczny przetwornik piezoelektryczny (PZT). Skuteczność systemu zademonstrowana jest na przykładzie jednorodnej płyty aluminiowej z lokalnym ubytkiem przekroju, oraz warstwowej płyty kompozytowej o zmiennej grubości z syntetycznymi delaminacjami.

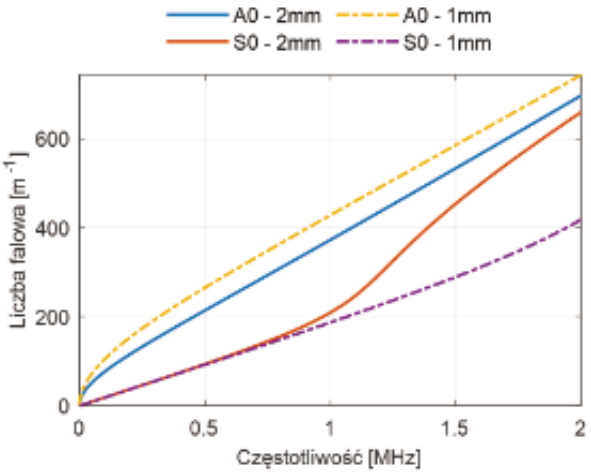
2. Metoda estymacji lokalnej liczby falowej

Podejście omawiane w niniejszej pracy umożliwia charakteryzację wad w konstrukcjach cienkościennych przy pomocy analizy pełnego pola propagacji fal Lamba. Fale Lamba podlegają dyspersji, co oznacza że ich liczba falowa jest zależna od częstotliwości, a dodatkowo od zależy od grubości płyty w której te fale propagują. Własności fal Lamba w określonym medium są bardzo często przedstawiane za pomocą krzywych dyspersji, czyli wykresów przedstawiających zależność liczby falowej od częstotliwości. Rys. 1 przedstawia przykładowe krzywe dyspersji dla płyt aluminiowych o grubościach 1 mm i 2 mm. Dla każdej z płyt

*Autor korespondencyjny.
E-mail: lukasz.pieczonka@agh.edu.pl

Published by „Badania Nieniszczące i Diagnostyka" Publishing Agenda of SIMP
DOI: 10.26357/BNID.2022.011

nakreślono charakterystyki podstawowej postaci asymetrycznej (A0) oraz symetrycznej (S0) fal Lamba. Jak można zauważyć, wykresy liczby falowej dla postaci A0 są różne dla różnych grubości płyty w całym podanym zakresie częstotliwości, natomiast wykresy dla postaci S0 osiągają różne wartości od około 1 MHz. Liczba falowa jest więc czuła na zmiany grubości oraz defekty występujące w płycie dla częstotliwości, w której wybrana postać jest mocno dyspersyjna. Metoda estymacji lokalnej liczby falowej fal Lamba (z ang. LWE – local wavenumber estimation) [6], [7] umożliwia stworzenie przestrzennej mapy rozkładu liczby falowej wybranej postaci (np. postaci A0) na obszarze mierzonego pola propagacji fal i użycie jej do zlokalizowania uszkodzeń. Zaletami tej metody są wysoka dokładność wykrywania uszkodzeń, oraz możliwość oceny wielkości uszkodzenia na podstawie wartości liczby falowej.



Rys. 1. Krzywe dyspersji płyty aluminiowej o grubości 2 mm i grubości 1 mm

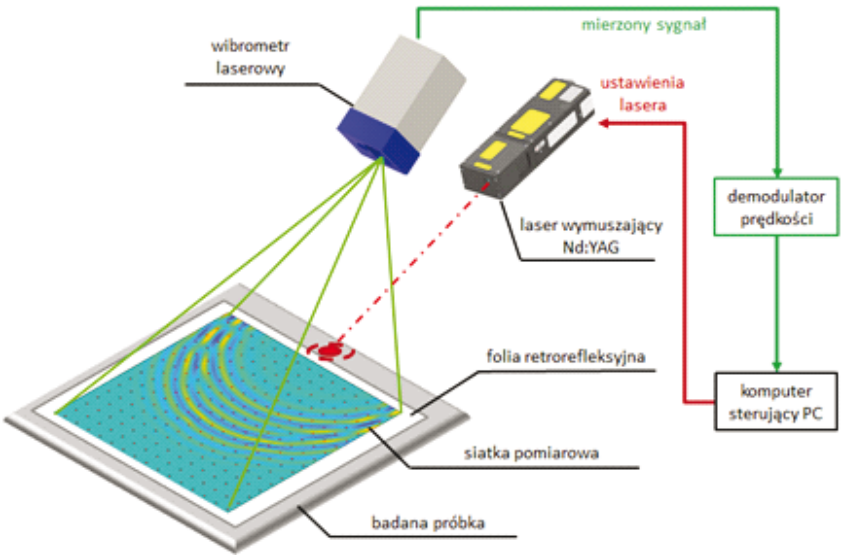
3. System pomiarowy

Metoda estymacji lokalnej liczby falowej (LWE) funkcjonuje w połączeniu z systemem pomiarowym umożliwiającym skanowanie pełnego pola propagacji fal prowadzonych. Tego typu pomiar wykonywany jest zazwyczaj przy użyciu technik laserowych. W przedstawionym przykładzie do pomiaru drgań badanej powierzchni wybrano skanujący wibrometr laserowy (z ang. Scanning Laser Doppler Vibrometer, SLDV) firmy Polytec, model PSV-400. Model ten wyposażony jest w skaner galwanometryczny, umożliwiający automatyczny pomiar drgań w predefiniowanej siatce punktów. Do wzbudzenia fal Lamba w płycie można zastosować kontaktowy przetwornik piezoelektryczny (PZT), do którego podany jest sygnał z generatora. Alternatywnie można wykorzystać laser impulsowy o dużej mocy do wzbudzenia fali ultradźwiękowej poprzez wykorzystanie efektu termosprężystego. W tym układzie pomiar może być w pełni bezkontaktowy oraz zachować swój nieniszczący charakter. Schemat takiego zestawu pomiarowego przedstawiono na Rys. 2.

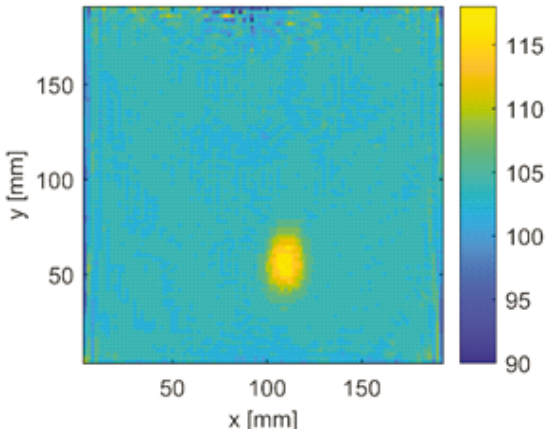
Zestaw pomiarowy wraz z opracowanym algorytmem estymacji lokalnej liczby falowej wykorzystano do detekcji uszkodzeń w dwóch strukturach płytowych: w jednorodnej płycie aluminiowej i w schodkowym demonstratorze wykonanym z laminatu kompozytowego CFRP (z ang. *Carbon Fiber Reinforced Polymer*).

Płyta aluminiowa

Pierwszą próbką badawczą, na której wykonano inspekcję, była płyta aluminiowa o wymiarach 1000×1000×2 mm. Do płyty wprowadzono uszkodzenie w formie prostokątnego podfrezowania na powierzchni około 20×20 mm i do głębokości 0.5 mm. Za pomocą wibrometru laserowego SLDV wykonano skan obszaru 200×200 mm wokół obszaru z ubytkiem grubości. Do wzbudzenia fali wykorzystano kontaktowy przetwornik piezoelektryczny (PZT) przyklejony do powierzchni płyty. Sygnał z jednego przetwornika był wystarczający do uzyskania pola falowego na całym badanym obszarze.



Rys. 2. Schemat pomiarowy obrazowania pełnego pola propagacji fal Lamba w płycie



Rys. 3. Mapa lokalnej liczby falowej dla pola zmierzonego na płycie aluminiowej. Obszar o współrzędnych około x: 100-120 i y: 40-65 mm odpowiada podfrezowaniu o głębokości 0.5 mm, co skutkuje wyższymi wartościami liczb falowych w tym obszarze.

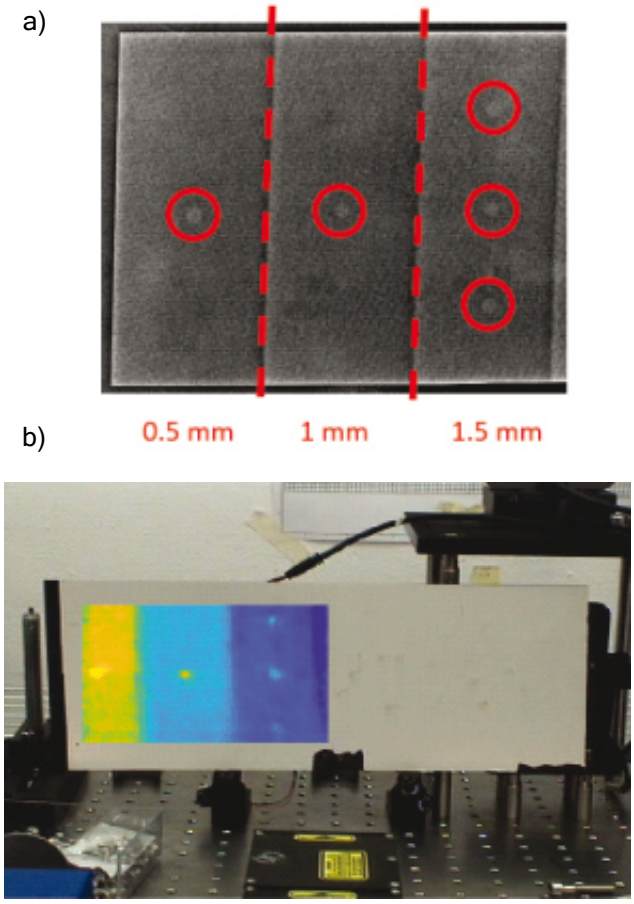
Demonstrator kompozytowy

Drugą analizowaną próbką badawczą był demonstrator kompozytowy do inspekcji ultradźwiękowej. Demonstrator składał się z 3 poziomów grubości: 0.5, 1 i 1.5 mm, a całkowite wymiary próbki wynosiły 180×145 mm. Pomiędzy warstwami kompozytu umieszczono wkładki teflonowe, aby zasymulować lokalne delaminacje wewnątrz płyty. Otrzymane defekty są niewidoczne gołym okiem, a ich położenie pokazane jest na zdjęciu rentgenowskim na Rys. 4a. Pomiar wykonano na płaskiej stronie płyty na obszarze 170×110 mm. W celu poprawy jakości pomiaru wibrometrycznego na powierzchni próbki przyklejono folię retrorefleksyjną. Do wymuszenia wykorzystano komercyjny laser Quantel Ultra Nd:YAG 1064 nm.

