

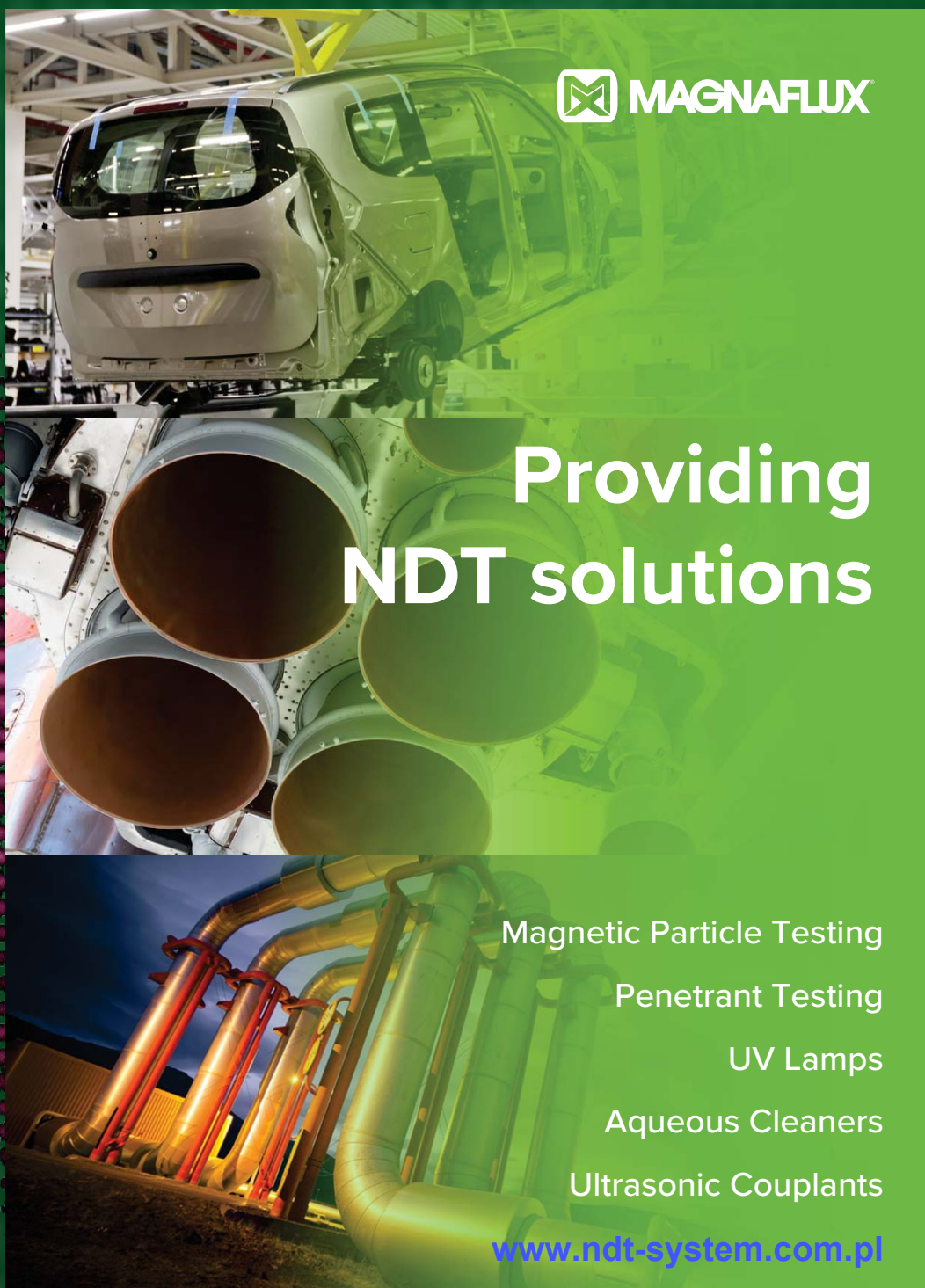
Badania Nieniszczące 1 - 4 / 2023 i Diagnostyka

Kwartalnik Naukowo-Techniczny

Nondestructive Testing and Diagnostics

50. KKBN

www.kkbn.pl



 **MAGNAFLUX**

**Providing
NDT solutions**

- Magnetic Particle Testing
- Penetrant Testing
- UV Lamps
- Aqueous Cleaners
- Ultrasonic Couplants

www.ndt-system.com.pl

DXR75P-HR

Mały system obrazowania o najwyższej rozdzielczości do krytycznych zastosowań

Detektor DXR75P-HR daje wysoką rozdzielczość pikseli 75 μm , wymaganą do rozróżnienia drobnych szczegółów w krytycznych zastosowaniach. Detektor obejmuje kontrolę spoin klasy B według ISO 17636-2, dając precyzyjne obrazy spełniające najostrejsze wymagania.



Dzięki małej szerokości detektor jest idealny do tworzenia obrazów w sytuacjach o ograniczonej swobodzie ustawienia.

DXR75P-HR jest odpowiedni do zastosowań krytycznych, takich jak (ale bez ograniczenia):

- **kontrola spoin w przemyśle naftowym i gazowym oraz w energetyce i lotnictwie:**
 - rurociągi transportowe
 - złożone konstrukcje (odcinki rurociągu)
 - rury kotłowe
 - przewody paliwowe
 - rury ciśnieniowe
 - zbiorniki ciśnieniowe i magazynowe
- **kontrola spoin w okrętownictwie**

DXR140P-HE

Duży system obrazowania o wysokim kontraście do radiografii o wysokiej energii

DXR140P-HE jest idealnym przenośnym detektorem przeznaczonym do zastosowań o wysokiej energii (izotopowych). Optymalne wewnętrzne ekranowanie zapobiega promieniowaniu rozproszonemu o niskiej energii, ujemnie wpływającemu na jakość obrazu i żywotność elektroniki.



Detektor DXR140P-HE może być stosowany z izotopami i promieniowaniem RTG o wysokiej energii (powyżej 450 kV), jest odpowiedni do ogólnych zastosowań radiograficznych, takich jak (ale bez ograniczenia):

- **kontrola eksploatacyjna w przemyśle naftowym i gazowym oraz w energetyce:**
 - badanie korozji pod izolacją
 - pozycjonowanie zaworów
 - pomiar grubości ścianki
 - badanie podpór rurociągów
 - rury kotłowe
- **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 GIS**



Badania Nieniszczące i Diagnostyka
Agenda Wydawnicza SIMP
ul. Sabaly 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 Łukaszk

REDAKTORZY DZIAŁOWI / SECTION EDITORS

METODOLOGIA BADAŃ / RESEARCH METHODOLOGY
Sławomir Mackiewicz, Marek Śliwowski

CERTYFIKACJA W BADANIACH / CERTIFICATION IN RESEARCH
Bogdan Piekarczyk

URZĄDZENIA I SYSTEMY BADAŃ
/ EQUIPMENT 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, Greece

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 Józwiak, 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. Zinovy 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, Instituto Superior Técnico, Portugal

Prof. Maria Helena Robert, University of Campinas, Brasil

Dr hab. Maciej Roskosz, Politechnika Śląska, Polska

Prof. Krzysztof Schabowicz, Politechnika Wrocławska, Polska

Prof. Valentyn R. Skalsky, National Academy of Science of Ukraine, Ukraine

Prof. Jacek Stania, Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, Polska

Prof. Jacek Szelażek, IPPT PAN, Polska

Dr Marek Śliwowski, NDTTEST 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 Udupa, Michigan State University, USA

Prof. Gábor Vártesy, Hungarian Academy of Sciences, Hungary

Dr Grzegorz Wojaś, UDT, Polska

Prof. Sławomir Wronka, Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Polska

Prof. Chunguang Xu, Beijing Institute of Technology, China

Prof. Noritaka Yusa, Tohoku University, Japan

Badania Nieniszczące i Diagnostyka

Nondestructive Testing and Diagnostics

NR 1-4/2023

ISSN 2451-4462 (ONLINE: 2543-7755)

VOLUMEN 8

SPIS TREŚCI

Adam Kondej, Dominik Kukla

Nieniszcząca ocena grubości przypowierzchniowej warstwy azotków w technicznych stopach żelaza metodą prądów wirowych* 12

Tomasz Katz

Modelowanie wykrywania wad kontaktowozmęczeniowych w szynach kolejowych metodą ultradźwiękową* 17

Piotr Bielawski

Diagnozowanie potencjału eksploatacyjnego zespołu maszyn* 25

Tomasz Gorzelańczyk, Krzysztof Schabowicz

Przegląd nowoczesnych metod nieniszczących wykorzystywanych do badania płyt włóknisto-cementowych* 30

Alireza Akhlaghi

Porosity measurement in CFRP* 37

Jerzy Kaszyński

Problematyka badań nieniszczących w budownictwie na krajowych konferencjach KKBN - przeżyjemy to jeszcze raz 40

Maciej Martyna, Roman Martyna

Możliwości i ograniczenia magnetycznej metody MRT badania stanu technicznego lin stalowych w czasie ich eksploatacji na urządzeniach dźwignicowych* 48

Mateusz Cybulski, Marek Lipnicki, Krzysztof Mroczek, Rafał Obłąkowski

Badania ultradźwiękowe Phased Array zaczerwonych choinkowych stopek łopat stopni L-0 po stronie turbiny i generatora w elektrowni jądrowej w Szwecji* 56

Bartosz Hyla, Michał Sobczak, Jakub Roemer

Badania nieniszczące materiałów kompozytowych metodą termografii laserowej* 62

Mateusz Napiórkowski, Mariusz Szóstak, Krzysztof Schabowicz

Nieniszczące, wizualne metody badań wykorzystujące wirtualną rzeczywistość w budownictwie – stan wiedzy* 67

Mateusz Wróbel, Maciej Szwed

Fitness for service dla urządzeń ciśnieniowych – doświadczenia UDT* 72

Maciej Szwed, Tomasz Jakubowski, Michał Targoński

Detekcja pęcherzy wodorowych metodami ultradźwiękowymi TOFD, TULA i Phased Array* 80

Karol Kaczmarek

Wymagania normy PN-EN ISO 9712 dla egzaminu praktycznego w sektorach przemysłowych* 88

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* 97

Jakub Spytek, Kajetan Dziedzic, Łukasz Ambroziński, Łukasz Pieczonka

Obrazowanie wad w strukturach cienkościennych z wykorzystaniem ultradźwiękowych fal prowadzonych* 101

Streszczenia artykułów zgłoszonych na 50. KKBN 105

Bogusław Ładecki, Joanna Augustyn-Nadzieja

Problemy pęknięcia zmęczeniowego wału wirnika wentylatora ze stali C45* 120

Informacje BNID - Wspomnienie o płk. dr. inż. Romanie OSTROWSKIM 124

Informacje dla Autorów i Czytelników 125

* Artykuł recenzowany

PATRONAT I STAŁA WSPÓŁPRACA
PATRONAGE AND PERMANENT COOPERATION

PTBNiDT



INFORMATOR PTBNiDT SIMP

50. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących

Kołobrzeg, 17-20 października 2023



ORGANIZATOR GŁÓWNY:

- Polskie Towarzystwo Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP Oddział 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,

Członkowie Komitetu Organizacyjnego

Adam Sajek, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Bogdan Zając, Narodowe Centrum Badań Jądrowych Otwock

KOMITET NAUKOWY

Przewodniczący Komitetu Naukowego

prof. dr hab. inż. Jacek Słania, Łukasiewicz, Górnośląski Instytut Technologiczny Gliwice

Zastępca Przewodniczącego Komitetu Naukowego

prof. dr hab. inż. Tomasz Chady, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

dr hab. inż. Ryszard Krawczyk, prof. Politechniki Częstochowskiej

Sekretarz Komitetu Naukowego

mgr inż. Marcin Matuszewski, Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny Gliwice

Członkowie Komitetu Naukowego

prof. dr hab. inż. Piotr Bielawski, Emerytowany profesor Politechniki Morskiej w Szczecinie

mgr inż. Krzysztof Brunné, Przedsiębiorstwo Usług Naukowo-Technicznych „Pro Novum” Sp. z o.o.

płk dr hab. inż. Krzysztof Dragan, prof. ITWL, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

dr hab. inż. Mariusz Prażmowski prof. PO, Politechnika Opolska

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

dr hab. inż. Maciej Roskosz, prof. AGH, Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie

prof. dr hab. inż. Krzysztof Schabowicz, Politechnika Wrocławska

dr hab. inż. Santina Topolska prof. PŚ, Politechnika Śląska

mgr inż. Patryk Uchroński, ZBM ULTRA

dr inż. Dariusz Ulbrich, Politechnika Poznańska



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



SONASPECTION



Koli Sp. z o.o. mail: kontakt@koli.eu
80-297 Banino Tel.: +48 58 684 86 61
Ul. Lotnicza 119 Tel.: +48 58 684 86 62



BIURO TECHNICZNO - HANDLOWE

TESTING

Spółka z o.o.

PRZEDSTAWICIELSTWO FIRM:

Krautkramer



SEIFERT



Eddyfi Technologies

K+D
Flux-Technik

SERVO-ROBOT
SMART CLAMP DESIGN - HYBRIDICALLY DRIVEN ROBOT



ElektroPhysik

proceq

JW FROELICH

KULZER
WITKO-SPRUEGELE GROUP

wilnos
Schmitt für die Metallwerkstoffe

Oferujemy:
urządzenia i środki do badań nieniszczących metodami:

ultradźwiękową	
radiograficzną	
magnetyczno-proszkową	
prądów wirowych	
penetracyjną	
wizualną	

oraz aparaturę do pomiarów: twardości, grubości powłok i szczelności.

W kompleksowy sposób wyposażamy laboratoria w sprzęt i materiały eksploatacyjne do **badania metalograficznych**.

Biuro nasze prowadzi poradnictwo, sprzedaż oraz autoryzowany serwis w zakresie produktów w/w firm.

Firma nagrodzona za działalność w dziedzinie badań nieniszczących



40 - 065 Katowice, ul. Mikołowska 100
tel. (32) 757 45 97, fax (32) 757 48 15
e-mail: testing@testing.pl, www.testing.pl



Jakość, która nie boi się kontroli.

Od 1989 roku świadczymy usługi w zakresie badań nieniszczących, tj. badania wizualne, magnetyczno-proszkowe, penetracyjne, ultradźwiękowe, radiograficzne, szczelności złączy spawanych oraz mobilna analiza składu chemicznego.

Nasze pozostałe usługi:

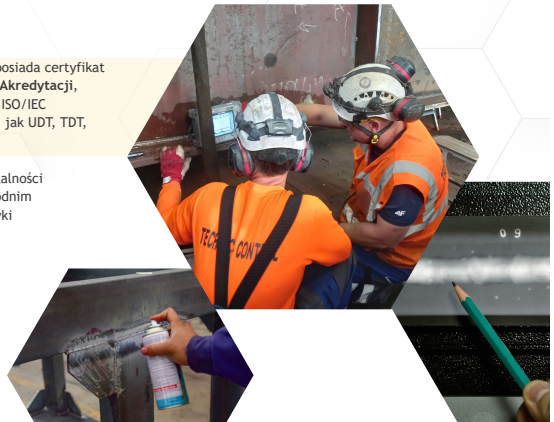
- digitalizacja radiogramów - archiwizacja radiogramów utrwalonych na filmach na płytach CD/DVD (radiogram w formie cyfrowej);
- konsultacje w zakresie badań nieniszczących - opracowywanie, opiniowanie instrukcji i procedur badawczych. Przeprowadzanie egzaminów wewnętrznych personelu badań nieniszczących;
- nadzór konstrukcyjny i jakościowy przy wykonywaniu konstrukcji stalowych;

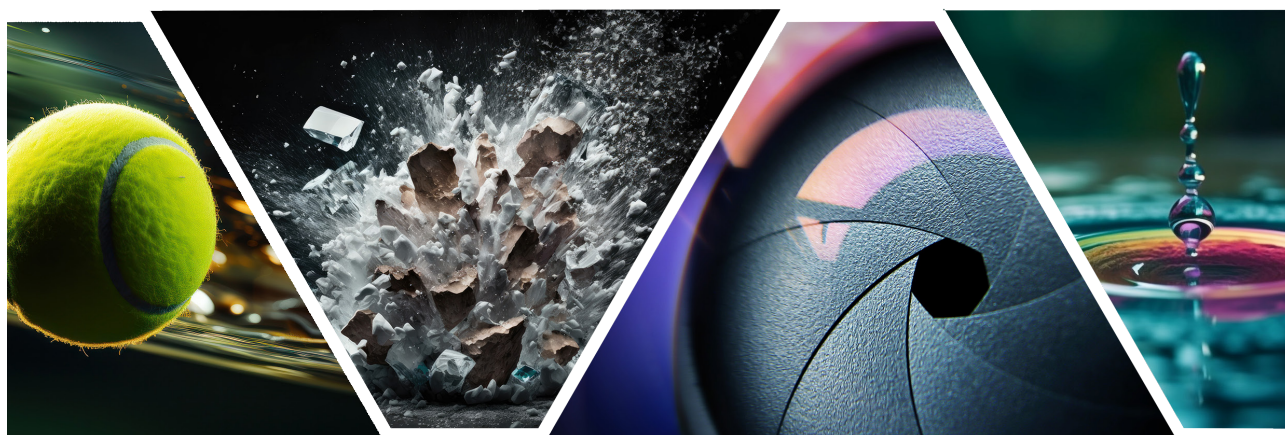
Sz szczególnie duże doświadczenie posiadamy w prowadzeniu badań nieniszczących na konstrukcjach statków w budowie i eksploatacji, stalowych konstrukcjach mostów, rurociągów i zbiorników.

Nasze Laboratorium Badań Nieniszczących posiada certyfikat akredytacji wydany przez Polskie Centrum Akredytacji, który potwierdza spełnienie wymagań PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 oraz uznania takich instytucji jak UDT, TDT, towarzystwa morskie.

TECHNIC-CONTROL Sp. z o.o. w swojej działalności zajmuje czołową pozycję na Pomorzu Zachodnim w zakresie badań nieniszczących i diagnostyki technicznej konstrukcji metalowych.

www.technic-control.pl





Ultraszybkie kamery w ofercie SHIM-POL

Shimadzu Corporation to pochodzący z Japonii światowy leader w dziedzinie aparatury analitycznej i naukowej. W swojej szerokiej gamie ofertowej proponuje najnowocześniejsze rozwiązania inżynierskie do analizy chemicznej oraz badań wytrzymałościowych a także obrazowania, w tym ultraszybką kamerę, która jest numerem 1 na świecie pod kątem szybkości, rozdzielczości i pamięci.

iX Cameras to wiodąca na świecie firma, specjalizująca się w dziedzinie szybkiego obrazowania, projektująca i wykonująca najnowocześniejsze ultraszybkie kamery oraz oprogramowanie do szerokiej gamy zaawansowanych aplikacji badawczych.

SHIM-POL A.M. Borzymowski jest wyłącznym dystrybutorem aparatury Shimadzu Corporation oraz iX Cameras w Polsce!

Zastosowania ultraszybkich kamer obejmują:

- MOTORYZACJĘ - badanie poduszek powietrznych, bezpieczeństwa pieszych, zderzeń, badanie opon, pojazdów,
- BALISTYKĘ - badanie kamizelek kuloodpornych, wybuchów, gazów wylotowych, trajektorii pocisków, fal uderzeniowych,
- PRODUKCJĘ - kontrola produkcji seryjnej np. procesów butelkowania,
- MATERIAŁOZNAWSTWO - obrazowanie procesów niszczenia
- BADANIA NAUKOWE - wyładowania elektryczne, przepływy cieczy i gazów, kawitacja, mikroskopia, wibracje cząstek, badania wytrzymałościowe, testy uderzeniowe, funkcjonalne, obrazowanie 3D,
- MEDIA I SZTUKĘ - efekty specjalne, sport, reklamy i inne.

SHIM-POL A.M. Borzymowski
E. Borzymowska-Reszka, A. Reszka, Spółka Jawna,
ul. Lubomirskiego 5, 05-080 Izabelin
tel. 22 20 60 900, e-mail: biuro@shim-pol.pl, www.shim-pol.pl





Elektronick 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 Comet.



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

Aparaty produkcji Comet Nowej serii EVO & ECO 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 niezmienniej 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 Comet. 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 PAA, oraz niezbędne szkolenia odbyte u producenta Comet w zakresie napraw i przeglądów technicznych.