Wyniki eksperymentalne

Zestawy danych pomiarowych z płyty aluminiowej i demonstratora CFRP zostały przetworzone przy użyciu metody estymacji lokalnej liczby falowej (LWE). Mapa liczby falowej dla płyty aluminiowej została przedstawiona na Rys. 3. Skala kolorystyczna odpowiada maksymalnej lokalnej liczbie falowej. Dla większości obszaru mapy estymowana liczba falowa ma podobną wartość, odpowiadającą stałej grubości płyty. Na mapie wyraźnie widoczny jest obszar zwiększonej liczby falowej (żółty kolor), który odpowiada wprowadzonemu ubytkowi grubości. Uzyskana mapa pozwala na łatwe określenie wymiarów oraz lokalizacji wady.

Uzyskana mapa liczby falowej dla demonstratora CFRP została przedstawiona na Rys. 4b, po nałożeniu na obraz z kamery wibrometru laserowego. Obszar pomiarowy zawiera trzy różne grubości płyty, co powoduje, że na mapie widoczne są trzy kolory tła, odpowiadające grubościom 0.5, 1 i 1.5 mm (od lewej do prawej). Na obszarach o grubości 0.5 mm i 1 mm widać po jednym okrągłym detalu o wyższej liczbie falowej, a na obszarze o grubości 1.5 mm widać trzy detale o zwiększonej liczbie falowej. Detale te odpowiadają defektom w kompozycie pokazanym na Rys. 4a. Metoda LWE umożliwia więc wykrycie uszkodzeń w płytach CFRP.



Rys. 4. (a) Obraz rentgenowski badanego obszaru płyty kompozytowej o trzech poziomach grubości – 0.5, 1 i 1.5 mm (od lewej do prawej) z widocznymi wadami, oraz (b) uzyskana mapa rozkładu lokalnej liczby falowej naniesiona na obraz z kamery umieszczonej w głowicy wibrometru. W poszczególnych sekcjach widoczne są obszary o odstającej wartości liczby falowej wskazujące lokalizację wad.

4. Wnioski

W artykule zaprezentowano metodę estymacji lokalnej liczby falowej do wykrywania uszkodzeń w strukturach cienkościennych. Pokazano, że mapy rozkładu lokalnej liczby falowej mogę być użyte do wykrywania uszkodzeń zarówno w strukturach jednorodnych jak i kompozytowych. Prezentowana metoda wykorzystuje bezkontaktowy pomiar, który umożliwia stosunkowo szybką inspekcję dużych powierzchni. Do wzbudzenia pola falowego w strukturze można wykorzystać zarówno wymuszenie przetwornikiem kontaktowym, jak i laserem impulsowym. To drugie rozwiązanie umożliwia wykonywanie w pełni bezkontaktowych inspekcji.

Podziękowania

Badania przeprowadzono w ramach projektu LIDER/2/0117/L-7/15/NCBR/2016 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Autorzy pragną podziękować firmie Tworzywa Sztuczne PZL Mielec Sp. z o.o. sp.k., za udostępnienie materiału do badań.

5. Literatura

[1] Stepinski, T., Uhl, T., & Staszewski, W. (2013). Advanced Structural Damage Detection: From Theory to Engineering Applications. Wiley.

[2] Pieczonka, Ł., Ambroziński, Ł., Staszewski, W. J., Barnoncel, D., & Pérès, P. (2017). Damage detection in composite panels based on mode-converted Lamb waves sensed using 3D laser scanning vibrometer. Optics and Lasers in Engineering, 99(June 2016), 80–87.

[3] Kudela, P., Radzienski, M., & Ostachowicz, W. (2018). Impact induced damage assessment by means of Lamb wave image processing. Mechanical Systems and Signal Processing, 102, 23–36. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.09.020

[4] Katunin, A., Dragan, K., & Dziendzikowski, M. (2015). Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques. Composite Structures, 127, 1–9.

[5] M. Ruzzene, "Frequency-wavenumber domain filtering for improved damage visualization," AIP Conf. Proc., vol. 894, pp. 1556–1563, 2007.

[6] T. E. Michaels and J. E. Michaels, "Application of acoustic wavefield imaging to non-contact ultrasonic inspection of bonded components," AIP Conf. Proc., vol. 820 II, no. 2006, pp. 1484–1491, 2006.

[7] E. B. Flynn, S. Y. Chong, G. J. Jarmer, and J. R. Lee, "Structural imaging through local wavenumber estimation of guided waves," NDT E Int., vol. 59, pp. 1–10, 2013.

[8] M. D. Rogge and C. A. C. Leckey, "Characterization of impact damage in composite laminates using guided wavefield imaging and local wavenumber domain analysis," Ultrasonics, vol. 53, no. 7, pp. 1217–1226, 2013.

[9] J. Spytek, J. Mrowka, L. Pieczonka, and L. Ambrozinski, "Multi-resolution non-contact damage detection in complex-shaped composite laminates using ultrasound," NDT E Int., vol. 116, p. 102366, 2020, doi: 10.1016/j.ndteint.2020.102366.

[10] J. Spytek, L. Ambrozinski, and L. Pieczonka, "Evaluation of disbonds in adhesively bonded multilayer plates through local wavenumber estimation," J. Sound Vib., no. November, p. 116624, 2021, doi: 10.1016/j.jsv.2021.116624.

STRESZCZENIA REFERATÓW

49. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących

Kołobrzeg, 17-20 października 2022

1. Zautomatyzowane badania systemami PA +TOFD – wdrażanie i zastosowania

Autorzy: **Marek Śliwowski, NDTEST Sp. z o.o., Warszawa**

Streszczenie**:** Celem referatu jest prezentacja prac wdrożeniowych automatycznych systemów ultradźwiękowych PA+TOFD, dedykowanych do badania doczołowych złączy spawanych o zakresie grubości 6 ¸ 40 mm na obiektach ze stali węglowych - płaskich oraz rurociągach w zakresie średnic DN 500 ¸ 1400 mm. Implementacja kombinowanych technik cyfrowych PA (Phase-Array – zastosowanie głowic wieloprzetwornikowych dających informację z całej objętości złącza) oraz TOFD (dyfrakcyjna technika czasu przejścia – komplementarne przeszukiwanie objętości spoiny) pozwala na cyfrowe zobrazowanie oraz cyfrowy zapis pełnych wyników badania w całej długości i objętości złącza spawanego i została znormalizowana, w zakresie badania wyrobów spawanych, oddzielnie w dokumencie PN-EN ISO 13588 dla techniki PA [2] oraz w PN-EN ISO 10863 - dla techniki TOFD [3]. Cyfrowe techniki badawcze pozwalają na łatwe automatyzowanie procesu, przy użyciu skanera prowadzącego głowice, z możliwością ręcznego (badanie pół-automatyczne) lub zmechanizowanego (badanie automatyczne) prowadzenia wzdłuż badanego złącza. Przywołane normy umożliwiają charakteryzowanie i klasyfikację wskazań ech odbitych lub dyfrakcyjnych oraz obwiedni echa uzyskiwanych głowicami PA oraz TOFD dla uzgodnionego poziomu badania (A, B lub C). Skutkuje to w każdym przypadku koniecznością przygotowania pisemnej procedury badania, odpowiednich próbek odniesienia określonych tymi normami oraz przeprowadzenia badań kwalifikacyjnych, a także wykonania badań pilotowych/porównawczych na próbkach o znanych lokalizacji i rozmiarach wad. W referacie przedstawiono doświadczenia z procesu wdrażania systemu PA+TOFD oraz badań dla złączy spawanych z pełnym przetopem w rurociągach.

2. Zastosowanie rentgenowskiej metody pomiaru naprężeń w diagnostyce przyczyny pękania elementu spawanego turbiny gazowej

Autorzy: **Wojciech Szymański, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Metali Nieżelaznych Oddział w Skawinie**

Streszczenie**:** W pracy przedstawiono metodykę diagnostyki przyczyn pękania detalu turbiny gazowej w miejscu połączenia spawanego dwóch stopów żarowytrzymałych. Wykonano rozkład naprężeń W okolicy złącza spawanego po wykonaniu elementu, co pozwoliło określić przyczynę pękania. Próby wyżarzania i odprężania wibracyjnego, nie przyniosły spodziewanych efektów. W dalszej części pracy przeprowadzono pomiary naprężeń łączonych spawem elementów detalu na kolejnych etapach jego wytwarzania, co pozwoliło na określenie, w którym momencie produkcji powstają krytyczne naprężenia będące przyczyną przedwczesnego pękania w czasie pracy turbiny. Poprawa technologii produkcji eliminująca niekorzystny rozkład naprężeń pozwoliła na uzyskanie oczekiwanego czasu pracy turbiny bez awarii..

3. Wymagania normy PN-EN ISO 9712 Badania nieniszczące. Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących–porównanie wydania z 2012 r. i 2022 r.

Autorzy: **Magdalena Maj-Sobczak, Krzysztof Rudnicki, Adam Muszyński, Urząd Dozoru Technicznego, Warszawa**

Streszczenie**:** Norma PN-EN ISO 9712 Badania nieniszczące. Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących jest zbiorem zasad kwalifikacji certyfikacji personelu wykonującego badania NDT. W czerwcu br. Zostanie ogłoszone nowe wydanie niniejszej normy. Niniejszy referat stanowi porównanie wymagań wydania z 2012 r. z wydaniem z 2022 r.

4. Szczątkowe pole magnetyczne jako źródło informacji o stanie technicznym lin stalowych

Autorzy: **Paweł Mazurek, Maciej Roskosz**
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Streszczenie**:** W pracy podjęto badania mające na celu analizę możliwości wykorzystania szczątkowego pola magnetycznego, będącego wynikiem lokalnych zmian właściwości elektromagnetycznych materiału liny, do identyfikacji stanu technicznego liny stalowej. Pod wpływem cyklicznie zmieniających się obciążeń roboczych oraz efektów magnetomechanicznych, zmiany właściwości elektromagnetycznych zachodzą zarówno w drutach, jak iw całej linie. W artykule przedstawiono zastosowanie czujników magnetycznych do określenia zależności między liczbą przegięć liny stalowej a wartością indukcji jej pola magnetycznego. Wiedza ta, odniesiona do lin pracujących na obiektach rzeczywistych, pozwala określić stan naprężeń w nich panujących oraz ich stan techniczny.