Nowa seria ECO- 14kg głowica RTG f-my Comet



NAVITEST Sp. z o.o. to lider w dziedzinie badań nieniszczących w Polsce. Nastawienie firmy na człowieka zaowocowało zaangażowaniem, rozwojem kompetencji i kwalifikacji pracowników, a wraz z nim całej firmy. Nasza firma działa w oparciu o akredytację, wdrożone i certyfikowane systemy zarządzania jakością oraz inżynierskie podejście do zadań zleconych przez klienta.

ZAAWANSOWANE METODY BADAŃ

Otrzymujemy pełniejszą i szybszą informację o stanie technicznym obiektu z jednoczesnym zapisem elektronicznym wyników badania. Oferujemy radiografię cyfrową oraz ultradźwiękowe techniki TOFD i PA.



MAPOWANIE KOROZJI



Wykonujemy ją wszędzie tam, gdzie jest podejrzenie wystąpienia zjawiska korozji i erozji. Techniki, które oferujemy to techniki ultradźwiękowe oraz radiografia cyfrowa.

SKANERY DO BADAŃ

Nasza firma świadczy również usługi przy wykorzystaniu autorskich skanerów do badań ultradźwiękowych UTPA, TOFD oraz cyfrowych badań radiograficznych RTD.



KONTAKT

-  + (48 58) 520-75-00
-  biuro@navitest.com.pl
-  www.navitest.com.pl

...Gdy liczy się jakość



Zastosowanie kamer termowizyjnych InfiRay w badaniach nieniszczących

Obrazowanie termowizyjne można zastosować do badań nieniszczących w celu wykrycia pęknięć i innych defektów w materiałach metalowych, niemetalowych i kompozytowych. Konwencjonalne metody badań nieniszczących obejmujące badania ultradźwiękowe, radiograficzne, czy magnetyczno-proszkowe mają określone wymagania dotyczące tła testowego i wymagają wcześniejszego nabycia odpowiednich kwalifikacji przez Operatora. Innowacyjność badań nieniszczących za pomocą termowizji polega na zastosowaniu pomiaru temperatury w podczerwieni bez potrzeby dotykania mierzonego obiektu. Stan badanego obiektu można bezpośrednio obserwować za pomocą obrazów.

W porównaniu z metodami konwencjonalnymi, obrazowanie termowizyjne ma następujące zalety:

- Szeroki zakres zastosowań. Można wykryć wady zarówno materiałów metalowych, jak i niemetalowych.
- Wyraźne obrazy i intuicyjna obserwacja. Na obrazach w podczerwieni można przeprowadzić analizę wtórną w celu dalszego przetwarzania.
- Pomiar bezdotykowy. Operacja jest prosta i wygodna.
- Szeroki zakres temperatury pomiaru i możliwość wykorzystania dedykowanych soczewek zależnych od obiektu badania.

Kamery termowizyjne **InfiRay** spotkały się z szerokim przyjęciem w branży ze względu na dobrą jakość obrazu. Seria kamer **C/P** ma niewielkie rozmiary, jest łatwa w obsłudze i jest powszechnie stosowana w aplikacjach takich jak kontrola urządzeń i konserwacja obwodów. Urządzenia serii **M** są wyposażone w 3,5-calowy ekran dotykowy i wiele obiektywów o różnych rozdzielczościach i parametrach. Seria ta jest szeroko stosowana w różnych dziedzinach przemysłu, takich jak elektroenergetyka, metalurgia i przemysł chemiczny. Najnowszy model **S1280** to wysokiej klasy flagowiec z systemem Android i rozdzielczością podczerwieni 1280 × 1024, który zdobył niemiecką nagrodę **Red Dot Design Award**.

Oprócz tradycyjnych kamer termowizyjnych, firma **InfiRay** opracowała także kamery termowizyjne do detekcji gazów posiadające certyfikację **ATEX** i kamery działające na krótkich długościach fal (SWIR). Kamery termowizyjne do detekcji gazów służą do wykrywania wycieków typowych gazów przemysłowych, takich jak metan, LZO, czynników chłodniczych i etylenu. Kamery SWIR mają wyjątkową zdolność penetracji materiału, dlatego są zwykle używane do wykrywania czystości wlewków krzemu i wykrywania wad płytek i paneli słonecznych oraz ukrytych pęknięć. Oferują tym samym nowe podejście do badań nieniszczących dla przemysłu fotowoltaicznego i półprzewodników.

Model serii P



Model serii M



Model S1280



Smartfon PX1 z termowizją



DPIdea

Ul. Spokojna 28
81-549 Gdynia
e-mail: info@dpidea.pl
tel. +48 58 620 63 34
www.dpidea.pl

DPIdea s.c. jest autoryzowanym i wyłącznym dystrybutorem przemysłowych kamer termowizyjnych **InfiRay** w Polsce. Ponad 15-letnia działalność firmy obraca się głównie wokół orbity badań nieniszczących, dostarczając rozwiązania dla wszelkich metodologii badawczych. Poza aktywnością handlową firma posiada laboratorium wzorcowe oraz autoryzowany serwis, oferując tym samym w pełni kompleksową usługę.

Adam Kondej^{1*}, Dominik Kukla^{1,2}

¹Sieć Badawcza Łukasiewicz – Warszawski Instytut Technologiczny.

²Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nieniszcząca ocena grubości przypowierzchniowej warstwy azotków w technicznych stopach żelaza metodą prądów wirowych

Non-destructive assessment of the thickness of the near-surface layer of nitrides in technical iron alloys using the eddy current method

STRESZCZENIE

Celem pracy było zbadanie możliwości zastosowania metody prądów wirowych, techniki pomiaru amplitudy napięcia i częstotliwości rezonansowej, do nieniszczącej oceny grubości przypowierzchniowej warstwy azotków żelaza w stali 42CrMo4 po azotowaniu gazowym. Zakres pracy obejmował wykonanie próbek badawczych, rozkłady twardości metodą Vickersa oraz pomiary grubości warstw azotków na zglądach poprzecznych, badania warstw azotków metodą prądów wirowych, analizę korelacji wyników badań niszczących z nieniszczącymi. Główną aparaturę badawczą stanowił Wirotest M2 z zestawem głowic pomiarowych. Na podstawie wyników pomiarów wytypowano głowicę 100 kHz jako optymalną do oszacowania grubości warstwy azotków. Umożliwia ona także sortowanie próbek wg grubości strefy dyfuzyjnej na dwie grupy. Do oceny grubości warstwy azotków najdokładniejsza jest analiza amplitudy napięcia. W przypadku sortowania próbek pod względem grubości strefy dyfuzyjnej znajduje zastosowanie analiza amplitudowo-częstotliwościowa. Wirotest M2 może znaleźć zastosowanie w kontroli jakości stalowych części po azotowaniu do wykrywania przypowierzchniowej warstwy azotków żelaza oraz pomiaru jej grubości. Obszarem zastosowania może być przemysł narzędziowy, motoryzacyjny, lotniczy. Badania nieniszczące metodą prądów wirowych pozwalają na kontrolę wszystkich produkowanych części i mogą być uzupełnieniem dla badań niszczących, które są wykonywane dla wybranych elementów z danej partii produkcyjnej.

Słowa kluczowe: prądy wirowe; ocena grubości; warstwy azotowane; Wirotest.

ABSTRACT

The aim of the work was to investigate the possibility of using the eddy current method, a technique for measuring voltage amplitude and resonant frequency, for non-destructive assessment of the thickness of the near-surface layer of iron nitrides in 42CrMo4 steel after gas nitriding. The scope of work included the preparation of test samples, hardness distributions using the Vickers method and measurements of the thickness of nitride layers on cross-sections, testing of nitride layers using the eddy current method, analysis of the correlation of the results of destructive and non-destructive tests. The main research apparatus was the Wirotest M2 with a set of measuring heads. Based on the measurement results a 100 kHz probe was selected as the optimal one for estimating the thickness of the nitride layer. It also enables the sorting of samples according to the thickness of the diffusion zone into two groups. The most accurate to assess the thickness of the nitride layer is the analysis of the voltage amplitude. In the case of sorting samples in terms of the thickness of the diffusion zone the amplitude-frequency analysis is used. The Wirotest M2 can be used in quality control of steel parts after nitriding to detect the surface layer of iron nitrides and measure its thickness. The area of application may be the tool, automotive and aviation industries. Non-destructive testing using the eddy current method allows for the control of all manufactured parts and can be a supplement to destructive testing, which is performed for selected elements from a given production batch.

Keywords: eddy currents; thickness assessment; nitriding layers; Wirotest.

1. Wstęp

Azotowanie jest obróbką cieplno-chemiczną stopów żelaza, która poprawia właściwości mechaniczne materiału (odporność na zużycie ścierne, twardość, odporność zmęczeniową) oraz zwiększa odporność na korozję. Polega na dyfuzyjnym nasyceniu powierzchni metalu azotem. W efekcie azotowania tworzy się warstwa wierzchnia, której struktura i skład fazowy zależy od temperatury, czasu, składu

chemicznego przedmiotu i atmosfery. Azotowanie stosuje się do obróbki części maszyn oraz narzędzi.

Najszerzej stosowaną metodą azotowania jest azotowanie gazowe. Do innych metod należą: azotowanie plazmowe (jarzeniowe), azotowanie w złożach fluidalnych, azotowanie w proszkach, azotowanie jonowe.

Azotowaniu gazowemu poddaje się stale węglowe, niskostopowe i stopowe. Atmosferę azotującą wytwarza się z amoniaku lub mieszaniny amoniaku i amoniaku zdysocjowanego, bądź amoniaku i azotu. Sam proces opiera się na utrzymaniu odpowiedniej termodynamicznej

* Autor korespondencyjny.

E-mail: adam.kondej@wit.lukasiewicz.gov.pl

aktywności atmosfery azotującej, określanej umownie poprzez wartość potencjału azotowego. W czasie obróbki zachodzą trzy podstawowe procesy: dysocjacja amoniaku, absorpcja i dyfuzja azotu. Azotowanie przeprowadza się w temperaturze 420÷600°C i w czasie od kilku do kilkudziesięciu godzin. Parametrami atmosfery są stopień dysocjacji amoniaku lub potencjał azotowy atmosfery azotującej. Zmiany ich wartości wymuszane są przez zmianę składu atmosfery wlotowej bądź natężenia jej przepływu [1].

Podczas azotowania ferrytycznego żelaza lub stali niskowęglowej tworzyć się może warstwa składająca się z trzech stref: strefy α , strefy $\gamma' + \alpha$ i strefy $\epsilon + \gamma' + \alpha$. Podczas azotowania stali stopowych będą dodatkowo wytwarzały się azotki i węglazotki pierwiastków stopowych. Od budowy fazowej (strefowej) warstwy silnie zależą właściwości użytkowe, takie jak odporność na zużycie ścierne i zatarcie, odporność na korozję, wytrzymałość zmęczeniowa. Przyjmuje się, że przypowierzchniowa strefa azotków żelaza $\epsilon + \gamma'$ zwiększa odporność na zużycie ścierne, zatarcie oraz korozję, natomiast strefa dyfuzyjna (wydzieleniowa) α zwiększa wytrzymałość zmęczeniową. Właściwości użytkowe warstwy azotowanej można poprawić kształtując proporcje faz ϵ i γ' w strefie azotków, profile stężenia azotu i twardości w warstwie, naprężenia warstwie i rdzeniu [2].

Kształtowanie budowy fazowej warstwy azotowanej jest ważne i wymaga precyzyjnej regulacji podaży azotu do stali, a więc regulacji kinetyki wzrostu warstwy. Wraz ze wzrostem czasu azotowania przy intensywnej atmosferze azotującej, jakim jest amoniak, wzrasta grubość warstwy azotków oraz jej porowatość. Strefa azotków żelaza ma charakter warstwy przyrostowej i częściowo dyfuzyjnej, co sprawia, że wraz ze wzrostem jej grubości rosną wymiary zewnętrzne obrabianej części. W przypadku części precyzyjnych należy to uwzględnić. Większa porowatość warstwy azotków pogarsza twardość, a także obniża odporność na korozję. Celowe zatem jest kontrolowanie grubości nie tylko dyfuzyjnej warstwy azotowanej, ale także przypowierzchniowej warstwy azotków żelaza, która często jest pomijana na etapie kontroli jakości gotowych wyrobów.

Do badań wytworzonych warstw azotowanych stosuje się badania niszczące oraz nieniszczące. Do badań niszczących (DT – Destructive Testing) należą badania metalograficzne na próbkach świadkach przy wykorzystaniu mikroskopii świetlnej i elektronowej, pomiary twardości na przekroju poprzecznym, badania stężenia azotu w warstwie i badania rentgenograficzne. Do badań nieniszczących (NDT – Non-destructive Testing) należą pomiary zmian pola magnetycznego (metoda magnetyczna) [3, 4] oraz pomiary zmian fizycznych właściwości materiału, np. przewodności elektrycznej właściwej, względnej przenikalności

magnetycznej (metoda indukcyjna) [5]. Stosowane są także pomiary twardości powierzchniowej warstwy przy różnych obciążeniach węgelnika Vickersa [6, 7]. Zaletą badań nieniszczących jest to, że mogą one być prowadzone na gotowych elementach. Jest to szczególnie ważne w przypadku dużych, drogich i odpowiedzialnych części, takich jak formy i matryce, części lotnicze itd. [2].

Autorzy pracy [2] wskazują na możliwość zastosowania metody prądów wirowych (ET – Eddy Current Testing) oraz urządzeń typu Wirotest poprzedniej generacji, wykorzystujących pomiar amplitudy napięcia, do oceny grubości strefy azotków żelaza $\epsilon + \gamma'$ oraz strefy wydzieleniowej α . Wyniki badań zamieszczone w pracy [8] także potwierdzają skuteczność metody ET w ocenie grubości warstwy dyfuzyjnej oraz azotków. Nie ma natomiast publikacji co do wykorzystania techniki amplitudowo-częstotliwościowej do charakteryzacji tego typu warstw.

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy było zbadanie możliwości zastosowania metody prądów wirowych, a dokładniej techniki pomiaru amplitudy napięcia i częstotliwości rezonansowej, do nieniszczącej oceny grubości przypowierzchniowej warstwy azotków żelaza.

Zakres pracy obejmował wykonanie próbek badawczych, rozkłady twardości metodą Vickersa oraz pomiary grubości warstw azotków na zglądach poprzecznych, opracowanie i wykonanie głowic pomiarowych, badania warstw azotków metodą prądów wirowych, analizę korelacji wyników badań niszczących z nieniszczącymi.

3. Metody badawcze i przedmiot badań

Przedmiotem badań były próbki ze stali do ulepszenia cieplnego o oznaczeniu 42CrMo4 wg EN (40HM wg PN), skład chemiczny stali zamieszczono w tabeli 1. Próbki zostały wycięte z pręta i miały postać krążków. Stalowe krążki poddano procesom azotowania gazowego w piecu typu NX609. Przeprowadzono dziesięć procesów o różnych parametrach, aby uzyskać próbki o różnej grubości warstwy azotków (tab. 2).

Do jednoznacznej oceny grubości warstwy azotków zastosowano badania niszczące. Z każdej grupy wytypowano po jednej próbce, z której wykonano poprzeczny zgląd metalograficzny. Zglądy trawiono Nitałem o stężeniu 2%. Za pomocą mikroskopu świetlnego rejestrowano obraz warstwy azotków przy powiększeniach 500÷1500x, a następnie za pomocą oprogramowania mierzono jej grubość w 6÷8 miejscach. Średnie wartości grubości warstwy azotków dla poszczególnych próbek odniesienia zamieszczono w tabeli 2.

Tab. 1. Skład chemiczny stali 42CrMo4

Tab. 1. The chemical composition of 42CrMo4 steel.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V	Cu
0,38÷ 0,45	0,4÷ 0,7	0,17÷ 0,37	max 0,035	max 0,035	0,9÷ 1,2	max 0,3	0,15÷ 0,25	max 0,2	max 0,05	max 0,25

Tab. 2. Wykaz próbek odniesienia

Tab. 2. List of reference samples

Lp.	Wymiary próbki [mm]	Nr procesu azotowania	Grubość warstwy azotków [μm]	Grubość strefy dyfuzyjnej [μm]
1	Ø20x4	Nx1258	0,0	220
2	Ø20x4	Nx1258	2,0	220
3	Ø25x6	Nx1300	7,6	280
4	Ø20x4	Nx1251	11,0	260
5	Ø25x6	Nx1302	12,9	370
6	Ø38x10	Nx1302	14,8	380
7	Ø20x4	Nx1292	17,7	450
8	Ø38x10	Nx1292	20,5	520
9	Ø38x10	Nx1293	25,3	350
10	Ø20x4	Nx1239	30,9	440

Na poprzecznym zglądzie metalograficznym, przed trawieniem, mierzono twardość rdzenia w trzech miejscach oraz wykonano rozkład twardości metodą Vickers'a przy obciążeniu HV0,5. Za pomocą wykresu rozkładu twardości wyznaczono grubość strefy dyfuzyjnej. Wartość grubości odczytano na osi odległości od powierzchni wyrażonej w mikrometrach dla średniej twardości rdzenia zwiększonej o 50 HV0,5. Wartości grubości strefy dyfuzyjnej dla poszczególnych próbek odniesienia zamieszczono w tabeli 2.

Główną metodą badań nieniszczących próbek po azotowaniu była metoda prądów wirowych. Aparaturę badawczą stanowił zminiaturyzowany układ kontrolno-pomiarowy Wirotest M2, wykorzystujący technikę amplitudowo-częstotliwościową. Do nieniszczącej oceny grubości warstwy azotków zastosowano głowice powierzchniowe o częstotliwości pracy: 50 kHz, 100 kHz, 200 kHz, 274 kHz, 483 kHz, 840 kHz, 911 kHz. Pomiar odbywał się w sposób kontaktowy. W celu zwiększenia dokładności i powtarzalności pozycjonowania głowicy względem powierzchni badanej zastosowano dedykowany statyw z uchwytem zapewniającym jej stały docisk. Zdjęcie stanowiska pomiarowego zamieszczono na rysunku 1.

Po pierwszym uruchomieniu Wirotestu M2 układ pomiarowy nagrzewa się. Nagrzewanie cewki powoduje zmianę jej oporu, a tym samym zmianę wartości bezwzględnej wyindukowanego napięcia. Jest to efekt płynięcia, który przejawia się mimowolną zmianą amplitudy napięcia w czasie. Efekt ten jest niekorzystny i w przypadku badań grubości cienkich warstw azotków żelaza wpływa na wynik pomiaru. W związku z tym wymagana jest stabilizacja temperatury układu pomiarowego, która polega na odczekaniu około 30 minut po pierwszym uruchomieniu Wirotestu M2 lub po każdej zmianie głowicy pomiarowej.

4. Wyniki badań

W wyniku przeprowadzonych badań wytypowano głowicę 100 kHz jako najdokładniejszą, tzn. dla której uzyskano najwyższą wartość współczynnika determinacji R². Współczynnik ten określa jaka część danych jest wytłumaczona



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe do nieniszcząca ocena grubości przypowierzchniowej warstwy azotków.

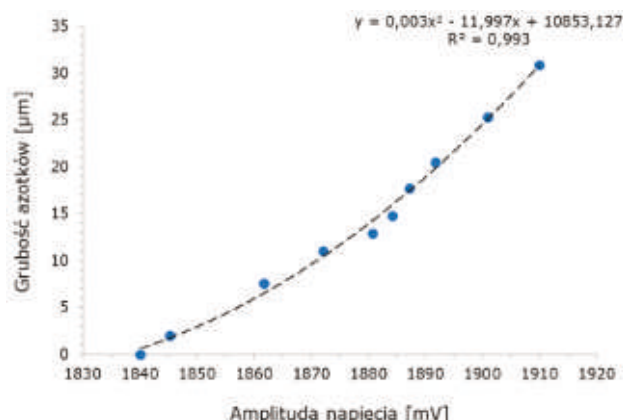
Fig. 1. The measuring station for on-destructive assessment of the thickness of the near-surface layer of nitrides.

przez model. Im jest on większy tym linia trendu jest lepiej dopasowana do danych. Dla amplitudy napięcia średnia wartość współczynnika R² z pięciu prób wyniosła 0,993. Korzystając z współczynnika determinacji R² można obliczyć współczynnik korelacji r, wyciągając pierwiastek z R². Dla amplitudy napięcia wartość współczynnika korelacji r wyniosła 0,996.