5. Nowe metody diagnostyki konstrukcji kompozytowych

Autorzy: **Krzysztof Dragan, Piotr Synaszko, Norbert Pałka, Waldemar Świderski, Andrzej Żyluk, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Wojskowa Akademia Techniczna, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia**

***Streszczenie*:** Badania kompozytowych materiałów polimerowych są coraz częściej wykonywane z wykorzystaniem szerokiego spektrum metod umożliwiających zarówno kontrolę procesów produkcyjnych jak i wykrywania uszkodzeń eksploatacyjnych. Z uwagi na szerokie spektrum uszkodzeń oraz możliwych wad produkcyjnych coraz częściej stosuje się metody bezkontaktowe w tym umożliwiające wykrywanie uszkodzeń z większą rozdzielczością. Do badań wprowadzanych do zastosowań przemysłowych należy spektroskopia terahertzowa lub badania z wykorzystaniem technik mikrofalowych. W artykule przedstawiono podejście do badania takich struktur z wykorzystaniem metody spektroskopii THz, omówione zostaną aplikacje badawcze, ograniczenia i możliwości metody oraz wyniki porównawcze z metodą ultradźwiękową. Ponadto przedstawione zostanie podejście do zautomatyzowanej oceny i klasyfikacji wyników w oparciu o algorytmy przetwarzania sygnałów.

6. Problemy w ocenie wyników badań NDT łopat wirnika nośnego śmigłowców rodziny Mi-8, Mi-24

Autorzy: **Patryk Ciężak, Piotr Synaszko , Krzysztof Dragan Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych – ITWL, Warszawa**

***Streszczenie*:** Śmigłowce rodziny Mi są jednymi z najbardziej popularnych wojskowych śmigłowców na świecie. Liczba egzemplarzy poszczególnych modeli przedstawia się następująco: Mi-8 ponad 17000 egzemplarzy powstających od 1961 do dnia dzisiejszego, Mi-14 273 egzemplarzy powstałych w latach 1973–1986 oraz Mi-24 ponad 3000 egzemplarzy powstałych w latach 1970-1989. Łopaty wirnika nośnego są delikatnym, a zarazem krytycznym agregatem występującym na śmigłowcu. Dlatego też podlegają one regularnym przeglądom i sprawdzeniom. W artykule skupiono się na problematyce związanej z oceną wskazań uzyskanych w trakcie badań łopat wirnika nośnego śmigłowców rodziny Mi. Metalowa konstrukcja łopat wirnika nośnego rosyjskich wojskowych śmigłowców predestynuje wybór metod badań nieniszczących, jakimi są: metoda prądów wirowych (ET), metoda ultradźwiękowa (UT), metoda shearography (ST), Pitch-Catch oraz metoda Impedancji Akustycznej (MIA). Przy pomocy badań NDT możemy ocenić stan konstrukcji łopaty i znaleźć w jej elementach uszkodzenia powstałe w trakcie ich eksploatacji. W artykule zostały omówione typy uszkodzeń oraz metody wykorzystywane do ich wykrywania. W trakcie prowadzenia wieloletnich badań określono czynniki wpływające na ocenę uzyskanych wskazań.

7. Zastosowanie metody szerografii do badań konstrukcji lotniczych

Autorzy: **Piotr Synaszko, Jakub Kotowski, Krzysztof Dragan, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych – ITWL, Warszawa,**

***Streszczenie*:** Szerografia jest optyczną metodą badań nieniszczących wykorzystującą zjawisko interferencji światła. Wykorzystuje się ją do wykrywania uszkodzeń powierzchniowych i podpowierzchniowych głównie w konstrukcjach kompozytowych i klejonych. Pomimo bardzo wysokiej czułości na zmianę deformacji badanego obiektu jest to metoda stosowana nie tylko w badaniach laboratoryjnych ale również w praktyce przemysłowej i eksploatacyjnej. W artykule przedstawiono krótką charakterystykę tej metody badań nieniszczących wraz z przedstawieniem rozwiązań stosowanych w praktyce badań. Przedstawiono podstawy teoretyczne metody oraz opisano algorytmy wyznaczania map fazowych. Artykuł zawiera wyniki dla typowych lotniczych aplikacji NDT oraz ich porównanie z innymi popularnie stosowanymi metodami.

8. Wczesne wykrywanie uszkodzenia stopu Inconel 718 na podstawie instrumentowanego pomiaru twardości

Autorzy: **Maciej Malicki, Grzegorz Socha, Józef Krysztofik Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa, Warszawa**

***Streszczenie*:** W pracy przedstawiono metodę umożliwiającą wczesne wykrycie uszkodzenia materiału na podstawie instrumentowanego pomiaru twardości. Materiałem do badań i oceny stopnia degradacji był stop Inconel 718. Użyto próbek o zmiennym polu przekroju części pomiarowej pozwalających na uzyskanie ciągłego rozkładu odkształceń plastycznych w tej części próbki. Do określenia stopnia uszkodzenia D materiału przyjęto miarę zdefiniowaną przez G. R. Johnsona. Jako wskaźniki uszkodzenia wybrano wielkości uzyskane podczas instrumentowanego pomiaru twardości - twardość, energię odkształcenia plastycznego i instrumentowany moduł elastyczności. Uszkodzenia próbek wprowadzono poprzez statyczną próbę rozciągania oraz próby zmęczeniowe nisko- i wysokocykliczne. Na ich podstawie określono tzw. referencyjny parametr uszkodzenia $D\varepsilon$ bazujący na wartościach odkształceń plastycznych w określonych przekrojach próbek. Powierzchnie próbek oraz ich prze-łomy poddano badaniom fraktograficznym. Określono prędkość rozwoju rozdzielczych pęknięć zmęczeniowych i procentową liczbę cykli zmęczeniowych przypadających na obszar zarodkowania dominującego pęk-nięcia zmęczeniowego. Instrumentowane pomiary twardości wykonano na specjalnie zaprojektowanym i skonstruowanym do tego celu twardościomierzu. Dokonano korelacji pomiędzy wartościami wskaźników uszkodzenia a referencyjnym parametrem uszkodzenia. Stwierdzono, że na relatywnie wczesnym etapie uszkodzenia (dla statycznej próby rozciągania i niskocyklicznej próby zmęczeniowej $D\varepsilon < 0.3$, a dla próby wysokocyklicznej $D\varepsilon < 0.2$) istnieje liniowa zależność między twardością, energią odkształcenia plastycznego i instrumentowanym modułem elastyczności a stopniem uszkodzenia.

9. Badania diagnostyczne torowiska jazdy mostów przeładunkowych w systemie zasilania wielkiego pieca

Autorzy: **Bogusław Ładecki, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie**

Streszczenie**:** Dążenie do neutralności klimatycznej, a co za tym idzie do ograniczenia emisji CO2 jest przyczyną znacznego wzrostu kosztu produkcji stali. Wskutek ograniczonych nakładów finansowych na naprawy i modernizacje następuje istotne zużycie infrastruktury przemysłu hutniczego w Polsce. W następstwie powyższego, utrzymanie w zadowalającym stanie technicznych niektórych obiektów technicznych związanych z produkcją stali rodzi szereg problemów eksploatacyjnych. W niniejszej publikacji przedstawiono kompleksowy program badań diagnostycznych, którym poddano torowisko jazdy mostów przeładunkowych w systemie zasilania Wielkiego Pieca zastosowany w jednej z polskich hut. W pracy omówiono wyniki przeprowadzonych kontroli i badań nieniszczących torowisk, belek, oraz podpór wraz z geodezyjnymi pomiarami geometrii torowiska. Uzyskane wyniki badań, w połączeniu z wynikami pomiarów trwałych deformacji torowiska, stanowiły podstawę do zaprojektowania odpowiednich wzmocnień, oraz przeprowadzenia rekonstrukcji rozważanego torowiska jazdy mostów przeładunkowych.

10. Nieniszczące badania skał w petrofizyce

Autorzy: **Rafał Skupio, Benedykt Kubik, Katarzyna Drabik Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy, Kraków**

Streszczenie**:** Niniejsza praca przedstawia możliwości stosowania badań nieniszczących na skałach pobranych w trakcie realizacji otworów wiertniczych dla przemysłu naftowego oraz wyniki kompleksowej interpretacji krzywych geofizyki otworowej. Materiał skalny, który jest archiwizowany w Centralnym Magazynie Rdzeni, zachowany jest zazwyczaj w formie całych rdzeni wiertniczych lub zwiercin. Badania rdzeni archiwalnych mogą przynieść korzyści w postaci udoskonalenia wyników interpretacji profilowań geofizyki otworowej oraz pozwalają na wyciągnięcie nowych wniosków czy budowę koncepcji dla obszarów, w których planuje się wykonywać nowe otwory wiertnicze. Nieniszczące metody badawcze zastosowane do przeprowadzenia interpretacji dotyczą naturalnej promieniotwórczości gamma, wraz z aplikacją do pomiarów gęstości metodą gamma-gamma, spektrometrii fluorescencji rentgenowskiej XRF oraz tomografii komputerowej CT. Wymienione metody pozwalają na uzyskanie takich informacji jak skład chemiczny i mineralny skał, określenie litologii, wydzielenie warstw na podstawie analizy chemostratygraficznej, oszacowanie zailenia, określenie gęstości i porowatości jak również uzyskanie dokładnego obrazu struktury rdzeni. Badania skał przeprowadzone zostały na materiale reprezentującym utwory o zróżnicowanej litologii takiej jak: łupki, piaskowce, wapienie, dolomity, anhydryty, mułowce oraz heterolity. Z uwagi na formę materiału, badania rdzeni wiertniczych lub zwiercin pozwalają uzyskać wyniki w postaci profilowań, które są porównywane z pomiarami geofizyki wiertniczej, niemniej jednak pozbawione wpływu otworu. Badania te maja szczególne znaczenie w przypadku „starych" otworów, w których przeważająca część pomiarów geofizycznych była wykonywana sondami radzieckimi, a jakość danych często była niska lub niekompletna.

11. Identyfikacja i ocena przypaleń szlifierskich w stali AISI 9310 metodą prądów wirowych

Autorzy: **Dominik Kukla; Mateusz Kopeć, Andrzej Gradzik, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk**

Streszczenie**:** Praca dotyczy oceny możliwości metody prądów wirowych w zakresie detekcji oraz opisu ilościowego przypaleń szlifierskich w gatunku stali stopowej do nawęglania AISI 9310. Przypalenia szlifierskie, jako defekty wywołane obróbką mechaniczną powodujące lokalne powstawanie tlenków na powierzchni obrabianych detali, wskazują na przekroczenie dopuszczalnych obciążeń w strefie styku detal – narzędzie. Dlatego też istotna jest ich identyfikacja na etapie wytwarzania. Powstawaniu przypaleń towarzyszą lokalne zmiany właściwości w warstwie wierzchniej materiału, których detekcja jest możliwa z wykorzystaniem prądów wirowych indukowanych w materiałach konduktywnych. Jako próbkę odniesienia wykorzystano wałki ze stali AISI 9310 z symulowanymi przypaleniami w postaci defektów wytworzonych poprzez lokalne nagrzewanie laserowe powierzchni. Przypalenia zostały scharakteryzowane pod względem zmian mikrostruktury oraz twardości na powierzchni przypalenia oraz na przekrojach poprzecznych. Na tej podstawie oceniono głębokość strefy ciepła wywołanej obróbką. Defekty uzyskane dla różnych parametrów wiązki laserowej poddano badaniom metodą prądów wirowych, techniką skanowania powierzchni sondą stykową. Dla uzyskanych sygnałów wyznaczono wartości amplitudy i kąta fazowego, a następnie skorelowano z wynikami badań mikrostruktury i mikrotwardości. Na podstawie wartości amplitudy możliwa jest ocena głębokości defektów, z kolei różnice w wartości kąta fazowego sygnału mogą wskazywać na stopień przegrzania próbki w obszarze indukcji prądów wirowych. Jednak zmiany w profilach twardości wykonanych na przekrojach poprzecznych trudno odnieść do wyników uzyskanych za pomocą prądów wirowych z uwagi na trudność oszacowania głębokości ich wnikania w materiał ferromagnetyczny badanych próbek.

12. Wpływ obecności warstwy azotowanej na zmiany parametrów fali ultradźwiękowej

Autorzy: **Ryszard Mańczak, Politechnika Poznańska**

Streszczenie**:** W celu polepszenia własności użytkowych powierzchni odpowiedzialnych części maszyn, wytwarza się na nich warstwy azotowane metodą obróbki cieplno-chemicznej. Po wykonaniu procesu azotowania konieczne jest przeprowadzenie oceny grubości wytworzonej warstwy. Na etapie badań laboratoryjnych, ocenę tą przeprowadza się pod mikroskopem na zgładzie metalograficznym. Natomiast w warunkach produkcji przemysłowej konieczne jest zastosowanie nieniszczącej metody oceny grubości warstwy azotowanej. Pewne zastosowanie w tym obszarze znalazła metoda prądów wirowych. Duży potencjał w nieniszczącej ocenie grubości warstwy azotowanej posiada także metoda ultradźwiękowa. Istnieje możliwość wykorzystania fal powierzchniowych lub fal Love'a. W niniejszej pracy podjęto

działania, których celem była ocena możliwości zastosowania fali ultradźwiękowej w ocenie warstwy azotowanej. W części badawczej pracy przygotowano próbki, które poddano procesowi azotowania. Do badanych próbek wprowadzono falę ultradźwiękową za pomocą głowicy ostrzowej o częstotliwości4 MHz. Fale wprowadzono do próbek zarówno przed procesem azotowania, jaki po jego wykonaniu. Podczas badań wyznaczano wartości trzech parametrów fali ultradźwiękowej tj. czasu przejścia fali t, dominującej częstotliwości w widmie fali fmax oraz szerokości pasma przenoszenia B. Uzyskane wyniki cechuję się dużą powtarzalnością i wskazują na występowanie istotnych zmian w czasie przejścia fali w próbkach azotowanych i nieazotowanych. Stanowią one zachętę do podjęcia dalszych działań w tym obszarze.

13. Diagnozowanie uszkodzeń BVID w materiałach kompozytowych metodą tomografii komputerowej (CT)

Autorzy: **Adrianna Nidzgorska, Jerzy Perczyński, Marek Chalimoniuk, Artur Kułaszka, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa**

Streszczenie**:** Uszkodzenia typu Barely Visible Impact Damage (BVID) pojawiają się w polimerowych materiałach kompozytowych w wyniku oddziaływania na nie dynamicznych obciążeń. Takie obciążenia powstają wskutek oddziaływania np. elementów Foreign Object Damage (FOD) o małych prędkościach i niewielkich energiach. Uszkodzenia BVID są niebezpieczne z punktu widzenia eksploatacji, ponieważ charakteryzują się słabą wykrywalnością wizualną, jednoczenie propagując wewnątrz materiału. Uszkodzenia BVID materiału kompozytowego należą zarówno do uszkodzeń eksploatacyjnych jak i produkcyjnych.

Tomografia komputerowa jest rodzajem tomografii rentgenowskiej pozwalającym na uzyskanie obrazów przestrzennych (3D) z prześwietlania badanego obiektu wykonanych z różnych kierunków. Wykorzystanie nowoczesnej techniki diagnostycznej jaką jest tomografia komputerowa pozwala na skuteczną weryfikację uszkodzeń typu BVID. Umożliwia to wykrycie nieciągłości materiału na wczesnym etapie i w znacznym stopniu wpływa na bezpieczeństwo eksploatacji.

14. Diagnostyka urządzeń energetycznych z zastosowaniem metod analizy modalnej oraz metod wizyjnych - analiza porównawcza

Autorzy: **Dariusz Pabian, Marcin Chodźko, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna S,A. Oddział Elektrowni Dolna Odra**

Streszczenie**:** Bezpieczna eksploatacja systemów energetycznych wymaga nadzorowania ich stanu dynamicznego w trybie on-line lub off-line. W wielu przypadkach, zainstalowane systemy pomiarowe dostarczają informacji diagnostycznej - np. o podwyższonych poziomach drgań. Jednak w wielu przypadkach informacje te są niewystarczające do podjęcia właściwych działań naprawczych. Jest tak np. w przypadku zmiany właściwości struktury systemu wskutek wprowadzonych zmian konstrukcyjnych, remontów lub wymiany jego elementów składowych. Konieczne w takich przypadkach może być użycie metod pozwalających na identyfikację przyczyny zaistniałego stanu - np. istotnej postaci drgań w zakresie częstotliwości związanej z wymuszeniem eksploatacyjnym lub obecnością tzw. „słabego ogniwa" w systemie.

Powszechnie stosowanymi metodami, pozwalającymi na osiągnięcie wspomnianego celu, są metody eksperymentalnej analizy modalnej, zarówno w warunkach kontrolowanego wymuszenia, jak i tzw. operacyjna analiza modalna. Jednak, budowa modelu modalnego jest procesem subiektywnym, zależnym od sposobu wyznaczania funkcji przejścia, wyboru rozmieszczenia punktów pomiarowych i parametrów przetwarzania sygnałów pomiarowych, sposobu analizy tzw. diagramu stabilizacyjnego oraz wielu innych. Dlatego też, interesującą metodą walidującą wyniki analizy modalnej stanowią metody wizyjne, wykorzystujące amplifikację ruchu. W systemach tych obraz rejestrowany jest w wysokiej rozdzielczości, a następnie odpowiednio wzmacniany i poddawany filtracji, by zilustrować ruch przy określonej częstotliwości.

W artykule przedstawiono studium przypadku, polegające na ocenie stanu dynamicznego pompy wody zasilającej PZ z zastosowaniem wymienionych metod diagnostycznych. Wykazano zalety oraz ograniczenia związane z ich zastosowaniem. Przeprowadzono również analizę porównawcza uzyskanych rezultatów.

15. Zastosowanie metody Impulsowych Prądów Wirowych (PEC -Pulsed Eddy Current) do ujawniania ubytku materiału urządzeń ciśnieniowych

Autorzy: **Ireneusz Baran, Marek Nowak, Andrzej Wachowicz , Urząd Dozoru Technicznego, Warszawa**

Streszczenie**:** Metoda Impulsowych prądów wirowych (PEC - Pulsed Eddy Current) to technologia pozwalająca na ujawnianie ubytków materiału na skutek korozji lub innego zjawiska zwykle ukrytych pod warstwami izolacji. Jest to technologia, która umożliwia pomiar grubości ścianki, bez konieczności bezpośredniego kontaktu sondy z powierzchnią badaną. W innym przypadku metoda ta może być wykorzystywana do ujawniania ubytków materiału na urządzeniach bez izolacji ale, które do standardowych pomiarów wymagałyby większego nakładu na przygotowanie powierzchni do badania. W artykule zostaną przedstawione zweryfikowane przykłady wykorzystania mody do oceny ubytków korozyjnych izolowanego rurociągu gazowego DN 150oraz przykład badań rur ściany kotła. Badania przedstawione w artykule miały charakter przesiewowy i pozwoliły na wskazanie odcinków / elementów o znacznych ubytkach materiału i zostały potwierdzone standardowymi badaniami UTT. Na podstawie przeprowadzonych badań z wykorzystaniem metody PEC, Użytkownik podjął kroki zaradcze w celu uniknięcia awarii w trakcie eksploatacji urządzeń.

16. Wykrywanie wysokotemperaturowej korozji wodorowej (HTHA) technikami ultradźwiękowymi

Autorzy: **Radosław Hołownia, Michał Targoński, Urząd Dozoru Technicznego, Warszawa**

Streszczenie**:** Urządzenia ciśnieniowe przemysłu rafineryjno-petrochemicznego pracujące w środowisku wodoru w wysokiej temperaturze mogą ulegać degradacji w wyniku zjawiska nazywanego wysokotemperaturowym atakiem wodorowym (HTHA) lub korozją wodorową. Oddziaływanie wodoru na stale w wysokiej temperaturze może powodować znaczne osłabienie konstrukcji, co z kolei stwarza niebezpieczeństwo wystąpienia poważnej w skutkach awarii. Analizy mechanizmów degradacji prowadzone przez Urząd Dozoru Technicznego w ramach analiz Risk Based Inspection wskazuje na konieczność wykonywania badań takich urządzeń ukierunkowanych pod kątem detekcji HTHA. Degradacja wywołana HTHA najczęściej występuje w urządzeniach instalacji: reformingu katalitycznego, hydrorafinacji, izomeryzacji, wytwarzania amoniaku czy reformingu parowego. Możliwość wykrycia wczesnego etapu wysokotemperaturowego ataku wodorowego (HTHA) zapewnia zastosowanie odpowiednich technik ultradźwiękowych takich jak Phased Array, TOFD, TFM/FMC oraz użycie zoptymalizowanych głowic i układów skanowania. Do przeprowadzenia badania niezmiernie ważne jest także posiadanie odpowiednich próbek odniesienia ze sztucznymi reflektorami (FBH, nacięcie) oraz syntetycznymi próbkami HTHA. Ocena wyników polega na odpowiednim zakwalifikowaniu wskazań ultradźwiękowych noszących znamiona korozji wodorowej oraz określeniu wielkości i stopnia nasilenia względem opracowanych kryteriów ujętych w procedurze badania.