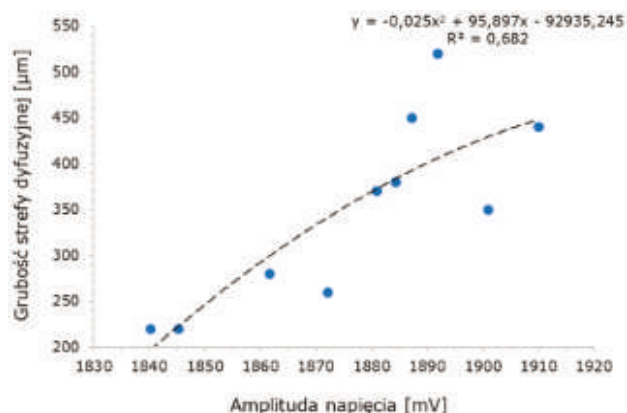
Na rysunku 2 zamieszczono wykres punktowy zależności amplitudy napięcia od średniej grubości warstwy azotków dla głowicy 100 kHz podczas pomiarów 10 próbek odniesienia. Wraz ze wzrostem grubości warstwy azotków rośnie wartość amplitudy napięcia.

Wykres posiada linię trendu z dopasowaniem wielomianowym drugiego stopnia, którego równanie zamieszczono na wykresie.

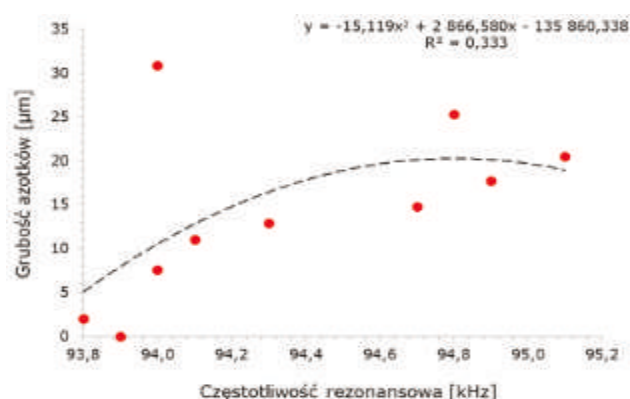
Na rysunku 3 zamieszczono wykres punktowy zależności częstotliwości rezonansowej od średniej grubości warstwy azotków. Pomiar częstotliwości rezonansowej nie pozwala na ocenę grubości warstwy azotków. Dla otrzymanych danych wyznaczono linię trendu o niezadowalającym dopasowaniu.



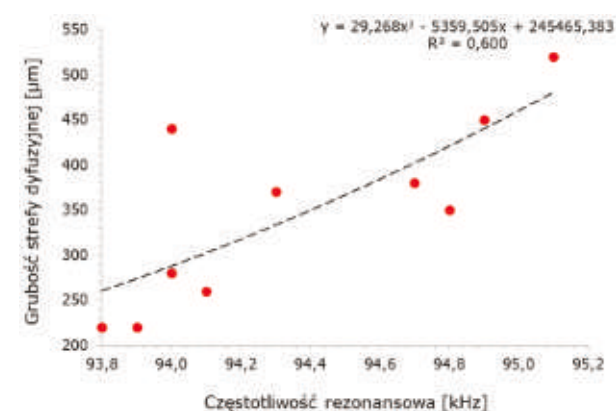
Rys. 2. Wykres punktowy zależności amplitudy napięcia od grubości warstwy azotków dla głowicy 100 kHz
Fig. 2. The scatterplot of voltage amplitude versus nitride layer thickness for 100 kHz measuring head.



Rys. 4. Wykres punktowy zależności amplitudy napięcia od grubości strefy dyfuzyjnej dla głowicy 100 kHz.
Fig. 4. The scatter plot of the dependence of the voltage amplitude on the thickness of the diffusion zone for the 100kHz measuring head.



Rys. 3. Wykres punktowy zależności częstotliwości rezonansowej od grubości warstwy azotków dla głowicy 100 kHz.
Fig. 3. The measuring station for on-destructive assessment of the thickness of the near-surface layer of nitrides.



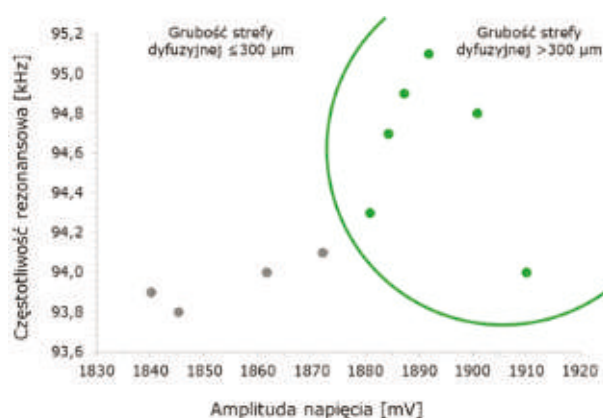
Rys. 5. Wykres punktowy zależności częstotliwości rezonansowej od grubości strefy dyfuzyjnej dla głowicy 100 kHz.
Fig. 5. The scatter plot of the dependence of the resonance frequency on the thickness of the diffusion zone for the 100kHz measuring head.

Na rysunku 4 zamieszczono wykres punktowy zależności amplitudy napięcia od grubości strefy dyfuzyjnej. Wraz ze wzrostem grubości strefy dyfuzyjnej rośnie wartość amplitudy napięcia. Dla otrzymanych danych wyznaczono linię trendu o zadowalającym dopasowaniu. Wartość współczynnika R^2 wyniosła 0,682, co daje współczynnik korelacji r na poziomie 0,826.

Na rysunku 5 zamieszczono wykres punktowy zależności częstotliwości rezonansowej od grubości strefy dyfuzyjnej. Wraz ze wzrostem grubości strefy dyfuzyjnej rośnie wartość częstotliwości rezonansowej. Dla otrzymanych danych wyznaczono linię trendu o słabym dopasowaniu. Wartość współczynnika R^2 wyniosła 0,600, co daje współczynnik korelacji r na poziomie 0,775.

Na rysunku 6 zamieszczono wykres punktowy zmian amplitudy napięcia i częstotliwości rezonansowej. Na wykresie umieszczono fragment alarmu kołowego, za pomocą którego możliwe jest segregowanie próbek azotowanych według grubości strefy dyfuzyjnej na dwie grupy:

- $g_{\text{str.dyf.}} \leq 300 \mu\text{m}$;
- $g_{\text{str.dyf.}} > 300 \mu\text{m}$.



Rys. 6. Wykres punktowy zmian amplitudy napięcia i częstotliwości rezonansowej dla głowicy 100 kHz podczas pomiarów 10 próbek odniesienia.
Fig. 6. The scatter plot of changes in voltage amplitude and resonant frequency for a 100 kHz measuring head during measurements of 10 reference samples.

5. Wnioski

Ocena grubości warstwy azotków żelaza wymaga doboru odpowiedniej częstotliwości pracy głowicy pomiarowej. Od tego parametru zależy głębokość wnikania prądów wirowych. Wraz ze wzrostem częstotliwości spada głębokość wnikania prądów wirowych. Pożądane jest, aby indukowane prądy obejmowały swoim działem obszary badane w taki sposób, aby mierzona pośrednio wielkość najsilniej wpływała na sygnał pomiarowy.

W przypadku badań ET ferromagnetyków wyznaczenie optymalnej częstotliwości jest trudne, ponieważ wiąże się to koniecznością zmierzenia przewodności elektrycznej właściwej γ oraz przenikalności magnetycznej względnej μ badanego materiału. Dodatkowym utrudnieniem podczas badań ET Wirotestem M2 (tj. układem rezonansowym) jest fakt, że częstotliwość pracy głowicy zmienia się podczas zbliżania jej do materiału badanego. To sprawia, że dobór optymalnej częstotliwości sprowadza się do prób doświadczalnych.

Na podstawie wyników pomiarów wytypowano głowicę 100 kHz jako optymalną do oszacowania grubości warstwy azotków żelaza w stali 42CrMo4. Za pomocą głowicy możliwe jest także sortowanie próbek wg grubości strefy dyfuzyjnej na dwie grupy.

Do oceny grubości warstwy azotków najdokładniejsza jest analiza amplitudy napięcia. Natomiast w przypadku sortowania próbek pod względem grubości strefy dyfuzyjnej znajduje zastosowanie analiza amplitudowo-częstotliwościowa.

Wirotest M2 może znaleźć zastosowanie w kontroli jakości stalowych części po azotowaniu do wykrywania przypowierzchniowej warstwy azotków żelaza oraz pomiaru jej grubości. Obszarem zastosowania może być np. przemysł narzędziowy, motoryzacyjny, lotniczy. Badania nieniszczące metodą prądów wirowych pozwalają na kontrolę wszystkich produkowanych części i mogą być uzupełnieniem dla badań niszczących, które są wykonywane dla wybranych elementów z danej partii produkcyjnej.

6. Literatura

- [1] P. Wach, J. Michalski, J. Tacikowski, „Przemysłowe procesy regulowanego azotowania gazowego” *Inżynieria Powierzchni*, vol. 19, no. 2, pp. 66-72, 2014.
- [2] B. Pachutko, L. Małdziński, „Badania nieniszczące warstw azotowanych na stalach narzędziowych za pomocą przyrządów Wirotest” *Inżynieria Powierzchni*, no. 2, pp. 40-46, 2006.
- [3] D. Kukła, P. Grzywina, M. Kopeć, Z. L. Kowalewski, „Assessment of hardened layer thickness for 40HNMA steel using eddy current method” *Inżynieria Materiałowa*, vol. 213, no. 5, pp. 263–266, 2016.
- [4] D. Kukła, M. Wyszowski, „Hardness assessment of induction hardened layers based on the analysis of eddy current signal” *Inżynieria Powierzchni*, vol. 24, no. 4, pp. 3–9, 2019.
- [5] Z. Żurek, D. Baron, „Measurement of changes of magnetic permeability and electrical conductivity values in generator rotor retaining rings” *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, no. 66, 2012.
- [6] S. Caprili, F. Mattei, I. Mazzatura, F. Ferrari, M. Gammino, M. Mariscotti, M. Mori, A. Piscini, „Evaluation of mechanical characteristics of steel bars by non-destructive Vickers micro-hardness tests” *Procedia Structural Integrity*, vol. 44, pp. 886-893, 2023.
- [7] S. Krall, M. Prießnitz, C. Baumann, F. Bleicher, „Non-destructive characterization of strain induced surface hardness increase by measuring magnetic properties of AISI 304” *Materials & Design*, vol. 226, pp. 1-13, 2023.
- [8] S. Jończyk, T. Samborski, S. Włodarczyk, „Możliwość zastosowania metody prądów wirowych do kontroli jakości warstw azotowanych” *Inżynieria Powierzchni*, no. 2, pp. 52-57, 2014.

Tomasz Katz*

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

Modelowanie wykrywania wad kontaktowo-zmęczeniowych w szynach kolejowych metodą ultradźwiękową

Modelling of detection of RCF defects in railroad rails by ultrasonic method

STRESZCZENIE

Celem niniejszego referatu jest przedstawienie sposobów modelowania wad kontaktowo-zmęczeniowych wykorzystując komercyjne i autorskie oprogramowanie komputerowe. Szczególną uwagę zwrócono na poznanie sposobu rozwoju wad kontaktowo-zmęczeniowych czego efektem jest poprawne modelowanie wad uwzględniające takie czynniki jak: lokalizacja wady, kierunek propagacji pęknięcia. Wynikiem końcowym prac było opracowanie parametrów serii głowic ultradźwiękowych, które będą efektywnie wykrywać wady kontaktowo-zmęczeniowe w szynach kolejowych.

Słowa kluczowe: UT; wady kontaktowo zmęczeniowe; modelowanie; szyny; oprogramowanie;

ABSTRACT

The purpose of this paper is to present ways of modelling a RCF (rolling contact fatigue) defects using commercial and proprietary computer software. Particular attention was paid to learning how RCF's defects develop resulting in correct defect modeling taking into account such factors as defect location, crack propagation direction. The final result of the work was the development of parameters for a series of ultrasonic probes that will effectively detect RCF's defects in railroad rails.

Keywords: UT; RCF; modelling; rails; software

1. Wstęp

Rosnące wymagania w zakresie badań nieniszczących stawiane przez rozwój polskich kolei, a w szczególności czynniki takie jak wzrost prędkości i tonażu na szlakach kolejowych, wymagają odpowiednio wysokiej jakości badań eksploatacyjnych szyn, w szczególności wykrywania wad sklasyfikowanych w katalogu wad szyn UIC 712 R [1].

Nowoczesne badania nieniszczące szyn metodą ultradźwiękową powinny wykrywać, z większą niż dotychczas skutecznością, wady kontaktowo-zmęczeniowe szyn zlokalizowane w bocznych częściach głowki szyny. Obecnie techniki badawcze stosowane na polskich kolejach nie wykrywają lub nie pozwalają na jednoznaczną identyfikację tego typu wad.

PLK S.A. dysponuje bogatą bazą danych dotyczących wyników diagnostyki i napraw szyn. Informacje te wskazują zagrożenia właściwe dla polskiej infrastruktury, co stanowi wytyczne do zaprojektowania zoptymalizowanego układu głowic ultradźwiękowych, zwiększającego szanse wykrycia wszystkich niebezpiecznych wad mogących prowadzić do awarii a nawet katastrof. Każde zdarzenie wynikające ze złego stanu technicznego szyn generuje olbrzymie koszty i jest zagrożeniem dla zdrowia i życia ludzkiego.

Zastosowanie komputerowej symulacji badań ultradźwiękowych umożliwia przeanalizowanie wpływu wielu czynników i parametrów głowic na skuteczność detekcji wad przy minimalizacji kosztów związanych z testowaniem

wielu prototypów głowic na rzeczywistych próbkach szyn z wadami sztucznymi i naturalnymi. Podejście takie pozwala to na wstępne przygotowanie zoptymalizowanych projektów głowic ultradźwiękowych do wykrywania określonych typów wad, które następnie można poddawać weryfikacji w badaniach doświadczalnych.

2. Aplikacje do modelowania wykrywania wad kontaktowo-zmęczeniowych

Do modelowania wykrywania wad zastosowano dwa typy oprogramowania komputerowego, którego interfejsy przedstawiono na rys. 1. Do określenia kierunku propagacji wiązek fal ultradźwiękowych w głowce szyny w geometrii 3D oraz modyfikowania parametrów wiązki (długość pola bliskiego, rozbieżność) zastosowano oprogramowanie BeamTool [2]. Oprogramowanie to umożliwia pełne projektowanie i charakteryzowanie cech akustycznych głowicy oraz parametrów przetwornika wraz z linią opóźniającą. Dobra praktyka inżynierska zaleca także, aby proponowany model głowicy lub układ przetworników sprawdzić na sztucznych reflektorach odwzorowujących wady naturalne powstające w eksploatowanym torze. Program BeamTool ułatwia to zadanie pozwalając również na projektowanie próbek odniesienia z wadami sztucznymi.

Drugi program, SymUT jest używany do obliczeń rozkładu ciśnienia akustycznego w polu głowic ultradźwiękowych oraz amplitud ech ultradźwiękowych uzyskiwanych od reflektora modelowego w zależności od jego wielkości, położenia i orientacji. Standardowym poziomem odniesienia dla w/w obliczeń jest poziom amplitudy echa od reflektora

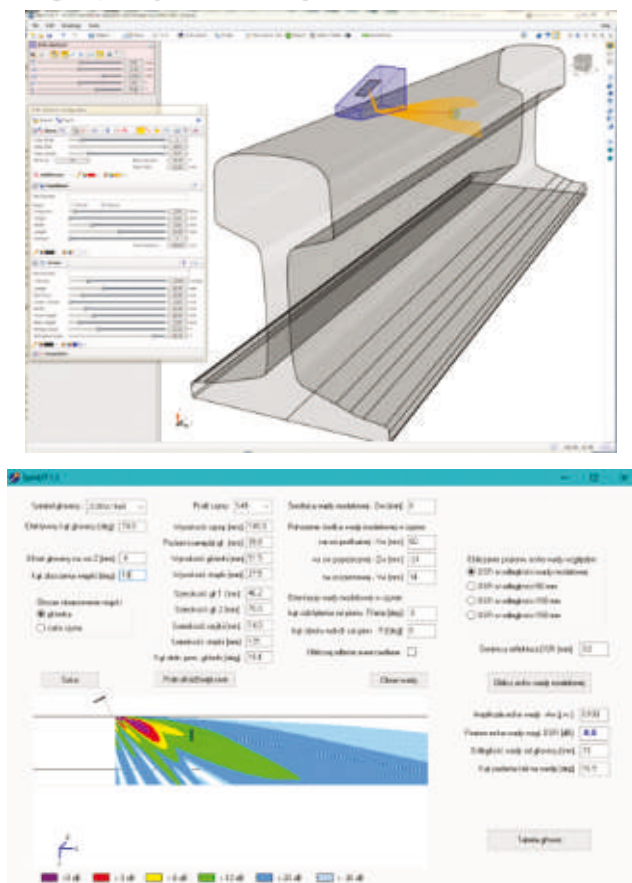
*Autor korespondencyjny.

E-mail: tkatz@ippt.pan.pl

tarczowego DDSR = 3 mm usytuowanego na osi wiązki w tej samej odległości co wada modelowa. Jako reflektor modelowy odwzorowujący wady naturalne stosowany jest płaski dysk (reflektor tarczowy) o dowolnie określonej średnicy i orientacji, który można umieszczać w dowolnym miejscu modelowej szyny kolejowej. Oprogramowanie oblicza rozkład pola ultradźwiękowego (dokładniej rozkład ciśnienia akustycznego) modelowanej głowicy, wychodząc z podstawowej zasady Huygensa. Mówi ona, że ciśnienie akustyczne w punkcie pola określonym przez wektor $\mathbf{r}$ jest sumą ciśnień kulistych fal cząstkowych wytwarzanych przez wszystkie punkty tworzące aktywną powierzchnię przetwornika. W izotropowym ośrodku propagacji dla fal mechanicznych zasada ta może być wyrażona w postaci całki Rayleigha:

$$p(\mathbf{r}) = \iint (p_0 e^{-ikr} / \lambda r) dS \quad (1)$$

gdzie: p jest ciśnieniem akustycznym w punkcie $\mathbf{r}$, sumowanie odbywa się po całej aktywnej powierzchni przetwornika; p_0 jest ciśnieniem akustycznym na powierzchni przetwornika, k jest liczbą falową, λ to długość fali, zaś $\mathbf{r}$ jest odległością między punktem $\mathbf{r}$, gdzie oblicza się ciśnienie akustyczne a bieżącym punktem integracji na powierzchni przetwornika.

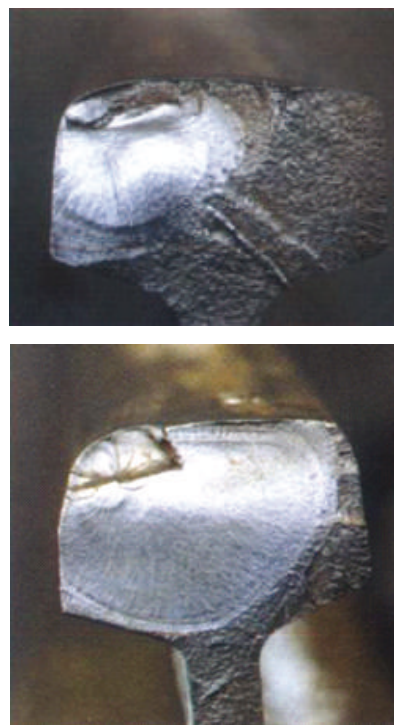


Rys. 1. Oprogramowanie BeamTool (lewe okno) oraz SymUT (prawe okno).

Fig. 1. BeamTool software (left window) and SymUT (right window).

3. Model wady typu pęknięcie poprzeczne pionowe (211)

Na podstawie analizy dotychczasowych wyników badań szyn określono najpierw najbardziej krytyczny typ wad kontaktowo-zmęczeniowych, które mogą być niemożliwe do wykrycia dotychczas stosowanymi technikami ultradźwiękowymi. Wada ta to pęknięcie poprzeczne pionowe postępujące w głowce szyny (pęknięcie zmęczeniowe – 211 wg. Katalogu Wad). Wada ta rozwija się powoli od wewnętrznego wtrącenia lub rozwiniętej wady typu ang. Shelling lub ang. Head Checking i może pozostać niewykryta aż do czasu złamania szyny. Obecnie stosowane techniki badań ultradźwiękowych szyn nie są w stanie wykryć tej wady jeśli położona jest w bocznej części głowki (patrz rys. 2). Strefa ta pozostaje poza obszarem przeszukiwania standardowych układów głowic, ustawionych na środku głowki szyny i skierowanych wzdłuż jej osi. Rys. 2 przedstawia inicjator pęknięcia oraz charakterystyczną kolistą strefę rozwoju wady zmęczeniowej powstającej na skutek działania naprężenia rozciągającego wzdłuż osi szyny oraz sił pionowych powstających wskutek przejazdu pociągu.



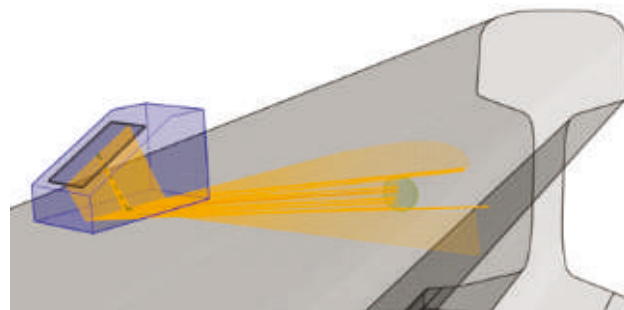
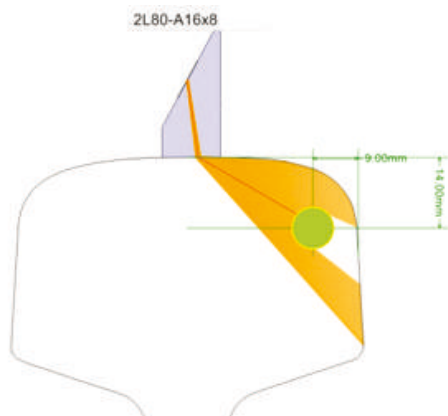
Rys. 2. Pęknięcie poprzeczne postępujące (pęknięcie zmęczeniowe) w różnych stopniach rozwoju.

Fig. 2. Transverse progressive cracking (fatigue cracking) in various stages of development.

Uwzględniając typowe charakterystyki w/w wad takie jak:

- położenie w objętości głowki szyny;
- orientacja i kierunek propagacji;
- typowy kształt i wielkość;

stworzono szereg wad modelowych możliwie najlepiej odzwierciedlających wady rzeczywiste w kontekście badań ultradźwiękowych. Każda z wad modelowych uwzględnia istotne aspekty wad rzeczywistych, takie jak usytuowanie w



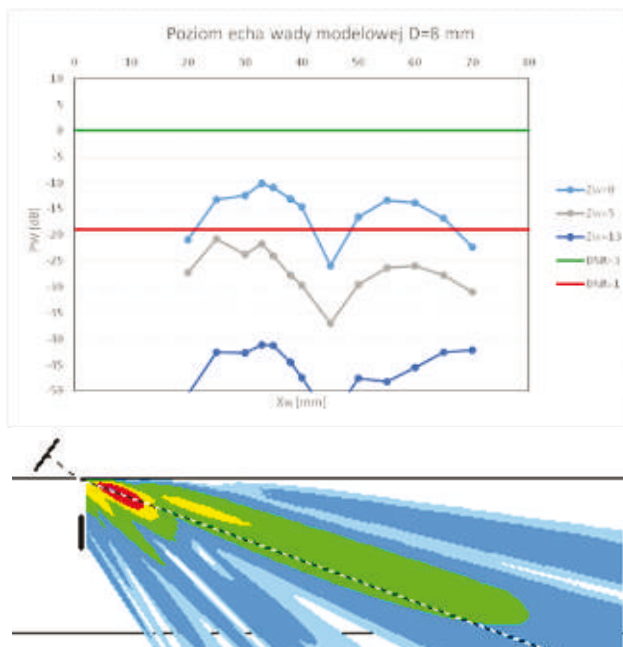
Rys. 3. Wizualizacja lokalizacji wady typu pęknięcie poprzeczne postępujące w główce szyny (pęknięcie zmęczeniowe).

Fig. 3. Visualization of the location of a defect like a transverse crack progressing in the rail head (fatigue crack).

szynie, orientacja oraz wielkość. Modelowym odpowiednikiem wady (211) został reflektor w postaci płaskiego dysku o średnicy 8 mm o odpowiednio dobranej orientacji. Reflektor umieszczony został w modelu szyny w bocznej części głowki, jak pokazano na rys. 3. Proces modelowania uwzględniał zmiany położenia oraz płaszczyzny odchylenia reflektora na osi poprzecznej oraz podłużnej.

W pierwszym etapie prac oszacowana została czułość badania dla standardowej głowicy fal poprzecznych z przetwornikiem kwadratowym o długości boku $a=15\text{ mm}$, częstotliwości drgań przetwornika $f=2\text{ MHz}$ oraz kącie załamania $\beta=70^\circ$. Jest to jedna z głowic ultradźwiękowych zalecanych do badania szyn kolejowych w normie PN-EN 16729-3 [3]. Rys. 4 przedstawia zobrazowanie rozkładu ciśnienia akustycznego głowicy 2T70-A15x15 oraz wykresy zależności poziomu echa wady modelowej $\varnothing=8\text{ mm}$ od jej odległości od głowicy. Wykres w prawym oknie potwierdza, że wyżej opisana głowica nie jest w stanie zarejestrować echa od wady modelowej na poziomie wystarczającym do zobrazowania na defektoskopie powyżej poziomu szumów dla położenia wady odsuniętych od osi szyny o $Z_w=13\text{ mm}$ oraz $Z_w=5\text{ mm}$. Amplituda echa od reflektora modelowego ustawionego dokładnie w osi szyny ($Z_w=0$) osiąga maksimum, -10 dB względem idealnego reflektora DSR=3mm, w odległości 30mm od środka głowicy. Jest to poziom echa wady dający pewne szanse na jej wykrycie jednak daleki od optymalnego. Przesunięcie reflektora modelowego w bok o 13mm ($Z_w=13$) powoduje, że maksymalny poziom echa wady spada poniżej -40 dB , co w praktyce oznacza całkowity brak możliwości detekcji.

W trakcie symulacji komputerowych przy wykorzystaniu programu SymUT przetestowano różne konfiguracje parametrów głowic i określono optymalne parametry konstrukcyjne (częstotliwość, kąt załamania, kąt zboczenia, rozmiary przetwornika, a także położenie i orientację głowicy na głowce szyny) dla głowic do wykrywania pęknięć poprzecznych prostopadłych do powierzchni badania. Na tej podstawie opracowano projekt głowicy ultradźwiękowej, oznaczonej symbolem 2L80-A16x8, zoptymalizowanej do wykrywania pęknięć poprzecznych głowki szyny (pęknięć zmęczeniowych) oznaczonych w katalogu wad UIC 712 R kodami 111 i 211.

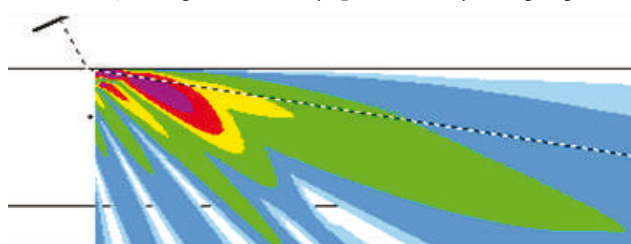


starannego procesu kalibracji na próbkach wzorcowych.

Symulacji poddana została również wada modelowa umiejscowiona w odległości 13mm ($Z_w=13\text{mm}$) od osi szyny odpowiadająca nieco bardziej rozwiniętej wadzie typu zmęczeniowego pęknięcia poprzecznego. Widoczna na wykresie krzywa poziomu echa sygnału w dwóch miejscach przewyższa poziom amplitudy reflektora $DSR=3$. Wystąpienie dwóch maksimów na wykresie wiąże się z rozkładem pola akustycznego głowicy (pokazanego na rys. 5 po lewej stronie), w którym występują silne listki boczne wiązki. Wyniki symulacji pokazane na wykresie potwierdzają dobry poziom amplitudy echa od wad modelujących zmęczeniowe pęknięcia położone w bocznych strefach głowki.

Projekt głowicy o symbolu 2L80-A16x8 zoptymalizowanej do wykrywania wyżej opisanych wad zakłada wykonanie głowicy kątowej fal podłużnych o kącie załamania $\beta=80^\circ$, częstotliwości $f=2\text{ MHz}$ i prostokątnym kształcie przetwornika (16x8mm).

W trakcie modelowania zauważono, że wiele analizowanych typów głowic, o dużych wartościach kąta załamania β , wykazuje znaczną rozbieżność między nominalnym kątem załamania β odpowiadającym osi geometrycznej wiązki, a efektywnym kątem β odpowiadającym osi akustycznej pola ultradźwiękowego. Rozkłady pola akustycznego głowic



Rys. 5. Rozkład ciśnienia akustycznego i wykres poziomu echa wady w funkcji odległości do wady dla głowicy 2L80-16x8.

Fig. 5. Sound pressure distribution and echo level plot of the model defect as a function of distance to the defect for the 2L80-16x8 probe.

pokazane na rys. 4 i 5 obrazują ten efekt, który należy uwzględnić przy projektowaniu głowic ultradźwiękowych na kąty załamania w zakresie 70 - 80.

W oparciu o opisany wyżej projekt zostanie wykonany

prototyp głowicy ultradźwiękowej 2L80-A16x8. Prototyp ten zostanie przetestowany na specjalnie przygotowanych próbkach odniesienia z otworami płaskodennymi odpowiadającymi rozmiarom, położeniom i orientacji wad modelowych. W każdej próbce została wykonana wada sztuczna w postaci poziomego otworu płaskodennego o średnicy $\varnothing=8\text{mm}$ i głębokości 50mm. W różnych próbkach otwory zostały wykonane w różnych odległościach, odpowiednio 5, 13 i 24 mm, od środka głowki szyny, tak aby można było sprawdzić czułość wykonanego prototypu głowicy na wady zlokalizowane w różnych obszarach głowki szyny i porównać ją z wynikami symulacji.

4. Model wady kontaktowo-zmęczeniowej – Head Checking (2223)

Kolejną typową wadą występującą na polskich szlakach kolejowych jest wada nr 2223 opisana w katalogu wad szyn jako pęknięcie na wewnętrznej krawędzi głowki szyny, czyli



Rys. 6. Próbkę odniesienia do sprawdzenia wykrywalności wad typu 211.

Fig 6. Reference samples for checking the detectability of 211 type defects.

tw. Head Checking (H-C). Jest to jedna z najbardziej niebezpiecznych wad głowki szyny, mogąca prowadzić do całkowitego pęknięcia lub odpadnięcia znacznej części powierzchni tocznej szyny. Powstaje ona w wyniku zmęczenia materiału na skutek kontaktu koło-szyna.

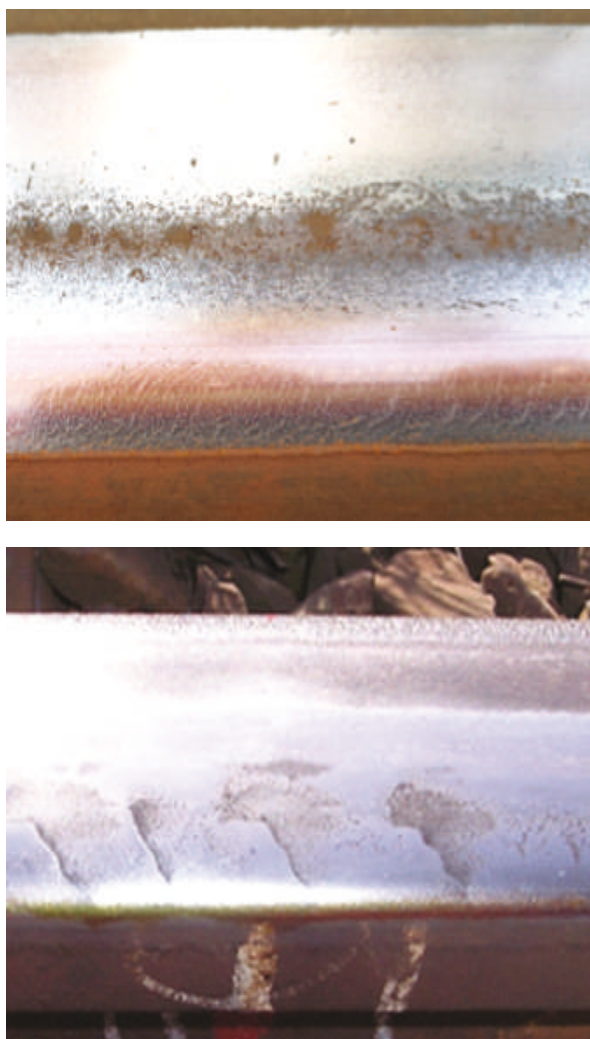
Na rys. 7 przedstawiono wady H-C występujące w różnych odcinkach eksploatowanego toru. Obraz wady widoczny w lewym oknie jako seria powtarzających się pęknięć o małej szczelinie jest charakterystyczny dla łuków torów o promieniu 400-1500m [4]. Ten typ wad H-C powstaje w wyniku ruchu pociągów po łuku. Powstaje wtedy tzw. styk dwupunktowy dla koła nabiegającego.

Efekt dużej ilości małych pęknięć wiąże się z dodatkowymi obciążeniami poprzecznymi powstającymi na skutek kontaktu obrzeża koła z wewnętrzną krawędzią szyny, który powoduje szlifowanie bocznej krawędzi głowki. Niestety proces szlifowania krawędzi głowki na skutek eksploatacji toru jest często znacznie wolniejszy niż szybkość propagacji pęknięć. Wyklucza to możliwość samoistnej naprawy głowki poprzez całkowite zeszlifowanie pęknięć na skutek przejazdu pociągów.

Obraz wizualny wady H-C na głowce szyny w łuku znacząco różni się od pęknięć tego samego typu zlokalizowanych na prostym odcinku toru (prawo okno rys. 7). Różnica wynika

z faktu, że na prostych odcinkach toru, w trakcie kontaktu szyna-koło jest przeważnie styk jednopunktowy, gdzie występuje kontakt główki szyny z płaszczyzną toczną koła. Na prostych odcinkach toru nie ma efektu szlifowania główki szyny, a pęknięcia widoczne na powierzchni posiadają większe rozwarście szczeliny i występują w większych odległościach od siebie.

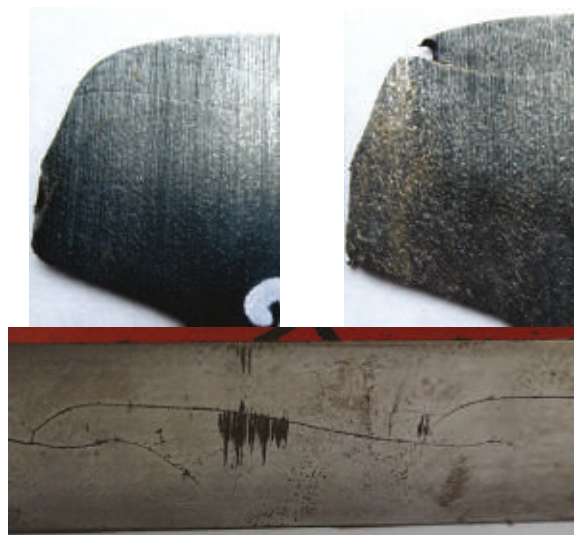
Przykładowy przebieg propagacji pęknięcia H-C w dwóch płaszczyznach przekroju (tj. wzdłuż i w poprzek główki szyny) przedstawiony na rys. 8 daje wyobrażenie o tym jak propaguje pęknięcie H-C wewnątrz materiału. Widać, że kąt propagacji pęknięcia znacząco zmienia się wraz z jego rozwojem.



Rys. 7. Zobrazowanie wady nr 2223 - Head Checking. W górnym oknie obraz pęknięć na łuku toru, dolne okno widoczne pęknięcia na odcinku prostym.

Fig. 7. Visualization of defect No. 2223 - Head Checking. Upper window shows image of cracks on track curve, lower window shows cracks on straight section.

Bezpośrednio przy krawędzi główki pęknięcie dąży ku dołowi, jednak wraz ze wzrostem głębokości zaczyna propagować się prawie równoległe do powierzchni tocznej szyny. Prace badawczo-rozwojowe nad wadami typu Head Checking zostały podzielone na dwa etapy. Pierwszy etap dotyczy wad



Rys. 7. Zobrazowanie wady nr 2223 - Head Checking. W górnym oknie obraz pęknięć na łuku toru, dolne okno widoczne pęknięcia na odcinku prostym.

Fig. 7. Visualization of defect No. 2223 - Head Checking. Upper window shows image of cracks on track curve, lower window shows cracks on straight section.

w początkowym stadium rozwoju, kiedy głębokość pęknięcia w główce szyny nie przekracza 3-4 mm. Na podstawie danych o położeniu wady na powierzchni główki, orientacji oraz długości opracowano i wykonano próbki odniesienia z nacięciami bocznej powierzchni główki o głębokości 2 oraz 4 mm (rys. 9). Nacięcia wykonano tarczą R50 przy kącie natarcia w płaszczyźnie poziomej równym 35° i w płaszczyźnie pionowej prostopadłej do linii wady $\Theta = 63^\circ$ (licząc od pionowego ustawienia tarczy). Próbkę te mają za zadanie reprezentować wady H-C w początkowym stadium rozwoju i będą służyć do testowania i weryfikacji głowicy zaprojektowanej do wykrywania tego rodzaju wad.

Pierwsze doświadczenia przeprowadzone na w/w próbkach potwierdziły możliwość skutecznego wykrywania wad H-C głowicą o symbolu 2R-A7x7 (rys. 10). Jest to głowica fal powierzchniowych o częstotliwości $f = 2$ MHz z przetwornikiem kwadratowym o długości boku 7 mm. Stosunkowo niska częstotliwość głowicy oznacza, że długość wytwarzanej przez nią fali powierzchniowej wynosi $\lambda_R = 1,5$ mm. Taka, stosunkowo duża długość fali redukuje możliwość powstawania fałszywych wskazań od drobnych uszkodzeń (zarysowań, wżerów korozyjnych) powierzchni tocznej szyn, zapewniając jednocześnie możliwość wykrywania pęknięć o głębokości powyżej 1,5 mm. Dodatkowo, na korzyść wyboru przetwornika o niższej częstotliwości, przemawia fakt, że posiada on krótsze pole bliskie oraz większą rozbieżność wiązki. Oba te czynniki istotnie wpływają na wykrywalność wad typu H-C przez głowicę. Większa szerokość oraz rozbieżność wiązki w strefie występowania wad H-C (na wewnętrznej krawędzi główki) podwyższa prawdopodobieństwo ich wykrycia niezależnie od naturalnego zróżnicowania w ich orientacji i położeniu. Niezależnie od pozytywnych wyników testów przeprowadzonych na próbkach z wadami sztucznymi, w

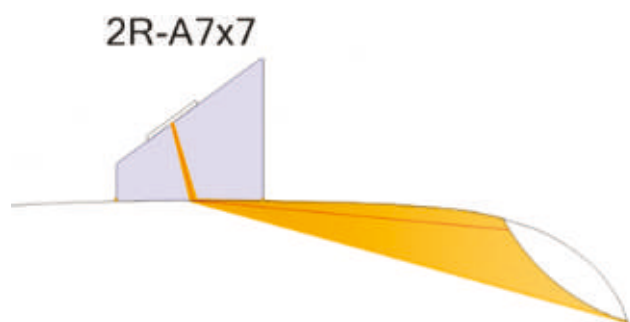
dalszym etapie prac, planowane jest sprawdzenie w/w głowic na rzeczywistych wadach H-C występujących w eksploatowanych torach.

Drugi etap prac nad wadami typu H-C będzie dotyczył wykrywania ich rozwiniętej postaci w główce szyny. Na etapie pisania artykułu stworzone zostały wady modelowe oraz próbki odniesienia z wadami sztucznymi reprezentującymi rozwinięte postacie wady H-C występujące w torze. Próbki



Rys. 7. Zobrazowanie wady nr 2223 - Head Checking. W górnym oknie obraz pęknięć na łuku toru, dolne okno widoczne pęknięcia na odcinku prostym.

Fig. 7. Visualization of defect No. 2223 - Head Checking. Upper window shows image of cracks on track curve, lower window shows cracks on straight section.



Rys. 10. Schemat ustawienia głowicy fal powierzchniowych względem wady Head Checking.

Fig. 10. Scheme for positioning the surface wave probe against the Head Checking defect.

te posłużą do doświadczalnej weryfikacji odpowiedniej głowicy ultradźwiękowej zaprojektowanej w oparciu o symulacje komputerowe.