17. Możliwości wykrywania braku wtopienia w spoinie pachwinowej metodą MT

Autorzy: **Karolina Poch[1], Ryszard Krawczyk[2], Jacek Słania[3], [1)]PIK SPAW S.C, Częstochowa, [2)]Politechnika Częstochowska, [3)]Sieć Badawcza Łukasiewicz Instytut Spawalnictwa w Gliwicach**

Streszczenie**:** Złącza teowe ze spoiną pachwinową stanowią większość połączeń wykonywanych w elementach konstrukcyjnych. Ich odpowiedzialna rola, zwraca szczególną uwagę w kontekście kontroli dla potwierdzenia właściwego poziomu jakości. Głównym problemem pojawiającym się w złączach teowych ze spoinami pachwinowymi jest występowanie niezgodności typu brak wtopienia w powierzchnie elementów łączonych. Złącza ze spoinami pachwinowymi badane są najczęściej metodami powierzchniowymi co znacznie ogranicza ich właściwą ocenę, nie zapewniając wykrywania niezgodności objętościowych. W pracy przeprowadzono ocenę możliwości wykrycia niezgodności o charakterze objętościowym metodą magnetyczno-proszkową. Badania magnetyczno-proszkowe dają szerokie możliwości zastosowania w przypadku oceny elementów konstrukcyjnych w tym złączy spawanych charakteryzujących się trudnością z wykrywaniem powstałych nieciągłości. Biorąc pod uwagę powyższe, na szczególną uwagę zasługują właśnie złącza teowe ze spoiną pachwinową. Przeprowadzona analiza pozwoliła na określenie parametrów oraz warunków badania, umożliwiających wykrycie niezgodności braku wtopienia. Określono zależności pomiędzy parametrami badania oraz wymiarami analizowanych złączy. Ustalono warunki brzegowe dla wartości natężenia pola magnetycznego, przy których możliwe jest uzyskanie wskazań od zalegającej niezgodności braku przetopu w złączach teowych ze spoiną pachwinową.

18. Radiografia w bezpieczeństwie granic - prezentacja wyników projektu pt "CANIS - pierwszy polski skaner rtg do bezinwazyjnej inspekcji ładunków wielkogabarytowych na przejściach granicznych"

Autorzy: **Wojciech Dziewiecki, Barbara Ostrowska, Axel Sańczuk, PID Polska Sp. z.o.o, Warszawa**

Streszczenie**:** Systemy do skanowania cargo wchodzą w skład zintegrowanego systemu zapewniania bezpieczeństwa granic Polski oraz Unii Europejskiej. Jednym z kluczowych elementów systemu jest skaner rentgenowski, który pozwala na prześwietlanie obiektów przejeżdżających przez granicę. Skaner składa się ze źródła promieniowania (lampy rentgenowskiej lub liniowego akceleratora elektronów bądź betatronu) oraz detektora. W zależności od rodzaju technologii skanowania stosuje się skanowanie transmisyjne bądź odbiciowe. System CANIS został zaprojektowany jako skaner do transmisyjnego skanowania pojazdów na przejazdach granicznych, i występuje w dwóch wersjach: CANIS Rail (kolejowy) oraz CANIS Gantry/Portal (drogowy). Skanowanie transmisyjne następuje poprzez impulsowe wytwarzanie promieniowania wysokoenergetycznego za pomocą akceleratora liniowego, wyposażonego w wolframową tarczę konwersji, formowania wiązki promieniowania, jego transmitancję przez badany obiekt oraz rejestrację uzyskanej dawki promieniowania na detektorze liniowym. Poprzez przesuw obiektu względem skanera uzyskuje się kolejne linie dwuwymiarowego radiogramu, który jest obrabiany, archiwizowany na serwerze oraz prezentowany odbiorcy. Akcelerator liniowy wytwarza promieniowanie o naprzemiennej energii, dzięki czemu tworzone są dwa radiogramy – z zastosowaniem niższej oraz wyższej energii. Zastosowanie dwóch radiogramów o różnych energiach tego samego obiektu umożliwia uzyskanie obrazowania nie tylko transmitancji poszczególnych elementów badanego obiektu, ale i również rodzajów materiałów – np. lekkich (organicznych) i cięższych (nieorganicznych). Powyższe wyniki prac badawczych zostały wsparte finansowo w ramach Osi Priorytetowej I „Wykorzystanie działalności badawczo-rozwojowej w gospodarce", Działania 1.2 „Działalność badawczo-rozwojowa przedsiębiorstw", Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Mazowieckiego na lata 2014-2020, współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, na podstawie Umowy o dofinansowanie nr RPMA.01.02.00-14-9539/17-00, pt. „CANIS - pierwszy polski skaner RTG do bezinwazyjnej inspekcji ładunków wielkogabarytowych na przejściach granicznych".

19. Uszkodzenia przeciwciężarów wałów wykorbionych: przyczyny i symptomy

Autorzy: **Bielawski Piotr Jan, prof. em. Akademii Morskiej w Szczecinie**

***Streszczenie*:** Wszystkie wały wykorbione maszyn tłokowych wyposażone są w przeciwciężary równoważące siły bezwładności pierwszego rzędu tłoków i korbowodów. Przeciwciężary z jednej strony bardzo rzadko ulegają uszkodzeniom z drugiej strony uszkodzenie przeciwciężarów skutkuje uszkodzeniem wału wykorbionego i dalej uszkodzeniem całej maszyny. W literaturze brak jest opisów uszkodzeń przeciwciężarów. Przeprowadzono analizę uszkodzeń przeciwciężarów uszkodzonego okrętowego silnika spalinowego. Ustalono mechanizm uszkodzeń przeciwciężarów, przeprowadzono badania nieniszczące uszkodzonych przeciwciężarów i ustalono przyczyny uszkodzeń. Zbudowano model relacji diagnostycznych i wskazano na możliwość identyfikacji potencjału eksploatacyjnego przeciwciężarów niepracującej maszyny oraz wskazano na możliwość wykorzystania drgań wzdłużnych wału w diagnozowaniu przeciwciężarów.

20. Wybrane aspekty badań ultradźwiękowych złączy spawanych materiałów różnorodnych

Autorzy: **Łukasz Rawicki[1], Jacek Słania[1], Ryszard Krawczyk[2], [1)]Sieć Badawcza Łukasiewicz Instytut Spawalnictwa w Gliwicach, [2)]Politechnika Częstochowska**

***Streszczenie*:** W budowie maszyn, czy w elementach urządzeń przemysłowych zachodzi często konieczność łączenia metodami spawalniczymi materiałów różniących się znacznie swoimi właściwościami fizycznymi Połączenia różnorodne znajdują często zastosowanie w urządzeniach energetycznych, instalacjach chemicznych czy reaktorach. Przykładowo w kotłach energetycznych rury na wymienniki ciepła pracujące w bardzo wysokiej temperaturze wykonywane są ze stali austenitycznych i łączone z elementami instalacji wykonanych ze stali ferrytycznych. Stale austenityczno-ferrytyczne oraz stale typu duplex wykorzystywane są przy budowie chemikaliowców. Elementy konstrukcyjne w złączach z elementami zbiorników wykonanych ze stali typu duplex stanowią połączenia różnorodne, na przykład ze stalą węglową o podwyższonej wytrzymałości. W przypadku połączeń różnorodnych problemem w przeprowadzeniu badań ultradźwiękowych są różne właściwości fizyczne poszczególnych stref złącza spawanego związane z warunkami w jakich te badania zostaną wykonane. Przykładowo przy badaniu metodą UT stali austenitycznej problemem jest transformacja fali, ograniczone wykrywanie podpowierzchniowych nieciągłości spawalniczych oraz nieprawidłowe sprzężenie spowodowane nierównością powierzchni. Gruboziarnista struktura powoduje rozpraszanie i tłumienie fali oraz zmianę jej kierunku. Tłumienie wpływa na amplitudę ciśnienia fali rozchodzącej się w materiale, która maleje wraz ze wzrostem odległości od głowicy. W przypadku złączy różnorodnych będą występowały różnice w wartościach mierzonej amplitudy w poszczególnych obszarach tego złącza. Głównymi przyczynami ograniczenia wykrywania nieciągłości są procesy rozpraszania i rozbieżności wiązki, a straty te związane są ze strukturą materiału. Zjawiska te są szczególnie istotne w przypadku badania złączy różnorodnych.

21. Personel nadzoru i kontroli przy pracach antykorozyjnych i izolerskich –wybrane aspekty

Autorzy: **Jerzy Kozłowski, Jakub Kozłowski, SLV-GSI Polska Sp. z o.o., Zabrze**

***Streszczenie*:** W referacie zwrócono uwagę na potrzebę zapewnienia zdolności użytkowej konstrukcji przez wymagany okres trwałości. Zapewnienie to może być dotrzymane tylko wtedy, gdy w realizację konstrukcji zaangażowany jest kompetentny personel. Wskazano na właściwe stosowanie norm przywołanych w wymaganiach kontraktu oraz na właściwą interpretację konieczności stosowania wymagań zawartych w normach. Odniesiono się do wybranych aspektów związanych kwalifikacjami i kompetencjami personelu w pracach antykorozyjnych i izolerskich. Zwrócono uwagę na pojęcia związane z kwalifikacjami i kompetencjami. Dokonano analizy zapisów norm w odniesieniu do wymagań dla personelu. Stwierdzono, że w wielu przypadkach wymagania te opisane są w normach w sposób bardzo ogólny. Dlatego też właściwym jest określanie w warunkach kontraktu pełnych i zrozumiałych dla wszystkich zainteresowanych stron kontraktu, wymagań odnośnie kwalifikacji i kompetencji personelu. Brak takich uzgodnień może prowadzić do nieporozumień pomiędzy stronami kontraktu. Przedstawiono przykłady szkoleń pozwalających podnieść poziom kompetencji personelu, a także propozycje niezależnych certyfikacji firm z zakresu antykorozji. Pokazano jako przykład, stosowane w Norwegii uregulowania dotyczące wymagań dla personelu antykorozji i izolacji. Zwrócono uwagę na możliwość uzyskania na rynku polskim międzynarodowych certyfikatów personelu i firm FRSIO.