Pod pojęciem rozwiniętej postaci wady H-C będziemy rozumieć pęknięcia, które znajdują się w materiale główki szyny na głębokości, co najmniej, 10 mm od powierzchni. Dodatkową cechą rozwiniętej wady H-C jest wyraźna zmiana kąta propagacji wady w głąb materiału wraz z rozwojem pęknięcia. Dla rozwiniętych postaci wad H-C kąt ten dąży do wartości $1-2^\circ$ względem płaszczyzny poziomej (rys. 8) co oznacza, że pęknięcie propaguje się w materiale niemal równoległe do płaszczyzny tocznej główki. W sytuacji połączenia się kolejno następujących po sobie pęknięć H-C (rys. 7) może dojść do całkowitego odspojenia materiału główki na powierzchni tocznej szyny (łuszczenie się lub wykruszenia na bocznej krawędzi szyny) [4]. Innym niebezpiecznym skutkiem rozwoju wad typu H-C może być inicjacja pionowego pęknięcia poprzecznego (rys. 2), które doprowadzi do jej ostatecznego złamania. Rys. 11 przedstawia w lewym oknie charakterystyczne wykruszenie krawędzi szyny, którego przyczyną jest połączenie się kolejnych pęknięć H-C. Natomiast zdjęcie z prawej strony rys. 11 [5] obrazuje jeden z najniebezpieczniejszych przypadków uszkodzenia toru poprzez złamanie szyny w wyniku rozrostu poprzecznego pęknięcia zmęczeniowego zainicjowanego od rozwiniętej wady typu H-C.

Dotychczasowe prace nad projektem głowicy skutecznie wykrywającej wady typu H-C w stadium zaawansowanym wskazują na konieczność wykorzystania dolnej powierzchni główki szyny do odbicia fali ultradźwiękowej. Wykorzystanie odbicia



Rys. 11. Zobrazowanie wykruszenia krawędzi główki (lewy obraz) oraz całkowitego pęknięcia poprzecznego (prawy obraz) zainicjowanego od wady typu Head Check.

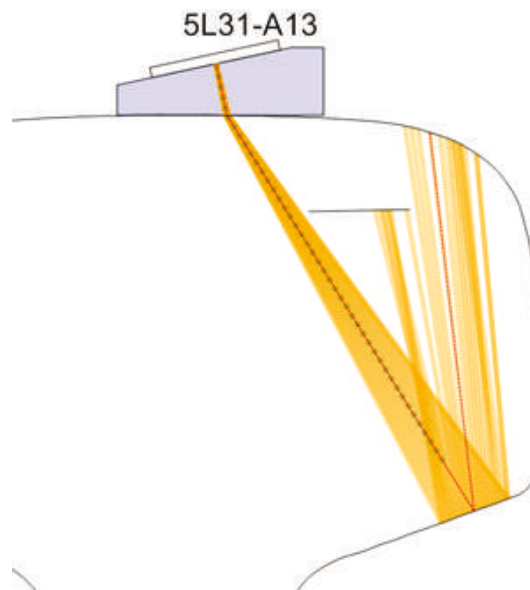
Fig. 11. Visualization of head edge chipping (left image) and a complete transverse crack (right image) initiated from a Head Checking defect.

fali od powierzchni przeciwległej, czyli swego rodzaju echa dna, daje możliwość wykrywania rozwiniętych wad typu H-C niezależnie od ich dokładnej orientacji czy głębokości zalegania pod powierzchnią toczną główki szyny. Badanie takie może bazować nie tylko na detekcji echa odbitego bezpośrednio od powierzchni wady (którego wysokość silnie zależy od orientacji wady i które może znajdować się w strefie martwej głowicy) lecz także na obserwacji wysokości echa dna odbitego od dolnej powierzchni główki. Wielkość spadku amplitudy echa dna (wskutek przesłonięcia wiązki przez wadę) można powiązać z głębokością penetracji wady H-C w kierunku środka szyny. Informacją uzyskiwaną z takiego badania będzie więc, nie tylko wykrycie obecności wady lecz także przybliżona ocena stopnia jej rozwoju. Obserwując ewentualne dodatkowe echa pochodzące bezpośrednio od powierzchni wady można będzie określić głębokość jej zalegania pod powierzchnią toczną główki.

Wstępne wyniki symulacji wskazują na możliwość zastosowania głowicy kątowej fal podłużnych o częstotliwości $f = 4 - 5$ MHz i średnicy przetwornika 10 - 13mm. Kąt załamania tych głowic powinien być dopasowany do kąta odchylenia dolnej powierzchni główki od płaszczyzny poziomej, czyli powinien wynosić ok. 20° .

Założeniem kompleksowej techniki wykrywania i oceny wad typu H-C zarówno w stadium początkowym jak rozwiniętym jest możliwość wiarygodnej detekcji oraz oceny stopnia rozwoju tych wad w materiale szyny. Zobrazowania na rys. 12 przedstawiają dodatkowe schematy ustawień głowic ultradźwiękowych, które mogą być wykorzystane do wykrywania i oceny rozwiniętych wad typu H-C.

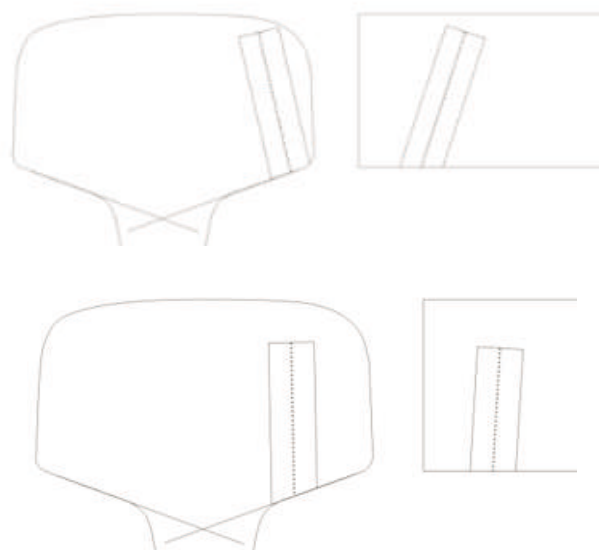
W celu doświadczalnego sprawdzenia skuteczności głowic zaprojektowanych do wykrywania rozwiniętych wad typu H-C zostały przygotowane specjalne próbki szyn z wadami sztucznymi reprezentującymi średniozaawansowaną i zaawansowaną postać wady



Rys. 12. Zobrazowania możliwych technik badania z wykorzystaniem odbicia fali ultradźwiękowej od dolnej powierzchni główki szyny.

Fig. 12. Visualize of a possible examination techniques using the reflection of the ultrasound wave from the lower surface of the rail head.

H-C. Stadium średniozaawansowane (górny obraz rys. 13) charakteryzuje się większymi kątami reflektora względem płaszczyzny poziomej oraz mniejszą głębokością (ok. 3mm) pod powierzchnią toczną szyny. Stadium zaawansowane (dolny obraz rys. 13) charakteryzuje się prawie równoległą orientacją reflektora w stosunku do płaszczyzny tocznej szyny oraz głębokością zalegania wady wynoszącą ok. 9 mm.



Rys. 13. Próbkki odniesienia z wadami sztucznymi do testowania głowic ultradźwiękowych projektowanych do wykrywania rozwiniętych wad typu H-C.
Fig. 13. Reference samples with artificial defects for testing ultrasonic heads designed to detect developed H-C defects.

5. Podsumowanie

- Zastosowanie modelowania komputerowego do projektowania głowic i symulacji badań ultradźwiękowych okazało się przydatne przy opracowywaniu metod detekcji i oceny wad kontaktowo-zmęczeniowych charakterystycznych dla kolei wysokich prędkości. Bardzo istotna w tym kontekście jest również znajomość typów, lokalizacji oraz sposobów rozwijania się wad w szynie kolejowej.
- Ze względu na złożony kształt przekroju poprzecznego, nierównoległe powierzchnie oraz wiele krzywizn szyna kolejowa stanowi obiekt 3D trudny do matematycznego opisu i modelowania propagacji wiązki ultradźwiękowej. Dodatkowo, wiele krytycznych wad szyn kolejowych (np. Head Checking) rozpoczyna się w trudno dostępnych dla badań ultradźwiękowych miejscach szyny (np. przy górnej krawędzi główki). Sytuacja komplikuje się jeszcze bardziej przez fakt, że diagnostyczne badania szyn należy prowadzić w sposób szybki i zautomatyzowany, bez możliwości indywidualnego analizowania i wymiarowania poszczególnych wskazań. W sytuacji obserwowanego wzrostu występowania groźnych i trudnych do wykrycia wad kontaktowo-zmęczeniowych i pęknięć poprzecznych problem ten nabiera wyjątkowo dużego znaczenia dla bezpieczeństwa ruchu kolejowego.
- Dotychczas stosowane techniki defektoskopowe nie są wystarczająco skuteczne zarówno jeśli chodzi o wykrywanie, jak też ocenę głębokości i rozległości tego typu wad. W dotychczasowej praktyce, ocenę wad typu Head Checking przeprowadza się jedynie metodą wizualną w oparciu o widoczny na zewnątrz zarys pęknięcia. Nie daje to dostatecznej pewności co do rzeczywistego rozmiaru wady wewnątrz szyny. W wyniku dotychczasowych prac mających na celu znalezienie optymalnej konfiguracji przetworników do badań ultradźwiękowych szyn zostały opracowane głowice do wykrywania pęknięć poprzecznych pionowych oraz pęknięć typu Head Checking w

początkowej fazie ich rozwoju w bocznej części główki szyny kolejowej. Efektem końcowym tych prac będzie opracowanie optymalnej konfiguracji przetworników ultradźwiękowych dla jednotokowych stanowisk pomiarowych ręcznych oraz wagonu defektoskopowego umożliwiających wykrywanie i klasyfikowanie większej liczby wad szyn niż możliwe było to do tej pory. Doprowadzi to do zwiększenia bezpieczeństwa ruchu pojazdów szynowych na polskich liniach kolejowych.

Praca powstaje w wyniku realizacji projektu badawczego o nr POIR.04.01.01.-00-0011/17 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia BRIK.

6. Literatura

- [1] B. Ładecki, M. Nagieć, 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.
- [8] J. Ziółko: Utrzymanie i modernizacja konstrukcji stalowych. Arkady, Warszawa 1991.
- [9] J. Ziółko, W. Włodarczyk, Z. Mendera, S. Włodarczyk: Konstrukcje stalowe specjalne. Arkady, Warszawa, 1995.

Piotr Bielawski*

Polskie Towarzystwo Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP Oddział w Szczecinie

Diagnozowanie potencjału eksploatacyjnego zespołu maszyn

Diagnosing the wear margin of the machine sets

STRESZCZENIE

Zespoły maszyn są częścią technicznych systemów produkcyjnych, ulegają zużyciu podczas użytkowania a ich potencjał eksploatacyjny może zostać przywrócony podczas obsługi. Efektywność i skuteczność obsługiowania uzależniona jest w dużym stopniu od informacji o potencjale eksploatacyjnym zespołu maszyn. Aktualną, rzeczywistą wartość potencjału eksploatacyjnego można uzyskać poprzez diagnozowanie zespołu maszyn. W artykule wykazano, że jakość informacji o potencjale eksploatacyjnym można podwyższyć dzieląc zespół maszyn na zespoły funkcjonalne, które mogą być obsługiwane oddzielnie. Wskazano na konieczność budowania modeli zespołów funkcjonalnych, z których może zbudować model dowolnego zespołu maszyn. Zaproponowano budowę następujących zespołów funkcjonalnych: rurociąg – maszyna, wirnik zespołu maszyn podparty w łożyskach tocznych, wirnik zespołu maszyn podparty w łożyskach ślizgowych, oscylator bez wymuszenia zewnętrznego, oscylator z wymuszeniem zewnętrznym, przekładnie z poślizgiem, przekładnie bez poślizgu, łożyska toczne. Dla każdego z wymienionych zespołów funkcjonalnych wskazano miary sygnałów diagnostycznych.

Słowa kluczowe: wirnik zespołu maszyn; zespół funkcjonalny; potencjał eksploatacyjny; diagnozowanie

ABSTRACT

Machine sets are part of technical production systems, they wear out during use and their wear margin can be restored during maintenance. The efficiency and effectiveness of maintenance depends to a large extent on information about the wear margin of the machine sets. The current actual value of the wear margin can be obtained by diagnosing the machine set. The article shows that the quality of information about wear margin can be increased by dividing the machine set into functional units that can be maintained separately. It was pointed out that it is necessary to build models of functional units, from which it can build a model of any machine set. The construction of the following functional units was proposed: pipeline-machine, rotor of the machine set supported in rolling bearings, rotor of the machine set supported in slide bearings, oscillator without external forcing, oscillator with external forcing, gearboxes with slip, gearboxes without slip, rolling bearings. Measures of diagnostic signals are indicated for each of the listed functional units.

Keywords: machine set, functional unit, wear margin; diagnosing

1. Wstęp

Przedsiębiorstwo produkcyjne osiąga korzyści (w tym zyski) wytwarzając wyroby. Osiągane korzyści zależą od jakości wyrobu, jakości systemu produkcyjnego przedsiębiorstwa i jakości zarządzania przedsiębiorstwem. Podstawą podejmowania decyzji w zarządzaniu są informacje o rzeczywistych wartościach miar cech opisujących jakość przedsiębiorstwa, jakości wyrobu i jakości systemu produkcyjnego. Przedsiębiorstwo, chcąc zmienić wartość miary cechy/cech opisującej jakość przedsiębiorstwa musi spowodować zmianę wartości miar określonych cech systemu produkcyjnego. Warunkiem powodzenia takich działań jest istnienie w przedsiębiorstwie systemu informatycznego pozwalającego na pomiar rzeczywistych wartości miar cech i porównanie wartości rzeczywistych z wartościami pożądanymi. Zbiór cech za pomocą, których można opisać jakość systemu produkcyjnego przedsiębiorstwa jest zbiorem usystematyzowanym i opisanym w literaturze. Zbiór cech podzielony jest na podzbiory, w podzbiore efektywność mieszczą się takie cechy jak sprawność energetyczna (efficiency) i wydajność (capability).

Rzeczywiste wartości miar cech technicznego systemu produkcyjnego zależą głównie od tego, jakie wartości zostały im nadane na etapie projektowania i wytwarzania i w jakim stopniu uległy one degradacji podczas użytkowania. Zespół wartości miar cech, których wartości miar nadawane są podczas wytwarzania, ulegają degradacji podczas użytkowania i których wartości mogą być przywrócone podczas obsługi nazywany jest potencjałem eksploatacyjnym lub „wear margin”.

Częścią składową wielu technicznych systemów produkcyjnych są podsystemy stanowiące układ typu maszyna napędzana – maszyna napędzająca zwana dalej zespołem maszyn. Obsługiwanie takich układów nie jest dostatecznie efektywne i skuteczne ponieważ:

- liczba cech opisujących potencjał eksploatacyjny zespołu maszyn jest duża;
- degradacja poszczególnych elementów układu nie jest jednakowa;
- brakuje dostatecznie skutecznych metod identyfikacji potencjału eksploatacyjnego zespołu maszyn.

Rozwiązania powyższych problemów obsługi nazywane są w [1]:

* Autor korespondencyjny.

E-mail: bielawskipiotr80@gmail.com

- dekompozycji zespołu maszyn na zespoły funkcjonalne;
- znalezieniu zastępczych miar potencjału eksploatacyjnego zespołu funkcjonalnego i dokonanie opisu zależności miara zastępcza potencjału eksploatacyjnego – miara cechy pożądanej zespołu funkcjonalnego;
- ponieważ zastępcze miary potencjału są z reguły niemierzalne podczas użytkowania systemu produkcyjnego to konieczne jest znalezienie mierzalnych symptomów potencjału eksploatacyjnego i określenie relacji miara potencjału eksploatacyjnego – miara symptomu.

W artykule podjęto próbę zdefiniowania zespołów funkcjonalnych układu maszyn w systemie produkcyjnym przedsiębiorstwa.

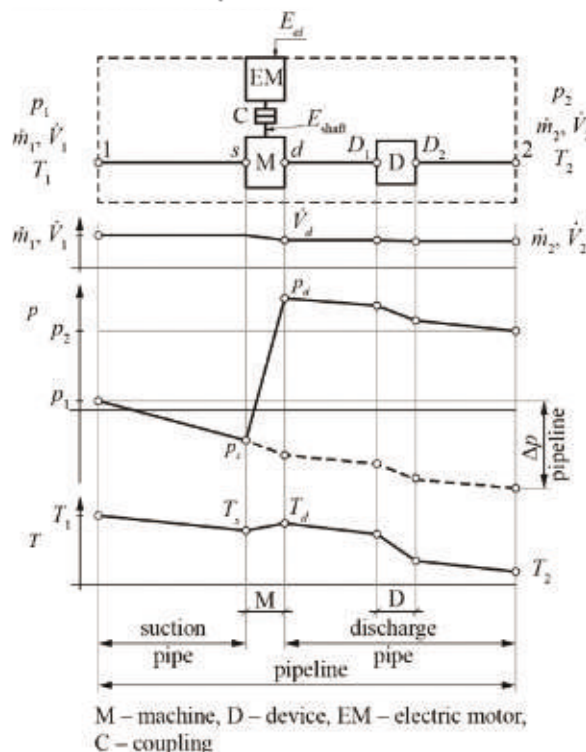
2. Zespoły funkcjonalne zespołu maszyn

Podsystemy technicznych systemów produkcyjnych realizują określone cele cząstkowe, mają określone granice i określone wartości miar pożądanych cech. Potencjał eksploatacyjny takich podsystemów powstaje podczas wytwarzania urządzeń składowych oraz podczas montażu podsystemu. Potencjał eksploatacyjny wyczerpuje się podczas użytkowania podsystemu na skutek nie dającego się wyeliminować zużycia. Intensywność zużywania nie jest jednakowa dla wszystkich zespołów funkcjonalnych podsystemu. Skutkuje to nierównomiernym w czasie wyczerpywaniem potencjału eksploatacyjnego poszczególnych zespołów funkcjonalnych. Zespół funkcjonalny o wyczerpanym potencjale eksploatacyjnym nie może wykonywać swoich funkcji z wymaganą jakością lub może nagle przestać działać co w wielu przypadkach oznacza brak możliwości działania całego podsystemu. W niniejszym artykule przyjęto założenie, że:

- w aspekcie ekonomicznym ma sens przywracanie potencjału tylko tych zespołów funkcjonalnych, których potencjał został wyczerpany i których sanacji będzie można dokonywać w dużym stopniu oddzielnie;
- uruchomienie procedury przywracania potencjału może nastąpić po stwierdzeniu, że potencjał został wyczerpany. Informacje o potencjale są wynikiem procesu diagnozowania danego zespołu funkcjonalnego;
- podstawą diagnozowania zespołów funkcjonalnych są modele diagnostyczne opisujące związki między miarami potencjału eksploatacyjnego i miarami symptomu diagnostycznego;
- ze względu na różnorodność podsystemów wskazane jest tworzenie modeli zespołów funkcjonalnych i modeli identyfikacji zespołów funkcjonalnych, z których może zbudować model dowolnego podsystemu: dla takich samych zespołów funkcjonalnych można stosować takie same techniki diagnozowania niezależnie od przeznaczenia i szczegółów konstrukcyjnych podsystemu.

W technicznych systemach produkcyjnych występują podsystemy składające się z maszyn współpracujących z urządzeniami, które są połączone z maszynami za pomocą

rurociągów. Często występującym podsystemem jest podsystem transportu płynów z obszaru o energii niższej do wyższej, rys.1. Może to być główny podsystem lub występować w systemie produkcyjnym wielokrotnie w różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych realizujących odmienne zadania cząstkowe.



Rys 1. Zespół maszyn z rurociągiem i jakościowy przebieg p , $\dot{m}$, T wzdłuż rurociągu [2]

Fig. 1. Machine set with pipeline and qualitative changes of p , $\dot{m}$, T along the pipeline [2].

W warunkach ustalonych sprawność energetyczną podsystemu z rys. 1 można wyznaczyć z zależności:

$$\eta_e = \frac{\dot{m} \cdot (p_2 - p_1)}{E_{el}} = \frac{V \cdot (p_2 - p_1)}{P_{el}} \quad (1)$$

gdzie:

- p_1 ciśnienie płynu w punkcie początkowym podsystemu,
- p_2 ciśnienie płynu w punkcie końcowym podsystemu,
- P_{el} moc elektryczna doprowadzona do podsystemu,
- V strumień objętości płynu w podsystemie.

Rurociąg i część współpracującej z nim maszyny tworzą zespół funkcjonalny zespołu maszyn zwany zespołem funkcjonalnym „rurociąg – maszyna”, podobnie część silnika elektrycznego i współpracujące z nim urządzenia zasilające stanowią zespół funkcjonalny o sprawności.

W układzie maszyn maszyna napędzająca i maszyna napędzana może, rys 2:

- mieć jeden wspólny wał;
- dwa wały połączone sprzęgłem;
- dwa wały połączone przekładnią.

Jeżeli maszyny mają wspólny wał lub wały dwóch maszyn połączone są sprzęgłem sztywnym bez poślizgu to taki zespół można uznać za zespół funkcjonalny i określić jako „wornik

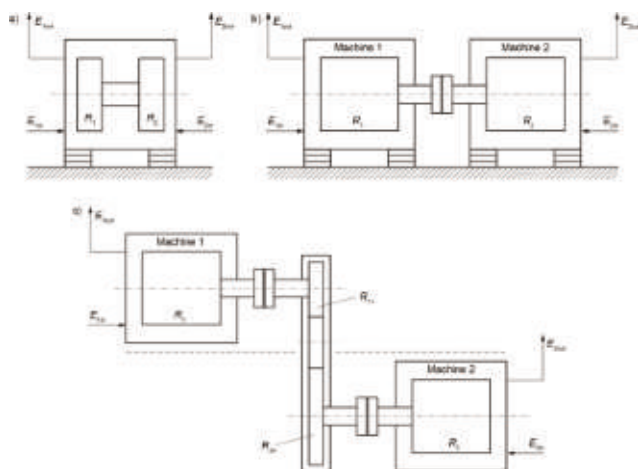
zespołu maszyn”. Ze względu na rodzaj zastosowanych w maszynach łożysk wyróżnia się:

- wirnik zespołu podparty w łożyskach tocznych;
- wirnik zespołu podparty w łożyskach ślizgowych.

Dwa współpracujące wirniki dwóch różnych wirników zespołów maszyn mogą wchodzić w skład przekładni. Przekładnię należy traktować jako zespół funkcjonalny. W identyfikacji przekładni należy wyróżnić:

- przekładnie bez poślizgu
- przekładnie z poślizgiem.

W skład zespołów maszyn mogą wchodzić zespoły



Rys.2. Wirniki zespołu maszyna napędzająca – maszyna napędzana: a) jeden wirnik z jednym wałem, b) jeden wirnik z wałami połączonymi sprzęgłem, c) dwa wirniki zespołu maszyn z przekładnią, E_{1in} – energia zasilająca maszynę napędzającą, E_{1out} – energia odprowadzona od maszyny napędzającej, E_{2in} – energia doprowadzona do maszyny napędzanej, E_{2out} – energia na wyjściu z maszyny napędzanej, $R1$ – wirnik (tarcza wirnika) maszyny napędzającej (rotor), $R2$ – wirnik (tarcza wirnika) maszyny napędzanej.

Fig. 2. Rotors of the driving machine – driven machine set: a) one rotor with one shaft, b) one rotor with shafts connected by a coupling, c) two rotors of a machine set with a transmission, E_{1in} – energy powering the driving machine, E_{1out} – energy carried away from the driving machine, E_{2in} – energy delivered to the driven machine, E_{2out} – energy at driven machine output, $R1$ – rotor disc of the driving machine, $R2$ – rotor disc of the driven machine

funkcjonalne zwane tutaj „oscylatorami” Istnieją:

- oscylatory bez wymuszenia zewnętrznego (np. zawory samoczynne)
- oraz oscylatory z wymuszeniem zewnętrznym (między innymi oscylatory współpracujące z wirnikiem danej maszyny).

Częstym elementem maszyn są łożyska toczne. Z reguły podpierają wirniki maszyn, przenoszą obciążenia z wirnika na korpus maszyny. Zużyte są z reguły wymieniane na nowe, w niektórych przypadkach są naprawiane. Ze względu na uszkodzenia wtórne łożyska powinny być diagnozowane. Ze względu na specyficzną budowę łożysko toczne powinno

być traktowane jako zespół funkcjonalny.

Sprawność energetyczna zespołu maszyn jest iloczynem sprawności jego zespołów funkcjonalnych.

3. Diagnozowanie zespołów funkcjonalnych

3.1. Zespół funkcjonalny „maszyna – rurociąg”

Dla układu maszyn z rys.1. ta część maszyny napędzanej układu maszyn, w której realizowany jest obieg termodynamiczny jest częścią zespołu funkcjonalnego „maszyna - rurociąg”. Obieg termodynamiczny realizowany jest z zależną od potencjału eksploatacyjnego sprawnością, w przypadku pomp zwaną sprawnością hydrauliczną. Na rys.1. dla ustalonych warunków pracy dla przepływu otwartego w rurociągu przedstawiono przebiegi ciśnienia, temperatury i strumienia masy wzdłuż rurociągu [2].

Na sprawność hydrauliczną zespołu funkcjonalnego rurociąg – maszyna składa się, oprócz sprawności hydraulicznej maszyny η_{Hm} , sprawność hydrauliczna układu ssania η_{Hsp} i sprawność hydrauliczna układu tłoczenia η_{Hdp} , gdzie

$$\eta_{Hsp} = \frac{p_s}{p_1} = \frac{p_s}{p_s + \Delta p_{sp}} \quad (2)$$

$$\eta_{Hdp} = \frac{p_2}{p_d} = \frac{p_d - \Delta p_{dp}}{p_d} = 1 - \frac{\Delta p_{dp}}{p_d} \quad (3)$$

- Δp_{dp} straty ciśnienia w rurociągu tłocznym,
- Δp_{sp} straty ciśnienia w rurociągu ssącym.

Sprawność hydrauliczna rurociągu powiązana jest z miarą zastępczą potencjału eksploatacyjnego – współczynnikiem oporów liniowych (współczynnikiem tarcia) λ . Symptodem diagnostycznym jest spadek ciśnienia. Spadki (straty) ciśnienia Δp wzdłuż prostego odcinka rurociągu opisuje wzór Darcy’ego–Weisbacha:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{w_m^2}{2} \quad (4)$$

gdzie

Δp – straty ciśnienia płynu w rurociągu,
 λ – współczynnika oporów liniowych (współczynnika tarcia) płynu w rurociągu,
 d – średnica wewnętrzna rurociągu,
 l – długość rurociągu,
 ρ – gęstość płynu,
 w_m – średnia prędkość przepływu płynu w rurociągu.

Współczynnik oporów liniowych λ zależy od wartości liczby Reynoldsa Re ($Re = wl/v$) i chropowatości względnej k/d . Spadki ciśnienia wzdłuż przeszkody uwzględnia się za pomocą współczynnika ζ . We współczynniku ζ zawarte są dodatkowe straty w porównaniu ze stratami prostego odcinka rurociągu

$$\Delta p_p = \zeta \rho \frac{w_m^2}{2} \quad (5)$$

Straty energii w maszynie skutkują wzrostem różnicy temperatur ssania i tłoczenia. Jeżeli jedynymi źródłami ciepła są straty hydrauliczne zależne od sprawności maszyny i nie zachodzi wymiana ciepła z otoczeniem to sprawność hydrauliczną pompy określa wzór

$$\eta_{hm} = \frac{1}{1 + \frac{c_p \cdot (T_d - T_s)}{p_d - p_s}} \quad (6)$$

gdzie

c_p – ciepło właściwe płynu przy stałym ciśnieniu,

T_s, p_s – temperatura i ciśnienie na króćcu ssącym pompy,

T_d, p_d – temperatura i ciśnienie na króćcu tłoczącym pompy.

Sprawność zespołu funkcjonalnego jest iloczynem sprawności hydraulicznej układu ssania (suction pipe), sprawności hydraulicznej układu tłoczenia (discharge pipeline) i sprawności hydraulicznej maszyny.

3.2. Zespół funkcjonalny „wirnik zespołu maszyn”

Jeżeli potencjał eksploatacyjny wirnika zespołu maszyn ma wartość nominalną to na wirnik zespołu maszyn działają, określone specyfikacją maszyn składowych, siły promieniowe, poosiowe i styczne zależne od aktualnej wydajności maszyny napędzanej (lub aktualnego obciążenia maszyny napędzającej). Potencjał eksploatacyjny wirnika zespołu maszyn może osiągnąć wartość nominalną jeżeli [3]:

- oś wałów wirnika zespołu maszyn będzie linią prostą;
- środki mas wirnika zespołu maszyn będą się pokrywać się z osią obrotu wirnika zespołu maszyn;
- tarcze wirnika będą trwale połączone z wałem a masy i momenty bezwładności tarcz wirnika oraz sztywności wałów wirnika będą zgodne ze specyfikacją.

Dopuszcza się, w szczególności przy długich wirnikach, określone wartości odchyłki prostoliniowości i używa się pojęcia „ułożenie linii wału” (shaft line alignment). Niepokrywanie się środka masy z osią obrotu w jednej z płaszczyzn prostopadłych do osi wirnika jest przyczyną „niewyważeniem wirnika”. Jakość połączenia tarcz z wałem wirnika zespołu, rozmieszczenie tarcz, ich masa i sztywność wału decydują o dynamicznych właściwościach wirnika opisywanych za pomocą „funkcji przejścia”.

Ułożenie wirnika zespołu maszyn, niewyważenie i funkcję przejścia wirnika zespołu maszyn należy uznać za miary potencjału eksploatacyjnego wirnika zespołu maszyn. Następstwem niewłaściwego ułożenia i niewyważenia wirnika zespołu maszyn są dodatkowe zmienne i stałe siły działające na wirnik zespołu maszyn. Zmiana układu sił działających na wirnik skutkuje zmianą obrazu drgań względnych wirnika i drgań bezwzględnych podpór łożyskowych.

W wielu przypadkach sygnały drganiowe maszyn są sygnałami prawie stacjonarnymi. Podstawą wnioskowania diagnostycznego w takich przypadkach jest analiza widmowa drgań. Celem przeprowadzenia analizy widmowej, oprócz pomiaru drgań, dokonuje się pomiaru wybranego kąta obrotu wału za pomocą sensora zwanego Keyphasor. Keyphasor inaczej znacznik kąta jest sensorem najczęściej wiroprowodowym wytwarzającym nad rowkiem w wale impuls napięciowy raz na obrót wału.

Drgania podpór wykorzystuje się w diagnozowaniu wirnika z łożyskami tocznymi. Drgania podpór wirnika powinny być mierzone na każdej podporze, są łatwe w pomiarze, technika pomiarów i narzędzia są znane i dostępne na rynku.

W przypadku wirników z łożyskami ślizgowymi wykorzystuje się drgania względne głównie drgania promieniowe,

wyjątkowo drgania skrętne i w ograniczonym zakresie drgania poosiowe wirującego wału. Względne drgania poosiowe wykorzystuje się głównie do dozoru osiowej pozycji wału to jest do dozoru położenia wirnika względem wybranego punktu stałego np. obudowy łożyska oporowego. Względne drgania skrętne w praktyce mierzy się na wolnym końcu wału celem dozoru wartości drgań skrętnych.

Względne drgania promieniowe wirujących wałów mierzy się w każdej płaszczyźnie łożyska za pomocą dwóch sensorów wiroprowodowych (można zastosować również sensory indukcyjne lub pojemnościowe) ustawionych względem siebie pod kątem prostym i przedstawia je w formie trajektorii środka czopa (diagram X-Y / Orbit).

W publikacji [3] wykazano konieczność i możliwość modelowania wirnika łącznie z łożyskami ślizgowymi. Zaproponowano układ do pomiaru mimośrodowości czopa w panwi łożyska ślizgowego [4] i odległości między panwią i kołnierzem ślizgowego łożyska poosiowego [3]. Wykazano, że mimośrodowość zależy od obciążenia i potencjału eksploatacyjnego łożyska ślizgowego.

W przypadku gdy wirnik zespołu maszyn ma wał wykrzywiony to miarą ułożenia wału jest sprężynowanie wykrzybień wału. Sprężynowanie wykrzybień powoduje osiowe przemieszczanie się czoła końca wału podczas obrotu wału a miarami symptomów są wartość stała, amplituda i przesunięcie fazowe przebiegu kąтового przemieszczenia. Możliwy jest pomiar przemieszczeń czoła wolnego końca wału wykrzybionego za pomocą specjalnej głowicy wyposażonej w parę bezstykowych sensorów drogi. Ponieważ na wartość stałą przemieszczenia wolnego końca ma wpływ przemieszczenie całego wirnika w ramach luzu w łożysku poosiowym to konieczny jest równoczesny pomiar wartości stałej przemieszczeń poosiowych w łożysku poosiowym [3].

3.3. Zespół funkcjonalny „przekładnia”

Rys. 2c. przedstawia zespół maszyn składający się z trzech zespołów funkcjonalnych: dwóch wirników i przekładni. Diagnozowanie wirników wymaga zainstalowania na każdym wale znacznika kąta i synchronicznego uśredniania sygnałów oddzielnie z częstotliwością jednego i drugiego wału.

W przypadku przekładni bez poślizgu jaką jest przekładnia zębata diagnozowanie przekładni jako zespołu funkcjonalnego dotyczy potencjału eksploatacyjnego współpracujących kół zębatych. Wydaje się, że skuteczne i efektywne diagnozowanie wymaga uśredniania synchronicznego z częstotliwością z jaką ten sam ząb jednego koła zazębia się z tym samym zębem drugiego koła. Wymaga to jednoczesnego pomiaru kąta jednego i drugiego wału lub zainstalowania specjalnego znacznika kąta.

W przypadku przekładni z poślizgiem jakim jest przekładnia pasowa symptomami mogą być częstotliwości obydwu wałów i częstotliwość obrotowa paska oraz częstotliwość drgań własnych paska. Obie częstotliwości są mierzalne za pomocą sensorów optycznych.

3.4. Zespół funkcjonalny „przekładnia”

Łożyska toczne posiadają dwa pierścienie i koszyk z elementami tocznymi. Przy stałym obciążeniu i stałej

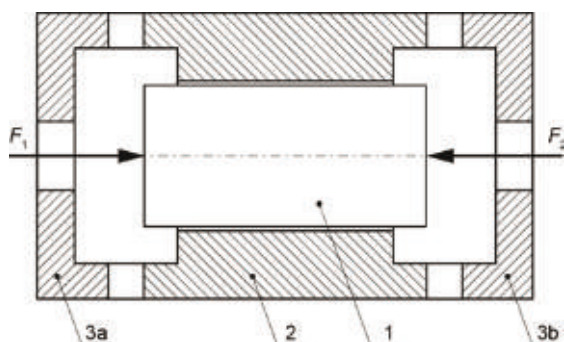
prędkości obrotowej moment tarcia w łożysku jest miarą potencjału eksploatacyjnego łożyska.

W praktyce eksploatacyjnej w diagnozowaniu łożysk tocznych wykorzystuje się symptomy drganiowe obudowy łożyska. Przyjmuje się, że zużycie łożyska skutkuje uszkodzeniami generującymi drgania o charakterystycznych częstotliwościach. Taka metodyka nie zawsze przynosi oczekiwane rezultaty.

W przypadku dużych i ważnych promieniowych łożysk tocznych z nieruchomym pierścieniem zewnętrznym istnieją przesłanki uzasadniające wybór „ilorazu prędkości kątowej koszyeczka i prędkości kątowej wału” jako miary symptomu diagnostycznego.

3.5. Zespół funkcjonalny „oscylator”

Oscylator jest zespołem funkcjonalnym, który wykonuje ruch posuwisto-zwrotny i oddziela dwie przestrzenie o różnym ciśnieniu. Element ruchomy oscylatora może mieć kształt pierścienia z prowadzeniem wewnętrznym lub kształt tłoka z prowadzeniem zewnętrznym. Hipotetyczny oscylator przedstawiono na rys.3.



Rys. 3. Model oscylatora z prowadzeniem zewnętrznym: 1 – tłok, 2 – prowadnica, 3- ograniczniki ruchu, F1, F2– składowa poosiowa wszystkich sił działających na daną stronę tłoka

Fig. 3. Model of the oscillator with external guidance: 1 - piston, 2 - guide, 3 - motion stops, F1, F2 - axial component of all forces acting on a given side of the piston

Warunkiem działania oscylatora jest ażeby, pomijając tarcie, różnica sił ($F_1 - F_2$) zmieniała się z x i na odwrót tzn. ażeby dochodziło do zmiany znaku różnicy sił działających wzdłuż osi tłoka. Zmiana znaku różnicy sił działających na tłok powoduje, że tłok porusza się ruchem przyspieszonym w kierunku drugiego ogranicznika i uderza w niego. Siła uderzenia jest zależna od różnicy sił i od potencjału eksploatacyjnego oscylatora. Siła uderzenia generuje drgania impulsowe, które mogą być wykorzystane jako symptom diagnostyczny [5, 6].

4. Podsumowanie

W technicznych systemach produkcyjnych wszechobecne są podsystemy składające się z układu maszyn i urządzeń przekształcających i przenoszących energię. Sprawność przekształcania i przenoszenia energii jest zależna od potencjału eksploatacyjnego maszyn i urządzeń podsystemu. Natomiast jakość systemu produkcyjnego np. efektywność, zależy nie tylko od aktualnej sprawności energetycznych poszczególnych podsystemów ale również od efektywności i skuteczności systemu obsługiwanego (systemu, który służy do przywracania potencjału eksploatacyjnego) działającego w ramach przedsiębiorstwa produkcyjnego. Ze względu na charakter pracy i złożoność podsystemów uzasadnione jest obsługiwanie zespołów funkcjonalnych podsystemu. Skuteczne i efektywne diagnozowanie potencjału eksploatacyjnego (diagnozowanie jako składnik obsługiwanego) może być realizowane tylko wtedy, kiedy będą znane odpowiednie modele diagnostyczne poszczególnych zespołów funkcjonalnych. Tworzenie modeli diagnostycznych zespołów funkcjonalnych polega na odpowiednim określeniu granic poszczególnych zespołów i opisie relacji między potencjałem eksploatacyjnym i sygnałem diagnostycznym danego zespołu funkcjonalnego. W artykule przedmiotowy podsystem podzielono na następujące zespoły funkcjonalne: maszyna – rurociąg, wirnik zespołu maszyn, przekładnia, łożyska toczne, oscylator. Uzasadniono podział, dla wymienionych zespołów funkcjonalnych wskazano na zbudowane modele diagnostyczne bądź określono koncepcje ich tworzenia.

5. Literatura

- [1] P. Bielawski, „Miary i wartości graniczne potencjału eksploatacyjnego maszyn systemów produkcyjnych / Measures and limits of machine wear margin of production systems” Problemy eksploatacji / Maintenance problem no. 1, pp. 129-159, 2016
- [2] P. Bielawski, “Identification of the Wear Margin of a Pipeline–Machine Subsystem” Appl. Sci.2020, 10, 3977, pp. 1-22
- [3] Bielawski P.: Diagnosing the Machine Set Rotor Using Its Relative Vibrations. Appl. Sci. 2022, 12, 5660, pp.1-27
- [4] Patent PL233403: Sposób wzorcowania układu sensorów do pomiaru mimośrodowości wirującego wału zwłaszcza wału łożyska ślizgowego z uszczelnieniem promieniowym. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej Warszawa 2017
- [5] Bielawski P.: Measurement and evaluation of mechanical vibration of reciprocating machines. Diagnostics and Structural Health Monitoring 1(61)/2012, pp.25-30
- [6] Białek P., Bielawski P.: Vibration signals of reciprocating compressor valves. Journal of POLISH CIMAC 2013 Vol. 8 No 1 pp. 15-21

Tomasz Gorzelańczyk*, Krzysztof Schabowicz

Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Przegląd nowoczesnych metod nieniszczących wykorzystywanych do badania płyt włóknisto-cementowych

Review of modern non-destructive methods used to test fiber-cement boards

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono i omówiono wybrane nowoczesne metody nieniszczące wykorzystywane do badania materiałów kompozytowych jakim są płyty włóknisto-cementowe. Omówiono metodę ultradźwiękową, w tym również z wykorzystaniem fal Lamba, metodę emisji akustycznej, metodę terahercową i metodę optyczną z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego SEM. Wszystkie te metody zostały z powodzeniem wykorzystane w badaniach, w tym również w badaniach własnych autorów, co jednoznacznie potwierdza ich przydatność w badaniu płyt włóknisto-cementowych.

Słowa kluczowe: płyty włóknisto-cementowe; badania nieniszczące; ultradźwięki; emisja akustyczna; SEM

ABSTRACT

The article presents and discusses selected modern non-destructive methods used to test composite materials such as fiber-cement boards. The ultrasonic method, including the Lamb wave method, the acoustic emission method, the terahertz method and the optical method using the scanning electron microscope (SEM) are discussed. All these methods have been successfully used in research, including the authors' own research, which clearly confirms their usefulness in the study of fiber-cement boards.