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

Autorzy: **Marcin Lewandowski[1], Jakub Rozbicki[1], Hanna Smach[1], Piotr Karwat[1], Arkadiusz Szczurek[2], Jolanta Sala[2], Alicja Bera[2], [1)]Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, [2)] Baltic Operator Sp. z o.o.**

***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 przebadanie 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 danym FMC

z prędkością do 100 mm/s. Celem projektu jest wdrożenie nowoczesnych i ekonomicznych rozwiązań badań nieniszczących, które zapewnią ocenę jakości 100% długości spawu.

23. Wykrywanie wad w strukturach cienkościennych z wykorzystaniem estymacji lokalnej liczby falowej ultradźwiekowych fal prowadzonych

Autorzy: **Jakub Spytek, Kajetan Dziedziech, Łukasz Pieczonka, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie**

Streszczenie**:** W referacie przedstawiono nowatorską technikę badań nieniszczących struktur cienkościennych bazującą na estymacji lokalnej liczby falowej ultradźwiękowych fal prowadzonych. Technika bazuje na wzbudzeniu fal ultradźwiękowych w jednej lokalizacji i rejestracji odpowiedzi drganiowych na siatce punktów w obszarze zainteresowania z wykorzystaniem skanującego wibrometru laserowego. Wzbudzenie może być zrealizowane bezkontaktowo za pomocą impulsu lasera, bądź kontaktowo za pomocą przetwornika piezoelektrycznego. Sposób działania i skuteczność metody zilustrowano na przykładzie jednorodnej płyty aluminiowej oraz niejednorodnej warstwowej płyty kompozytowej.

24. Określenie stopnia wyczerpania struktury i własności mechanicznych wybranych elementów rurociągów pary w elektrociepłowni

Autorzy: **Dariusz Mężyk, Bogdan Zając, Grzegorz Olszewski, Marcin Kowal, Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Otwock**

Streszczenie**:** W artykule omówiono główne czynniki wpływające na awaryjność układów rurociągów bloków energetycznych krajowych elektrowni i elektrociepłowni. Ze względu na warunki pracy i związane z nimi obciążenia najistotniejsze znaczenie mają rurociągi pary, a głównie ich elementy kształtowe (kolana, trójniki, czwórniki, mieszacze pary, zasuwy główne). Wymieniono podstawowe metody oceny stanu technicznego głównych elementów rurociągów zarówno metodami badań nieniszczących jak i niszczących. W artykule skoncentrowano się na wynikach oceny odcinka kolana (prostki) φ =508 x 20 ze stali 10H2M pobranego z rurociągu pary wtórnie przegrzanej o sumarycznym czasie pracy około T = 280 000 godzin.

25. Przykłady badań nieniszczących w Laboratorium Badań Materiałowych

Autorzy: **Marcin Kowal, Grzegorz Olszewski, Bogdan Zając, Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Otwock**

Streszczenie**:** Na plakacie przedstawiono przykłady metod badań nieniszczących zastosowanych w pracach zleconych oraz badaniach naukowych w Pracowni Badań Nieniszczących Laboratorium Badań Materiałowych. Szczególnie interesujące przykłady to zastosowanie metod NDT w ekspertyzach materiałowych oraz w pracach na rzecz Reaktora Maria.

26. Badania Nieniszczące w Laboratorium Badań Materiałowych

Autorzy: **Grzegorz Olszewski, Bogdan Zając, Marcin Kowal Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Otwock**

Streszczenie**:** Plakat będzie przedstawiał aktualnie wykorzystywane metody badań nieniszczących w Laboratorium Badań Materiałowych. Metody NDT zostaną streszczone z przedstawieniem ich wad i zalet. Dodatkowo zamieszczone zostaną uprawnienia dla metod akredytowanych oraz zakres uprawnień personelu. Na plakacie zostaną przedstawione zdjęcia posiadanej przez LBM aparatury z opisem możliwości wykonywanych badań.

27. Metoda zapisu magnetycznego do badania materiałów ferromagnetycznych

Autorzy: **Ryszard Łukaszuk, Tomasz Chady, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie**

Streszczenie**:** Stal to szeroko rozpowszechniony materiał konstrukcyjny. Dzięki korzystnym właściwościom (dobra spawalność i obrabialność, wysoka wytrzymałość, prostota i szybkość montażu) znalazł on zastosowanie m.in. w przemyśle stoczniowym, kosmicznym, budowlanym i energetycznym. Jednak stal ma ograniczoną wytrzymałość na naprężenia. Mogą one doprowadzić do uszkodzenia struktury, powstania defektów i w efekcie przyczynić się do awarii katastrofalnej i zagrożenia bezpieczeństwa. Struktura stali może być zaburzona już na etapie produkcji. Dodatkowo, w związku z założeniami porozumień paryskich i konieczności zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych, wprowadzono modyfikacje w produkcji stali, polegające na zmniejszeniu grubości lub powierzchni przekroju poprzecznego wyrobów. Z tych powodów należy regularnie wykonywać badania nieniszczące konstrukcji stalowych. W tym celu stosuje się takie techniki jak metoda prądów wirowych, metoda strumienia rozproszenia, metoda obserwacji pętli histerezy, metoda termograficzna. W fazie rozwojowej znajduje się metoda zapisu magnetycznego (magnetic recording method, MRM). MRM polega na wytworzeniu w stalowym komponencie namagnesowania o charakterze zbliżonym do sinusoidy. Następnie wykonuje się pomiar namagnesowania a jego wynik zachowuje się jako odniesienie. W trakcie eksploatacji pomiar namagnesowania się powtarza, a jego zmiany pozwalają na ocenę naprężenia jakiemu poddany został element badany. Referat przedstawia wyniki badania stali S355 z wykorzystaniem metody MRM.

28. Badania nieniszczące kompozytów wzmacnianych włóknami węglowymi metodą prądów wirowych

Autorzy: **Ryszard Łukaszuk, Tomasz Chady, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie**

Streszczenie**:** Kompozyty należą do dynamicznie rozwijającej się grupy materiałów. Proces ich wytwarzania polega na łączeniu ze sobą materiałów o odmiennych właściwościach fizycznych i chemicznych. Niewątpliwą zaletą struktur kompozytowych jest ich duża wytrzymałość w porównaniu z grubością, odporność na

korozję, stosunkowo niewielki koszt produkcji i duża konfigurowalność właściwości w zależności od zakładanego wykorzystania. Dzięki temu możliwe stało się ich powszechne wykorzystanie nie tylko w różnych sektorach nowoczesnego przemysłu, takich jak energetyka, motoryzacja, budownictwo, przemysł kosmiczny czy stoczniowy, ale także w sektorze usług medycznych (biomedycyna). Wytrzymałość kompozytów jest jednak ograniczona: kompozyty mogą ulec uszkodzeniu zarówno w procesie produkcyjnym, jak i w trakcie późniejszej eksploatacji. Do niejednorodności mogących wystąpić w kompozytach należą: wtrącenia, pęknięcia, delaminacje, nierównomierny rozkład włókien lub przesunięcia między nimi, zawilgocenia, pustki. W celu uniknięcia kosztów wynikających z awarii oraz wyeliminowania ewentualnego zagrożenia zdrowia ludzkiego konieczne jest poddawanie struktur kompozytowych okresowym badaniom nieniszczącym. Z uwagi na anizotropowość kompozytów i ich odmienność od używanej już od wielu lat stali czy stopów aluminiowych, niezbędne jest dostosowanie istniejących technik badań nieniszczących do wymagań kompozytów. Referat prezentuje wykorzystanie metody prądów wirowych do nieniszczącego testowania kompozytów wzmacnianych włóknami węglowymi.

29. Analiza porównań biegłości badania złącza spawanego

Autorzy: **Marek Śliwowski, NDTEST Sp. z o.o., Warszawa**

Streszczenie**:** Analizę przeprowadzono na podstawie 2 programów badania biegłości autoryzowanych przez klub POLLAB w ramach sekcji BADAŃ MATERIAŁOWYCH oraz programu badań między laboratoryjnych organizowanego przez firmę NDTEST. W roku 2019 zostały zainicjowane programy biegłości badań nieniszczących takiej samej próbki złącza spawanego: radiograficzną techniką błonową - PT 11/19-20 – RTF [1]; ultradźwiękową techniką ręczną - PT 12/19-20 – UTman. [2]; ultradźwiękową techniką phased-array - ILC 2/19-20 – UT-PA [3]. Programy zrealizowano z udziałem ponad 30 laboratoriów w okresie około 2 lat ze względu na znane ograniczenia obiektywne. Analiza, przeprowadzona na podstawie sprawozdań końcowych dla każdego z programów, dotyczyła wybranych wskazań nieakceptowanych, scharakteryzowanych przez istotne parametry ich lokalizacji i rozmiarów. Badania biegłości pozwoliły ocenić „odległość" wyników uzyskiwanych różnymi metodami/technikami badawczymi przez poszczególne laboratoria, przywoływane tu w formie losowo przydzielonych kodów. Ocena opierała się na opracowaniach statystycznych, dobrze ugruntowanych w tego typu badaniach biegłości. Niezależnie porównano również niektóre parametry wad, określane niezależnie dwoma objętościowymi metodami badań nieniszczących. Wnioski trzech programów biegłości w obszarze badań nieniszczących stanowią bardzo istotny wkład w rozwój laboratoriów badawczych, w kontekście wiarygodności uzyskiwanych wyników badania

30. Praktyczne aspekty ultradźwiękowego badania kompozytów wzmacnianych włóknem węglowym w sprzężeniu powietrznyma

Autorzy: **Patrycja Pyzik, Łukasz Ambroziński, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie**

Streszczenie**:** Badania ultradźwiękowe prowadzone w sprzężeniu powietrznym (ang. Air-coupled ultrasounic testing ACUT) pozwalają na potencjalne rozwiązanie wielu problemów występujących w zautomatyzowanych systemach do skanowania. W tym referacie omówione zostaną praktyczne aspekty implementacji metody ACUT do badania kompozytów wzmacnianych włóknem węglowym w osnowie epoksydowej. Przedstawione zostaną podstawowe ograniczenia tej techniki, a także omówione zostanie jak te ograniczenia przekładają się na wymagania dotyczące przetworników, wzmacniaczy oraz pozostałych komponentów służących do budowy systemów ACUT. Ponadto, omówione zostanie stanowisko wykorzystujące konwencjonalny pulser z przedwzmacniaczem zdolny obrazować wtrącenia we wzorcu kompozytowym.