Keywords: fibre-cement boards; non-destructive methods; ultrasounds; acoustic emission; SEM

1. Wstęp

Płyty włóknisto-cementowe są wyrobem budowlanym stosowanym w budownictwie od początku ubiegłego wieku. Pomysłodawcą był czeski inżynier Ludwik Hatschek, który opracował i opatentował technologię produkcji tego kompozytowego materiału, który nosił nazwę „Eternit”. Materiał ten był lekki, wytrzymały, trwały i niepalny. Płyta włóknisto-cementowa stała się jednym z najbardziej popularnych pokryw dachowych na świecie w XX w. [1],[2],[3]. Było tak do momentu, kiedy jednoznacznie stwierdzono, że azbest ma właściwości rakotwórcze. W latach 90 niebezpieczny dla zdrowia składnik zastąpiono bezpiecznymi włóknami, głównie celulozowymi. Obecnie produkowane płyty włóknisto-cementowe składają się z cementu, włókien celulozowych, włókien syntetycznych oraz różnych dodatków i domieszek, i stanowią zupełnie inny już wyrób budowlany [4],[5], który nadal wymaga prowadzenia nowych badań. Dodatkowymi składnikami i wypełniaczami płyt włóknisto-cementowych są mączka wapienna, mika, perlit, kaolin, mikrosfera oraz materiały z recyklingu [6], co pozwala uznać je za wyrób innowacyjny, który wpisuje się z powodzeniem w zasady zrównoważonego rozwoju. Obecnie płyty te stosowane są w budownictwie przede wszystkim jako okładzina elewacyjna w systemie elewacji

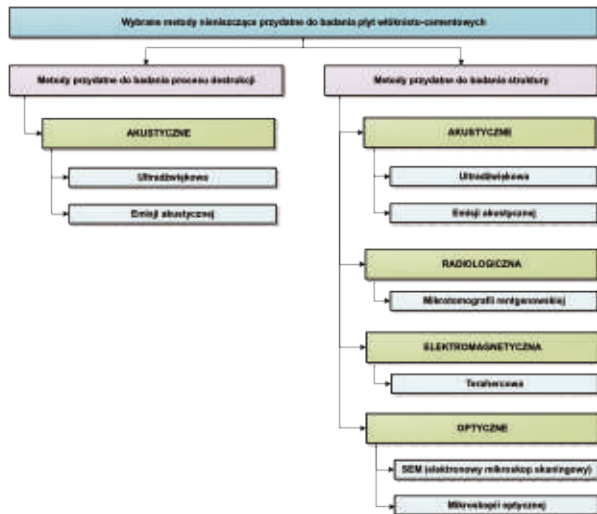
wentylowanych [7]. Warto zaznaczyć, że większość dotychczasowych badań płyt włóknisto-cementowych dotyczyło jedynie określenia normowych parametrów fizyko-mechanicznych, wpływu czynników eksploatacyjnych, takich jak: cykle namaczania i suszenia, cykle zamrażania i rozmrażania, wpływ grzania i deszczowania, wysokich temperatur oraz wpływu zastosowania różnych rodzajów włókien i procesów produkcyjnych, poprzez badanie tylko wytrzymałości na zginanie MOR [8]. W literaturze można odnaleźć jednakże nieliczne badania płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem metod nieniszczących, które zostaną przedstawione i opisane w dalszej części artykułu. Należy zaznaczyć, że w dalszej części artykułu zostaną przedstawione jedynie wybrane metody nieniszczące, które najczęściej stanowiły badania własne autorów, często we współpracy z innymi ośrodkami badawczymi.

2. Przegląd wybranych nowoczesnych metod

W nawiązaniu do informacji zawartych w literaturze [9] w aspekcie badań płyt włóknisto-cementowych, metody nieniszczące można podzielić na dwie zasadnicze grupy, tj. takie, które pozwalają ocenić proces destrukcji oraz metody pozwalające na badanie struktury materiału kompozytowego. Podział ten pokazano przykładowo na rysunku 1. W dalszej części pracy zostaną omówione wybrane nowoczesne metody nieniszczące wykorzystywane przez autorów w badaniach materiałów kompozytowych włóknisto-cementowych. Warto

* Autor korespondencyjny.

E-mail: tomasz.gorzelanzyk@pwr.edu.pl



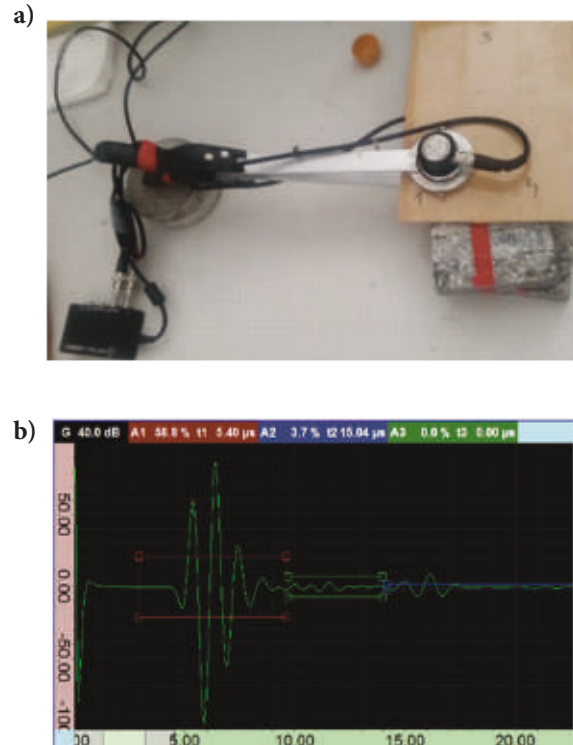
Rys. 1. Podział wybranych metod nieniszczących przydatnych do badania kompozytów włóknisto-cementowych

Fig. 1. Division of selected non-destructive methods useful for testing fiber-cement composites

zaznaczyć, że część metod zostało pioniersko wdrożonych przez autorów do badania przedmiotowych materiałów kompozytowych, czego rezultatem są liczne publikacje oraz uzyskane patenty.

2.1 Badania metodą ultradźwiękową

Metoda ultradźwiękowa opiera się na związkach pomiędzy prędkością fal sprężystych o wysokiej częstotliwości powyżej 20 kHz rozprzestrzeniających się w ośrodku stałym, a własnościami tego ośrodka. Dotychczas badania metodą ultradźwiękową na szeroką skalę prowadzone były głównie dla betonu i stali. Niewiele natomiast jest w literaturze zastosowań tej metody do badania kompozytów cementowych (o grubości do 15mm) i zmian zachodzących w ich strukturze, a w szczególności płyt włóknisto-cementowych. Nowatorskie urządzenie ultradźwiękowe do wykrywania delaminacji w płytach włóknisto-cementowych zostało opatentowane przez zespoły z IPPT PAN i Politechniki Wrocławskiej [9],[10], które przedstawiono na rysunku 2a. Urządzenie to umożliwia wykrywanie delaminacji o długości powyżej 10 mm w płytach włóknisto-cementowych o grubości od 4 mm do 40 mm oraz zapewnia wysoką dokładność wyznaczania prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej w badanym materiale poprzez zastosowanie cyfrowego defektoskopu ultradźwiękowego. Wykrywanie delaminacji w płytach włóknisto-cementowych odbywa się na zasadzie pomiaru lokalnych zmian prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej i porównania ich z prędkością podłużnej fali ultradźwiękowej we wzorcowej próbce pozbawionej delaminacji. Na rysunku 2b pokazano przykładowy przebieg fali ultradźwiękowej zarejestrowanej urządzeniem do wykrywania delaminacji podczas badania płyt włóknisto-cementowych.



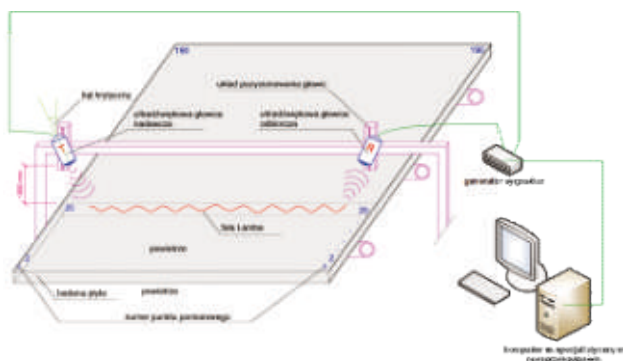
Rys. 2. Urządzenie ultradźwiękowe do wykrywania delaminacji w płytach włóknisto-cementowych: a) widok urządzenia, b) przykładowy przebiegi fali ultradźwiękowej zarejestrowanej podczas badania [9],[10]

Fig. 2. Ultrasonic device for detecting delamination in fiber-cement boards: a) view of the device, b) example waveforms of the ultrasonic wave recorded during the test [9],[10]

Porównanie zmian prędkości fali ultradźwiękowej w różnych miejscach, a co za tym idzie zmian gęstości płyty poddanej procesowi destrukcji z płytą referencyjną pozwala zgrubnie zidentyfikować obszary zmian w strukturze płyt i tym samym wskazać miejsca do dalszych badań z użyciem innych metod, np. metody emisji akustycznej.

2.2 Badania metodą ultradźwiękową z wykorzystaniem fal Lamba

Do fal ultradźwiękowych zalicza się także fale płytowe Lamba, które są odmianą powierzchniowych fal sprężystych. Rozchodzą się one w ośrodku ograniczonym dwoma równoległymi płaszczyznami, których odległość jest porównywalna z długością fali i nie przekracza kilku długości fali. Przekazywanie drgań sąsiadnym cząstkom jest wynikiem nakładania się na siebie dwóch fal Rayleigha, biegnących po obydwu powierzchniach w tym samym kierunku [11]. W pracach [12], [13] przedstawiono możliwość wykorzystania fal Lamba w ultradźwiękowym bezdotykowym skanerze do wykrywania wad w płytach włóknisto-cementowych jeszcze na etapie produkcji. Na rysunku 3 przedstawiono schemat i widok konstrukcji zbudowanego na linii produkcyjnej bezkontaktowego skanera ultradźwiękowego [12]. Układ pomiarowy w postaci stacjonarnego bezkontaktowego skanera ultradźwiękowego bazuje na wzbudzeniu fali



Rys. 3. Schemat i widok stacjonarnego bezkontaktowego skanera ultradźwiękowego [9], [12]

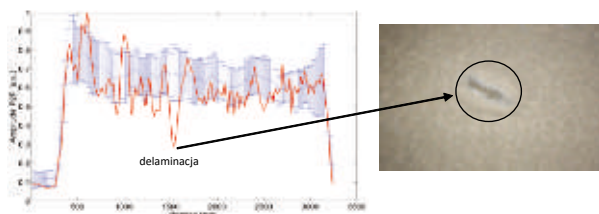
Fig. 3. Schematic and view of the stationary non-contact ultrasonic scanner [9], [12]

sprężystej w badanym elemencie. Wykorzystuje się tu technikę przechodzącej fali Lamba wprowadzanej do materiału badanego przez powietrze, bez kontaktu głowice nadawczej (T) i odbiorczej (R) z testowanym materiałem [14],[15],[16]. Obydwie głowice umieszczone są po tej samej stronie badanej płyty na przeciwnych jej krawędziach, obejmujących całą szerokość płyty.

Za pomocą tego urządzenia podczas produkcji można wykrywać delaminacje lub ubytki i nieciągłości w strukturze, co pozwala w konsekwencji wyeliminować wadliwą partię płyt. Można również za pomocą tego skanera badać rozkład wilgotności po długości płyty, co pokazano w pracy [13]. Przykładowy wynik pomiaru skanerem ultradźwiękowym, obrazujący wykrycie delaminacji w płycie włókno-cementowej pokazano na rysunku 4.

2.3 Badania metodą emisji akustycznej

Metoda emisji akustycznej (EA) opiera się na znajomości zjawisk powstawania i rozprzestrzeniania się w danym ośrodku fal sprężystych, powstałych w materiale wskutek wyzwolenia zakumulowanej w nim energii sprężystej [17]. Należy ona do grupy metod pasywnych, to znaczy, że aparatura EA nie emituje sygnałów i nie wpływa na stan fizyczny badanego obiektu, natomiast rejestruje jedynie efekty fizyczne samoistnie powstające w monitorowanym materiale, elemencie itp., w tym proces ich niszczenia i zmiany struktury. Źródłami sygnału emisji akustycznej są powstające i propagujące mikrorysy, procesy korozyjne, pękanie strun w konstrukcjach sprężonych, itp. Źródła EA generują fale



Rys. 4. Przykładowe wyniki badań uzyskane bezkontaktowym skanerem ultradźwiękowym [13]

Fig. 4. Exemplary test results obtained with a non-contact ultrasonic scanner [13]

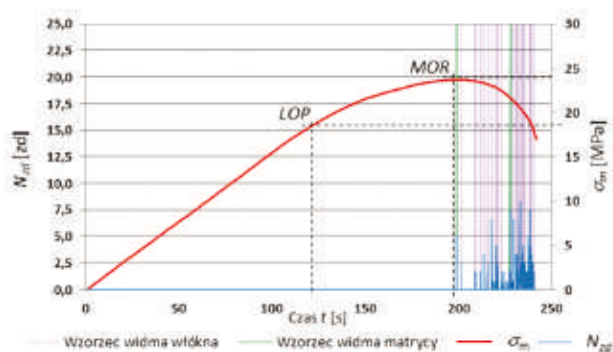


Rys. 5. Widok stanowiska badawczego do pomiarów metodą emisji akustycznej (po lewej) wraz z powiększeniem próbki płyty włókno-cementowej w trakcie badania (po prawej).

Fig. 5. View of the test bench for measurement with the acoustic emission method (left) along with the enlargement of the fiber-cement board sample during the test (right).

sprężyste w objętości badanego materiału, a propagują się na powierzchni ograniczającej materiał [18]. Na powierzchni fale te mogą wówczas zostać zarejestrowane przez odpowiednie przetworniki, które przekształcają je na napięcie elektryczne. Badania własne autorów, jak i innych badaczy jednoznacznie pokazały przydatność tej metody w ocenie zmian destrukcyjnych, które zachodzą w strukturze płyt włókno-cementowych pod wpływem różnych czynników eksploatacyjnych w tym m. innymi wysoka temperatura, pożar oraz wielokrotne cykle zamrażania-rozmrażania [19], [20], [21], [22], [23]. Przedmiotowe badania wykonywano w próbie trójpunktowego zginania na stanowisku pokazanym na rysunku 5.

Do analizy procesu destrukcji posłużono się deskryptorami emisji akustycznej takimi jak tempo, suma i energia zdarzeń oraz zarejestrowaną wytrzymałością na zginanie MOR. Na podstawie zarejestrowanych sygnałów EA określano wzorcowe charakterystyki widma akustycznego dla włókien i matrycy cementowej. Następnie wykonywano analizę otrzymanych rezultatów z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych [24], [25], [26], [27] w celu rozróżnienia charakterystyk widmowych EA oznaczających pęknięcia matrycy i włókien oraz oszacowania ilości zawartych włókien w płytach poddanych procesowi destrukcji. Na rysunku 6 pokazano przykładowy przebieg tempa zdarzeń Nzd, naprężeń zginających σ_m w funkcji czasu, dla płyty poddanej oddziaływaniu ognia wraz z naniesioną identyfikacją



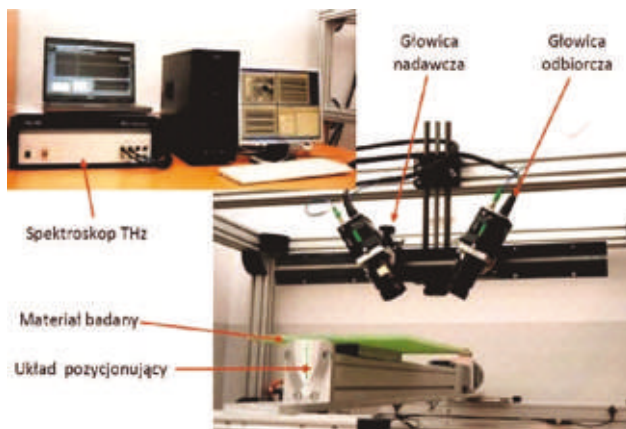
Rys. 6. Przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m w funkcji czasu, dla płyty poddanej oddziaływaniu ognia wraz z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych [19]

Fig. 6. Events rate N_{ev} and flexural stress σ_m versus time for a board exposed to fire, with marked recognized reference spectral characteristics [19]

wzorcowych charakterystyk widmowych uzyskany z badań metodą emisji akustycznej.

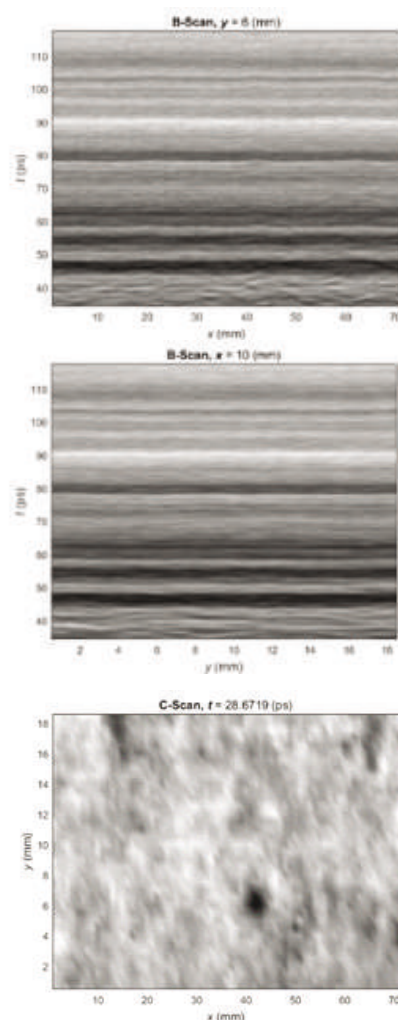
2.4 Badania metodą terahercową

Metoda terahercowa wykorzystuje fale elektromagnetyczne w zakresie częstotliwości (0,5-10 THz) i jest coraz częściej wykorzystywana w różnych dziedzinach nauki i przemysłu [28]. Właściwości promieniowania terahercowego (ang. T-Ray) dają możliwość wykorzystania ich do diagnostyki materiałów kompozytowych. Systemy terahercowe pracujące w dziedzinie czasu przekazują sygnały zawierające dokładną informację o wewnętrznej strukturze materiałów poddanych badaniu. Technologia terahercowa w badaniach nieniszczących wykorzystywana jest do oceny stanu różnych struktur nieprzewodzących m.in. kompozytów dielektrycznych, powłok malarskich i materiałów ceramicznych. Omawiane urządzenia pozwalają wykrywać defekty takie jak: rozwarstwienia, puste przestrzenie, braki kleju, braki żywicy, czy nierównomierności wzmocnienia. Na rysunku 7 pokazano przykładowo widok systemu do badań metodą terahercową [29]. Z kolei na rysunku 8 zamieszczono przykładowe sygnały zarejestrowane dla płyty włóknisto-cementowej z wykorzystaniem tej metody [29]. W pracach [29],[30] przeprowadzono pilotażowe badania płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem metody terahercowej. Wstępne badania potwierdziły przydatność zaproponowanej metody do badań płyt włóknisto-cementowych. Sygnały terahercowe mają charakter bardzo zbliżony do tych uzyskiwanych w metodach ultradźwiękowych. Zaletami T-Ray jest duża rozdzielczość sygnałów, pomiar bezkontaktowy i bardzo krótki czas pomiaru.



Rys. 7. Przykładowy widok systemu do badań metodą terahercową [29]

Fig. 7. Photo of the system for terahertz inspection [29]



Rys. 8. Przykładowe sygnały zmierzone dla płyty włóknisto-cementowej z wykorzystaniem metody terahercowej [29]

Fig. 8. Exemplary signals measured for a fiber-cement board using the terahertz method [29]

2.5 Badania metodą optyczną z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM)

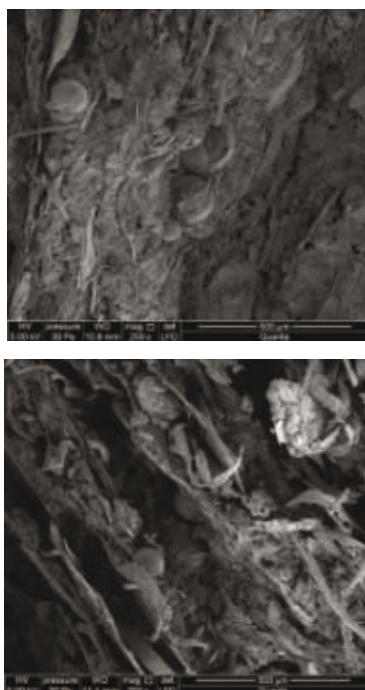
Mikroskopy elektronowe do tworzenia obrazu wykorzystują wiązkę elektronów, która emitowana jest z katody, przyspieszana w polu elektrycznym i formowana przez układ

soczewek elektromagnetycznych. Rozdzielczość uzyskanego obrazu zależy od długości fali elektronów, która jest funkcją użytego napięcia przyspieszającego (im większe napięcie, tym długość fali krótsza i lepsza rozdzielczość) oraz średnicy wiązki. Mikroskopy elektronowe dzieli się na skaningowe i transmisyjne. Metoda optyczna z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego SEM (ang. Scanning Electron Microscope) jest szeroko wykorzystywana do badania mikrostruktury różnych materiałów, w tym kompozytowych [31],[32]. Na rysunku 9 pokazano przykładowy widok skaningowego mikroskopu elektronowego z analizatorem EDS. Z kolei na rysunku 10 pokazano przykładowe obrazy płyt włóknisto-cementowych uzyskane przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego.