31. Monitorowanie granicy połączenia powłoki adhezyjnej z podłożem stalowym za pomocą ultradźwiękowej fali Rayleigh'a

Autorzy: **Dariusz Ulbrich, Politechnika Poznańska**

Streszczenie**:** W artykule przedstawiono wyniki badań monitorowania stanu połączenia powłoki adhezyjnej z podłożem stalowym za pomocą ultradźwiękowej fali powierzchniowej. Stan połączenia był kontrolowany przez cały okres jego istnienia (life cycle), od momentu nałożenia powłoki na blachę karoseryjną, przez proces jej wiązania z podłożem stalowym, aż do całkowitej degradacji rozumianej jako odspojenie powłoki od blachy stalowej. Jako parametry monitorowania stanu zastosowano wzmocnienie impulsu ultradźwiękowej fali powierzchniowej, jak również parametry widma amplitudowo-częstotliwościowego. Zaobserwowano, że wzmocnienie impulsu fali jak również częstotliwość maksymalna korelują ze zmianami na granicy połączenia powłoki adhezyjnej z podłożem stalowym.

32. Badania właściwości kleju hybrydowego CX80 z wykorzystaniem ultradźwiękowej metody nieniszczącej

Autorzy: **Kowalczyk Jakub[1], Nadera Dariusz[2]**
1) Politechnika Poznańska, 2) Cx-80 Polska Agata Nadera, Dariusz Nadera Spółka Komandytowa

Streszczenie**:** Klejenie to jedna z najstarszych metod łączenia. Znajduje szczególnie szerokie zastosowanie w obszarze budowy środków transportu drogowego (pojazdy samochodowe, naczepy, przyczepy, autobusy). W budowie pojazdów spotyka się kleje o wysokiej wytrzymałości – epoksydowe, kleje odporne na promieniowanie UV – MSPolimery, kleje poliuretanowe – o niższej wytrzymałości. W publikacji przedstawiono wyniki prac w czasie których wykorzystując nieniszczącą metodę ultradźwiękową badano wytrzymałość innowacyjnego kleju hybrydowgo firmy CX80 Hybricx 75. Badania prowadzono z wykorzystaniem defektoskopu GE Krautkramer USM35XS a miarą jakości był decybelowy spadek wysokości impulsów z obszaru połączenia

adhezyjnego. Badaniom poddano sklejone krążki stalowe, a w pracach wykorzystano kleje dostarczone przez producenta wykonane wg różnych receptur. Po pełnym związaniu połączenia klejowego było one badane z wykorzystaniem metody ultradźwiękowej a następnie w sposób niszczący na maszynie wytrzymałościowej. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że połączenie metody ultradźwiękowej oraz wytrzymałościowej jest uzasadnione w przypadku tworzenia nowej receptury kleju, szczególnie w obszarze oceny rozrzutu jakości utworzonego połączenia. Zauważono wyraźny spadek wartości decybelowego spadku impulsów wraz ze wzrostem wytrzymałości połączenia klejowych. Badania sfinansowano w ramach projektu „Opracowanie innowacyjnego produktu - kleju do łączenia elementów naczep oraz przyczep samochodowych Hybricx 75" dofinansowanego z „Działanie 1.2 „Wzmocnienie potencjału innowacyjnego przedsiębiorstw Wielkopolski" Wielkopolski Regionalny Program Operacyjny na lata 2014-2020.

33. Obserwacja wpływu deformacji cienkich struktur magnetycznych na dynamikę procesu magnesowania

Autorzy: **Grzegorz Psuj[1], Michał Maciusowicz[1], Konrad Kwiatkowski[2], 1) Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, 2) Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki,**

***Streszczenie*:** Badanie wpływu naprężeń i odkształceń na właściwości materiałów magnetycznych jest jednym z kluczowych zagadnień współczesnej inżynierii. Jednym ze sposobów badania często złożonych relacji jest obserwacja dynamiki namagnesowania. Na proces ten w materiałach magnetycznych wpływa szereg czynników związanych z ich właściwościami mikro- i makrostrukturalnymi. Z tego powodu obserwacja charakterystyk związanych z procesem magnesowania umożliwia analizę stanu struktur magnetycznych. Istnieje wiele metod obserwacji dynamiki procesu magnesowania. W ujęciu makroskopowym metody te mogą odnosić się m.in. do obserwacji pętli histerezy czy efektu Barkhausena. Natomiast w zakresie charakteryzacji w mikroskali znajdują zastosowanie m.in. metody oparte na zjawiskach rezonansowych, a w przypadku materiałów magnetycznych szczególnie na rezonansie ferromagnetycznym FMR. W niniejszym artykule przedstawione zostaną rezultaty obserwacji procesu magnesowania cienkich struktur magnetycznych ze stali niskowęglowej uzyskane w oparciu o wymienione powyżej zjawiska. Badania przeprowadzono dla serii próbek o różnym stopniu odkształcenia. Wykorzystanie wybranych metod badawczych umożliwia obserwację procesu magnesowania w kontekście szerokiego spektrum częstotliwości pola magnetycznego, co może być korzystne dla budowania wiedzy w procesie poznawczym zachodzących zmian w strukturze materiałów. Zaprezentowane w pracy badania zostały częściowo sfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu badawczego „Zbadanie wpływu lokalnych odkształceń materiału na zjawisko szerokopasmowego rezonansu ferromagnetycznego w stalach niskowęglowych", nr grantu 2019/ 03/X/ST7/01634.

34. Wpływ cienkiej warstwy dielektrycznej na częstotliwości rezonansowe metapowierzchni terahercowej bazującej na prostokątnym rezonatorze SRR

Autorzy: **Przemysław Łopato[1], Michał Herbko[1], Urlich Mescheder[2], Andras Kovacs[2], Alexander Filbert[2] , 1) Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, 2) Furtwangen University, Germany**

***Streszczenie*:** Fale elektromagnetyczne w zakresie terahercowym znajdują coraz szersze zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, w tym w badaniach nieniszczących materiałów dielektrycznych. Jednym ze sposobów pomiarów właściwości bardzo cienkich warstw dielektrycznych jest zastosowanie układów rezonansowych, do których w pewnym sensie zaliczyć można metapowierzchnie (sztuczne, projektowane przez człowieka materiały 2D, których właściwości elektromagnetyczne można zaprojektować). W pracy przebadano metapowierzchnię terahercową bazującą na prostokątnym rozdzielonym rezonatorze pierścieniowym (ang. split ring resonator, SRR), do której zbliżono cienką (rzędu mikrometrów) warstwę dielektryczną (np. taśmę czy folię dielektryczną). Spowodowało to przesunięcie częstotliwości rezonansowych badanej struktury. W pracy zbadano również wpływ odległości warstwy od metapowierzchni, jej grubości oraz przenikalności dielektrycznej na uzyskiwane przesunięcia częstotliwości rezonansowych. Badania przeprowadzone w ramach projektu nr PPN/BDE/2021/1/00012/U/00001 współfinansowanego przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej NAWA oraz German Academic Exchange Service (DAAD, Germany).

35. Badania nieniszczące dielektrycznych struktur wytwarzanych addytywnie z zastosowaniem elektromagnetycznych metod wysokich częstotliwości i głębokiego uczenia maszynowego

Autorzy: **Barbara Grochowalska, Grzegorz Psuj, Przemysław Łopato , Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie**

***Streszczenie*:** Wytwarzanie addytywne (przyrostowe) to obecnie jedna z najszybciej rozwijających się technologii, znajdująca szerokie zastosowanie w wielu obszarach produkcyjnych. Optymalizacja właściwości wytwarzanych nowoczesnych struktur wymaga stosowania metod umożliwiających z jednej strony znaczne skrócenie czasu prototypowania poprzez zmniejszenie złożoności procesów produkcji, a z drugiej strony gwarantujących większą elastyczność w realizacji opracowanych rozwiązań. Tym charakteryzuje się technologia druku przestrzennego, a jej coraz powszechniejsze wdrażanie w wielu obszarach umożliwia znaczne przyśpieszenie przebiegu procesu od koncepcji do realizacji. Z uwagi na stosunkowo łatwą implementację rozwiązań szczególnie rozwinięte są technologie wytwarzania wykorzystujące materiały o właściwościach dielektrycznych. Z uwagi na właściwości elektromagnetyczne, ale i cieplne znakomitej większości stosowanych powszechnie materiałów, potencjalną grupę metod do bieżącej inspekcji tak wytwarzanych struktur stanowią te wykorzystujące pole elektromagnetyczne. W niniejszym artykule

przedstawiamy wyniki inspekcji struktur wytworzonych techniką druku 3D z zastosowaniem glikolu politereftalanu etylenu (PETG) czy terpolimeru akrylonitrylo-butadieno-styrenowego (ABS). Badania przeprowadzono dla serii próbek zawierających sztucznie wykonane defekty przy użyciu wybranych metod elektromagnetycznych wysokich częstotliwości, tj. termografii podczerwonej i obrazowania terahercowego. Techniki te umożliwiają wykorzystanie zarówno właściwości termicznych jak i elektromagnetycznych badanych obiektów do oceny ich struktury wewnętrznej i obrazowania występujących ich niejednorodności. W pracy wykorzystano algorytmy uczenia maszynowego w tym dynamicznie rozwijane techniki głębokiego uczenia do opracowania na bazie wyników numerycznych i eksperymentalnych procedur automatycznego wykrywania niejednorodności.

36. Badania ultradźwiękowe połączeń klejowych materiałów wykonywanych w technologii przyrostowe

Autorzy: **Jakub Kowalczyk, Daniel Wieczorek, Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu**

Streszczenie: Połączenia klejone znajdują szerokie zastosowanie w budowie maszyn i pojazdów samochodowych. Producenci zastępują klasyczne metody (np. zgrzewanie) połączeniami klejowymi ze względu na brak uszkodzeń struktury materiału w obszarze złącza. Na etapie produkcji coraz częściej stosuje się technologię wytwarzania przyrostowego. Głównym celem badań było określenie korelacji pomiędzy wytrzymałością połączenia adhezyjnego elementów wytworzonych technologią przyrostową a parametrami propagacji fali ultradźwiękowej w obszarze połączenia klejowego. Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych z materiału AlSiMg0,6 oraz kleju strukturalnego. Dodatkowe badania ultradźwiękowe materiałów wykonanych w technologii przyrostowej potwierdziły odmienne właściwości akustyczne w stosunku do aluminium wytwarzanego standardowym procesem odlewania lub wytłaczania. Badania sfinansowano w ramach Projektu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju DWP/TECHMATSTRATEG-III/136/2020.

INFORMACJE BNiD

70 rocznica urodzin Profesora Zinowija Teodorowicza Nazarchuka

W bieżącym roku, 12 kwietnia minęła 70-ta rocznica urodzin wybitnego ukraińskiego naukowca Profesora Zinowija Teodorowicza Nazarchuka zajmującego się fizyką zjawisk wykorzystywanych w badaniach nieniszczących i diagnostyce technicznej.

Całe jego naukowe życie związane jest z National Academy of Sciences of Ukraine (NASU), (www.nas.gov.ua). W placówkach NASU rozpoczynał karierę od stanowiska starszego inżyniera aż do objęcia w 2015 r. posady dyrektora Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (www.ipm.lviv.ua). Od roku 2006 jest przewodniczącym Western Science Center of NASU and Ministry of Education and Science of Ukraine (www.znc.com.ua) i członkiem Prezydium NASU.

Profesor Z. T. Nazarchuk, członek rzeczywisty NASU, zapoczątkował nowy kierunek badań nad wykrywaniem defektów międzyfazowych w cienkich warstwach kompozytów, oparty na zjawisku ich rezonansowego oddziaływania z falami sprężystymi. Do rozwoju tej metody stworzono niezbędne podstawy teoretyczne, które obejmowały wprowadzenie nowych modeli do analizy zjawisk dyfrakcyjnych. Przeprowadzono także badania właściwości spektralnych i możliwości uzyskanie na ich podstawie informacji o wielkości i lokalizacji defektów (pęknięć i innych wad materiału). W grupie naukowców pod jego przewodnictwem odkryto nowe zjawisko fizyczne związane ze wzrostem intensywności i liczby gwałtownych przemieszczeń ścian domenowych podczas quasi-statycznego przemagnesowania stali ferrytyczno-perlitycznych nasyconych wodorem. Korelacja pomiędzy wynikami uzyskiwanymi z badań emisji akustycznej, a zmianami właściwości magnetycznych pozwoliła na opracowane bardziej jednoznacznych kryteriów oceny stanu materiałów konstrukcyjnych. Nakreślono w ten sposób nowy paradygmat metodyki badań ważnych obiektów inżynierskich w trakcie ich eksploatacji.

Profesor Zinowij Nazarchuk osiągnął znaczące wyniki w badaniu interakcji fal o różnej naturze fizycznej ze strukturami zawierającymi defekty. W opracowanych przez niego metodach matematycznych wykorzystano procedury regularyzacyjne do rozwiązywania zagadnień brzegowych z zakresu teorii dyfrakcji, co umożliwiło po raz pierwszy w szerokim zakresie uwzględnienie zjawisk wywołanych oddziaływaniem złożonych profili cienkich dyfuzorów, a w szczególności ich krawędzi. W ramach tych badań przebadano wpływ współczynnika kształtu na cechy rozpraszania rezonansowego poszczególnych ekranów. Wyniki te wykorzystano jako teoretyczną podstawę nowoczesnych technologii diagnostycznych. Profesor Nazarchuk opracował szereg nowych podejść do rozwiązania problemów odwrotnych w zakresie zjawisk dyfrakcji, które pozwoliły na stworzenie nowych metod diagnozowania dielektryków za pomocą fal elektromagnetycznych dużych częstotliwości. Badania przez niego zainicjowane kontynuują jego wychowankowie. Szkoła naukowa Profesora Nazarchuka obejmuje zespół pięciu doktorów habilitowanych i siedmiu doktorów.

Profesor Nazarchuk jest autorem szeregu wynalazków, 15 monografii (znanych również w Polsce) i ponad 370 prac w czasopismach naukowych. Podkreślić należy jego wysoką aktywność naukową i organizacyjną w Prezydium Towarzystwa Naukowego Szewczenki we Lwowie i w Zarządzie Ukraińskiego Towarzystwa Mechaniki Pękania Materiałów. Był także przewodniczącym rady eksperckiej Wyższej Komisji Atestacyjnej Ukrainy i przewodniczącym sekcji Komitetu Nagród Państwowych Ukrainy w dziedzinie nauki i techniki. Jest współredaktorem International Series of Monographs on Advanced Electromagnetics (Science House, Tokio), a także redaktorem naczelnym międzynarodowych czasopism „Materials Science" i „Information extraction and processing". Od wielu lat jest członkiem rad redakcyjnych wielu międzynarodowych czasopism naukowych wydawanych na Ukrainie i za granicą (w tym Badania Nieniszczące i Diagnostyka).

Dowodem znaczącego wkładu Profesora Nazarchuka w rozwój nowoczesnego materiałoznawstwa i fizyki badań nieniszczących jest przyznanie wysokich państwowych odznaczeń i nagród NASU. Między innymi został odznaczony honorowym tytułem „Zasłużonego Pracownika Nauki i Techniki Ukrainy" oraz Orderem Zasługi I, II i III stopnia. Jest długoletnim członkiem Międzynarodowej Unii Nauk Radiowych (URSI) i Międzynarodowej Akademii Elektromagnetycznej, a także członkiem seniorem IEEE. W latach 1996-2004 prowadził wykłady na uniwersytetach w Japonii.

Redakcja i członkowie Międzynarodowej Rady Programowej czasopisma Badania Nieniszczące i Diagnostyka (Nondestructive Testing and Diagnostics) składają z okazji 70 urodzin serdecznie życzenia dobrego zdrowia, wszelkiej pomyślności i twórczej długowieczności.

Materiał został opracowany między innymi na podstawie publikacji w Physico-Chemical Mechanics of Materials (Nr 2, str. 127 - 128, 2022)

Informacje dla Autorów i Czytelników

PROFIL CZASOPISMA

Kwartalnik „Badania Nieniszczące i Diagnostyka" jest czasopismem naukowo-technicznym Wydawanym przez Stowarzyszenie Inżynierów Mechaników Polskich w Warszawie we współpracy z Towarzystwem Badań Nieniszczących.

Odbiorcami czasopisma są specjaliści, ośrodki naukowe, dydaktyczne i organizacje gospodarcze zainteresowane problematyką określoną w tytule czasopisma. Czasopismo jest wysyłane również do ważnych ośrodków zagranicznych zainteresowanych tą tematyką.

Czasopismo wydawane jest w języku polskim i jest dostępne głównie w wersji elektronicznej w internecie (do roku 2020 ukazywało się również w wersji drukowanej). Artykuły publikowane w języku polskim mają dodatkowo streszczenia oraz opisy rysunków i tabel w języku angielskim. Wybrane artykuły naukowe publikowane są w języku angielskim.

W czasopiśmie „Badania Nieniszczące i Diagnostyka" są publikowane oryginalne komunikaty i artykuły dotyczące:

- metodologii badań,
- certyfikacji w badaniach,
- charakterystyki urządzeń, sprzętu, materiałów i systemów w badaniach nieniszczących,
- diagnostyki,
- szkoleń, przepisów i normalizacji,
- praktyki badań w przemyśle i poradnictwa technicznego,
- wydarzeń, karier zawodowych specjalistów i ich doświadczeń zawodowych.

WSKAZÓWKI DLA AUTORÓW

Objętość artykułu powinna wynosić do 10 stron, a komunikatu 1 ÷ 4 stron wydruku komputerowego na arkuszu formatu A4 bez tabulatorów i wcięć, czcionka Times New Roman 12, marginesy górny, dolny, lewy i prawy - 2,5 cm.

Rysunki i tablice z ich tytułami winny być umieszczane w tekście. Rysunki, wykresy i fotografie należy nazywać rysunkami (np. Rys. 1), a tablice (np. Tab. 3) i numerować cyframi arabskimi.

Opisy znajdujące się na rysunkach oraz grubość linii powinny mieć wielkość umożliwiającą zmniejszenie rysunku do 30%. Maksymalna szerokość rysunku jednoszpaltowego wynosi 8,5 cm, natomiast dwuszpaltowego 17,5 cm.

Rysunki wykonane komputerowo winny być w oddzielnych plikach w formacie JPEG min. 300 DPI.

Jednostki - układ SI.

Artykuł powinien zwierać:

- informacje o autorach: stopnie naukowe lub zawodowe, instytucja i zdjęcia (w osobnym pliku);
- imię i nazwisko;
- tytuł artykułu;
- streszczenie (do 0,5 strony) z informacją dotyczącą problematyki artykułu, metodyki badań, obliczeń lub analizy problemu oraz wyniku końcowego;
- tekst wraz z podziałem na zatytułowane rozdziały;
- wnioski końcowe;
- wykaz literatury; pozycje literatury numerowane cyframi arabskimi w kwadratowych nawiasach i w kolejności cytowanej w tekście.

Artykuły w formie pliku Word należy przysłać na adres e-mail: wydawnictwo@ptbnidt.pl wraz z wypełnionym drukiem „Zgłoszenie publikacji" dostępnym na naszej stronie www: www.bnid.pl.

OGŁOSZENIA I ARTYKUŁY PROMOCYJNE

Ogłoszenia i artykuły promocyjne w kwartalniku "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" – czasopiśmie ogólnopolskim dostępnym w formie drukowanej (do 2020r.) i elektronicznej na naszej stronie internetowej docierają do szerokiej grupy specjalistów.

W czasopiśmie zamieszczane są kolorowe i czarno-białe: ogłoszenia reklamowe na okładkach lub wewnątrz numeru oraz wrzutki dostarczane przez zleceniodawcę; artykuły techniczno-informacyjne jak również informacje o wydarzeniach oraz imprezach naukowo-technicznych. Cennik i forma ogłoszeń dostępne są na naszej stronie www: www.bnid.pl.

PRENUMERATA

Prenumerata realizowana jest przez Redakcję. Kontakt i zamówienia pod adresem mailowym: wydawnictwo@bnid.pl.