Rys. 9. Widok skaningowego mikroskopu elektronowego z analizatorem EDS [32]

Fig. 9. View of a scanning electron microscope with an EDS analyzer [32]



Rys. 10. Przykładowe obrazy płyt włóknisto-cementowych uzyskane przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego [32]

Fig. 10. Exemplary images of fiber-cement boards obtained using a scanning electron microscope [32]

Mikroskopia skaningowa pozwala ocenić kształt i wielkość ziaren, morfologię powierzchni, obecność zrostów, wtrąceń, spękań, sposób zabudowy przestrzeni, kształt porów. Główną zaletą metody jest bardzo prosta preparatyka. Próbkę mają postać okruchów lub przełamów. Zaletą techniki SEM jest bardzo duże powiększenie do kilku tysięcy razy, z jednoczesnym uzyskaniem rozdzielczości możliwej do oceny związków cementowych i pojedynczych włókien [8], [33]. Rozwój tej metody w wizualizacji materiałów do nanometrycznej wielkości dąży do wykrycia wszelkich, do tej pory niewidocznych efektów, spowodowanych przez oddziaływanie różnych czynników na strukturę badanego materiału. Badania matrycy cementowej wzmocnionej włóknami celulozowymi z zastosowaniem techniki SEM opisano w pracach [8],[34]. Z kolei w [32] zaprezentowano wyniki badań skaningowych płyt włóknisto-cementowych poddanych wysokiej temperaturze i zmiennym cyklom zamrażania i rozmrażania. Autorzy na podstawie badań własnych udowodnili przydatność tej metody do próby oceny zachodzących w mikrostrukturze płyt włóknisto-cementowych zmian pod wpływem określonych czynników eksploatacyjnych.

3. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonego powyżej przeglądu nowoczesnych nieniszczących metod badawczych można jednoznacznie stwierdzić, że są one przydatne w badaniu materiałów kompozytowych włóknisto-cementowych. Jednakże z uwagi na ograniczoną objętość niniejszego artykułu autorzy nie mogli dokonać opisu wszystkich dostępnych metod. W związku z tym w tabeli 1 w ramach podsumowania dodatkowo zestawiono wybrane wady i uszkodzenia związane z produkcją tj. imperfekcje geometryczne i materiałowe. Zaproponowano również pojęcia dotyczące ich opisu w badaniach płyt włóknisto-cementowych i przyporządkowano metody przydatne do ich badania wszystkimi znanymi autorom nowoczesnymi metodami nieniszczącymi.

Podsumowując, autorzy chcą zaznaczyć, że wymagania normowe dla płyt włóknisto-cementowych [4] dopuszczają pod wpływem działania czynników eksploatacyjno-klimatycznych obniżenie wytrzymałości MOR, co może świadczyć o dopuszczeniu pewnych zmian powstałych w strukturze płyty. Badania normowe opierają się w zasadzie jedynie na kontroli wytrzymałości na zginanie MOR. Zdaniem autorów może to być jednak niewystarczające. Dlatego istnieje potrzeba dokładnego rozpoznania procesów i zmian zachodzących w strukturze płyty włóknisto-cementowej pod wpływem różnych czynników eksploatacyjnych, powodujących „osłabienie” płyty. Jest to niezwykle istotne z punktu widzenia trwałości i bezpieczeństwa eksploatacji płyt włóknisto-cementowych. Przydatne w tym celu okazują się metody nieniszczące, dające szersze możliwości badawcze oraz możliwość rozpoznania i identyfikacji procesu destrukcji płyt pod wpływem czynników eksploatacyjnych.

Tab. 1. Zestawienie wybranych imperfekcji geometrycznych i materiałowych wraz z zaproponowanymi pojęciami dotyczącymi ich opisu i z przyporządkowaniem metod przydatnych do ich badania [9]

Tab. 1. List of selected geometric and material imperfections along with proposed concepts for their description and assignment of methods useful for their study [9]

Rodzaj/opis imperfekcji		Metoda badań		Ultradźwiękowa	Emisji akustycznej	Ultradźwiękowa i emisji akustycznej	Teraherzowa	Tomografii rentgenowskiej	Optyczna mikroskop elektronowy	Optyczna mikroskop skaningowy
Nieprawidłowa grubość płyty	identyfikacja	●	-	●	●	-	-	-		
	lokalizacja	●	-	●	○	-	-	-		
	rozległość	●	-	●	○	-	-	-		
	intensywność	○	-	○	○	-	-	-		
Delaminacja	identyfikacja	●	○	●	●	●	●	●		
	lokalizacja	●	-	●	●	○	●	●		
	rozległość	●	-	●	○	●	○	●		
	intensywność	-	-	-	●	-	-	○		
Rysy	identyfikacja	●	○	●	●	●	●	●		
	lokalizacja	●	-	●	○	●	○	○		
	rozległość	-	-	-	○	●	○	○		
	intensywność	-	-	-	○	●	○	○		

Oznaczenia: ● – metoda przydatna, ○ – metoda częściowo przydatna, - – metoda nieprzydatna

4. Literatura

- [1] Informacje ze strony internetowej: <http://www.equitone.com>
- [2] Informacje ze strony internetowej: <http://www.cembrit.com>
- [3] Informacje ze strony internetowej https://de.wikipedia.org/wiki/Ludwig_Hatschek
- [4] PN-EN 12467+A2:2018-06. Płyty płaskie włóknisto-cementowe. Charakterystyka wyrobu i metody badań.
- [5] Z. Ranachowski, K. Schabowicz "The Fabrication, Testing and Application of fibre cement boards" Cambridge Scholars Publishing, Newcastle, 2018.
- [6] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz „Badania płyt włóknisto-cementowych zawierających materiały z recyklingu” Materiały Budowlane nr 10, 27-29, 2015.
- [7] K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk, M. Szymków „Elewacje wentylowane” Architektura Murator, nr 6, dod. "Warsztat Architekta" nr 3, 36-53, 2017.
- [8] M. Ardanuy, J. Claramunt, R.D. Toledo Filho "Cellulosic Fibre Reinforced Cement-Based Composites: A Review of Recent Research" Construction and Building Materials nr 79, 115-28, 2015.
- [9] K. Schabowicz „Elewacje wentylowane : technologia produkcji i metody badania płyt włóknisto-cementowych” Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2018.
- [10] T. Dębowski, M. Lewandowski, S. Mackiewicz, Z. Ranachowski, K. Schabowicz „Badania ultradźwiękowe płyt włóknisto-cementowych” Przegląd Spawalnictwa, vol 88, Nr 10, 69-71, 2016.
- [11] A. Śliwiński „Ultradźwięki i ich zastosowanie” Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 2001.
- [12] K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk "A nondestructive methodology for the testing of fibre cement boards by means of a non-contact ultrasound scanner" Construction and Building Materials, vol. 102, 200-207, 2016.
- [13] R. Drelich, T. Gorzelańczyk, M. Pakuła, K. Schabowicz "Automated Control of Cellulose Fiber Cement Boards with a Non-Contact Ultrasound Scanner" Automation in Construction, vol. 57, 55-63, 2015.
- [14] G. Dobie, R. Summan, S.G. Pierce, W. Galbraith, G. Hayward "Noncontact ultrasonic platform for structural inspection" IEEE Sensors Journal, vol. 11, 2458-2468, 2011.
- [15] W. Moliński „Zastosowanie emisji akustycznej w badaniach drewna konstrukcyjnego” IPPT PAN, Warszawa, 1995.
- [16] G. Świt, A. Krampikowska, K. Schabowicz „Wstępna analiza możliwości wykorzystania metody emisji akustycznej w ocenie trwałości konstrukcji betonowych” Przegląd Spawalnictwa, vol 86, nr 10, 31-36, 2014.
- [17] I. Malecki, J. Ranachowski „Emisja akustyczna, źródła, metody, zastosowanie” KBN, Warszawa, 1994.
- [18] Z. Ranachowski „Emisja akustyczna w diagnostyce obiektów budowlanych” Drogi i Mosty, nr 2, 151-173, 2012.
- [19] K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk, M. Szymków "Identification of the degree of degradation of fibre-cement boards exposed

- to fire by means of the acoustic emission method and artificial neural networks" *Materials* nr 12, 1-17, 2019.
- [20] K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk, M. Szymków "Identification of the degree of fibre-cement boards degradation under the influence of high temperature" *Automation in Construction* nr 101, 190-198, 2019.
- [21] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz, M. Szymków "Application of the acoustic emission method and artificial neural networks to assess the damaging effect of high temperature on the structure of fibre-cement boards" *Materials* vol. 15, nr 18, 1-16, 2022.
- [22] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz "Effect of freeze-thaw cycling on the failure of fibre-cement boards, assessed using acoustic emission method and artificial neural network" *Materials* vol. 12, nr 13, s. 1-18, 2019.
- [23] A. Adamczak-Bugno, A. Krampikowska, G. Świt "Analysis of the Frequency of Acoustic Emission Events in Terms of the Assessment of the Reduction of Mechanical Parameters of Cellulose-Cement Composites. *Materials* nr 14, 5882, 2021.
- [24] H. Adeli "Neural networks in civil engineering: 1989-2000" *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* vol. 16, 126-142, 2001.
- [25] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz "Non-Destructive Testing of Moisture in Cellulose Fiber Cement Boards" 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT), Prague, 2014.
- [26] E. Juskowiak, A. Małdachowska, M. Panek „Emisja akustyczna kompozytowych płyt przekładkowych podczas trójpunktowego zginania" *Przetwórstwo Tworzyw*, nr 4, 351-354, 2013.
- [27] D.M. McCann, M.C. Forde "Review of NDT Methods in the Assessment of Concrete and Masonry Structures" *NDT & E International* vol. 34, 71-84, 2001.
- [28] D. Zimdars, J.A. Valdmanis, J.S. White, G. Stuk, S. Williamson, W.P. Winfree, E.I. Madaras "Technology and applications of terahertz imaging non-destructive examination: Inspection of space shuttle sprayed on foam insulation" *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, vol. 24, 570-577, 2005.
- [29] T. Chady, K. Schabowicz „Nieniszczące badania płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu" *Badania Nieniszczące i Diagnostyka* nr 1-2, 62-66, 2016.
- [30] T. Tomasz, K. Schabowicz, M. Szymków "Automated multisource electromagnetic inspection of fibre-cement boards" *Automation in Construction* vol. 94, 383-394, 2018.
- [31] K. Schabowicz, D. Jóźwiak-Niedźwiedzka, Z. Ranachowski, S. Kudela Jr, T. Dvorak "Microstructural characterization of cellulose fibres in reinforced cement boards" *Archives of Civil and Mechanical Engineering* vol. 18, nr 4, 1068-1078, 2018.
- [32] A. Adamczak-Bugno, T. Gorzelańczyk, A. Krampikowska, M. Szymków „Nieniszczące badania struktury materiałów włóknisto-cementowych z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego" *Badania Nieniszczące i Diagnostyka*, nr 3, 20-23, 2017.
- [33] P. Goodhew, J. Humphreys, R. Beanland "Electron Microscopy and Analysis", 3 ed., Taylor and Francis, London, 2001.
- [34] R.S.P. Coutts, P. Kightly "Bonding in Wood Fiber-Cement Composites" *Journal of Materials Science* vol. 19, 3355-3359, 1984.

Alireza Akhlaghi*
Dolphitech LTD

Porosity measurement in CFRP

ABSTRACT

Single point, amplitude distributions and area measurements via Matrix Array Ultrasonic Testing (MAUT) software tools can provide users numerous options and versatility to characterise and quantify porosity. These measurement tools can specifically be beneficial in Live Mode when capturing data for better visualisation and will lead to a more accurate decision-making. Although the application examples highlighted in this presentation are mainly focused on porosity measurements, such ultrasonic workflow can be fine-tuned and adopted for many other inspection tasks as a quantitative test method. This case study is carried out by utilising the MAUT technology as a new and pioneer technique for porosity evaluation.

Keywords: MAUT, Matrix Array Ultrasonic Testing; Porosity; Disbound; Delamination

1. Introduction

Distributed microporosity is always an issue as it can weaken the material and adversely affect the mechanical properties and durability of the components. Moreover, even if the overall porosity content remains below a threshold that causes a significant reduction in mechanical performance, its presence can mask the detection of other subsurface flaws and more critical defects such as disbound and delamination.

To demonstrate the variation in detectability of porosity, CFRP panels of different porosity levels were manufactured with flat bottom holes by Flying S Inc. for inspection with the MAUT instrument, the FBH samples mimic the response from a disbound or delamination like real application example.

The CFRP panels are made from T700S plain weave carbon fibre prepreg, which is 42% epoxy resin by weight. Three panels were made, where curing was performed at three different vacuum levels (50%, 75%, and 100%). 100% vacuum represents the nominal cure cycle, with 75% and 50% vacuums used to intentionally introduce higher levels of porosity. Each panel is made to the same specifications otherwise and looks like the panel pictured in Figure 1.

When dealing with real application examples porosity can have a significant impact on measurements and the overall

characterisation of the defects, this case study was carried out with FBH samples at varies dimensions to mimic this effect as high level of porosity can make it extremely difficult to detect such discontinuation of material when utilising ultrasonic testing equipment.

Each panel has five FBH samples, which can be seen from the “back face” in figure 1. The dimensions of the FBH are shown in figure 2. The holes will be labelled using their nominal diameter and depth to the nearest millimetre in this study.

Due to variation in the detectability of defects with porosity, it is also important to identify panels with higher porosity. This study will cover both the variation in the detectability of defects with porosity and how to distinguish more porous samples accordingly.

2. Solution

The panels were inspected utilizing MAUT equipment with 2.5MHz transducer module (TRM). This TRM has a central frequency of 2.5 MHz and an Aqualene delay line. It is suited to lower-grade composite material inspection, including materials with higher porosity levels.

A stitched map consisting of 5×5 tiles was acquired over the inspection surface to perform live C-Scans inspection.

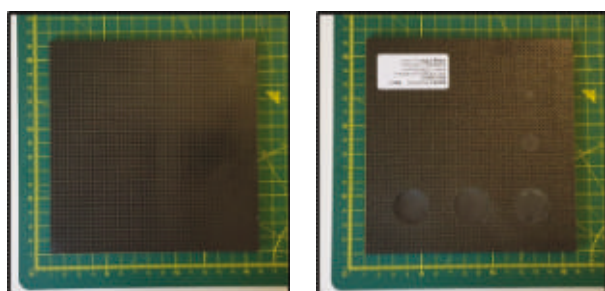


Figure 1. Photographs showing the appearance of the panels. The panel cured in a 100% vacuum is shown as an example. (a) shows the “inspection face” and (b) shows the “back face” of the panel.

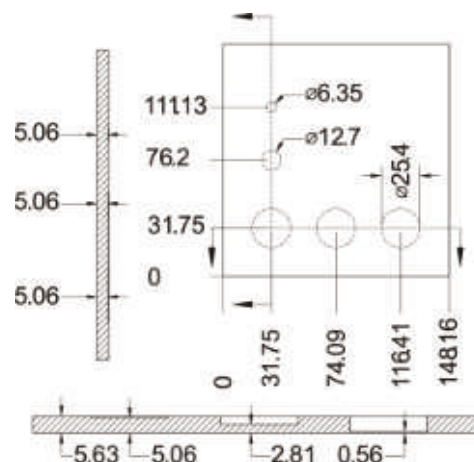


Figure 2. Technical drawing of the panel. Dimensions are given in millimetres.

*Corresponding author.

E-mail: alireza.akhlaghi@dolphitech.com

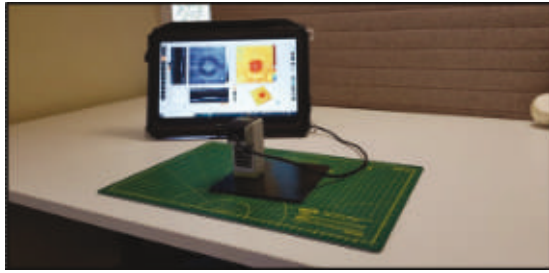


Figure 3. Photograph of setup on a panel using a MAUT and 2.5MHz TRM.

This is carried out freehand by positioning the TRM on the inspection area based on the predefined grid and stitching the data from each location together. A standard ultrasonic gel was used as the couplant.

This study will cover the variation in the detectability of defects with porosity and how to distinguish more porous samples. The MAUT instruments signal-to-reference tool will be used to quantify the difference between the desired signal and background level to show the variation in the detectability of the defects with porosity. The back wall amplitude is expected to reduce with porosity, which can be used as indication of distinguishing panels of different porosities. This is because the pores scatter the ultrasound as it travels through the material, so the level of sound energy received as an echo from the opposite surface of the material is significantly reduced.

Values used in these calculations for the signal-to-reference and back wall amplitude are taken from the average of measurements over a larger region. Using data over a large area provides a more representative measurement and, as a result, increased confidence. This is particularly advantageous for anisotropic materials such as composites where point measurements may vary significantly over small areas. MAUT software tools simplify this process by utilising live analysis tools over the 128×128 electrodes providing 16384 virtual elements.

This paper also highlights how imaging and thresholding of the data can be used to visualize areas of higher porosity, where the area covered can be another quantitative indicator of the porosity of the sample.

3. Challenges

The porosity content of the panels is higher when cured in a lower vacuum. This makes the material more attenuative and consequently, a lower frequency transducer is needed to penetrate the material. A 2.5 MHz TRM was chosen as a compromise between needing to penetrate the material and retaining the resolution needed to accurately image the defects.

4. Findings

The signal-to-reference tool was used on the manually stitched data set with the data gated to contain the relevant reflector as shown in figure 4. The area that the reference value was calculated from was kept consistent, covering an

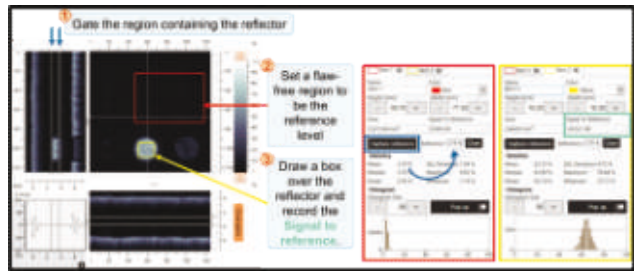


Figure 4. Process for calculating signal-to-reference for each reflector.

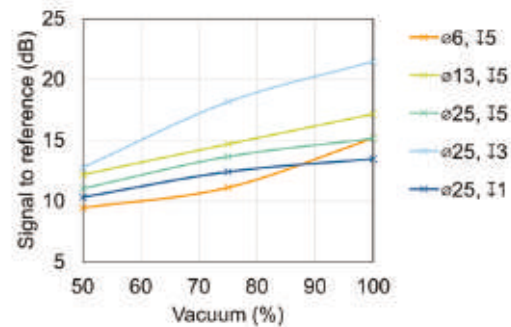


Figure 5. Signal-to-reference of reflectors. The reflectors are labelled using their nominal diameter and depth from the inspection surface to the nearest millimetre.

area slightly over 3600 mm² in size and with approximately 58,000 A-Scans. The resulting signal-to-reference values are shown in figure 5.

In figure 5, the signal-to-reference can be seen to reduce with lower vacuum levels, whereby the mean signal-to-reference for the 100% vacuum panel is 17.2 dB, compared to 14.4 dB and 11.4 dB for 75% and 50% vacuum panels respectively. The lower vacuum levels correspond to higher porosities, where the reduction in signal-to-reference is the result of porosity scattering the ultrasound, resulting in higher levels of noise and less signal from the defects themselves. It highlights the need to ensure porosity content is low to ensure defects are detected.

There are different ways of identifying panels with higher porosity. As highlighted, one method is the reduction in back wall amplitude, as panels with higher porosity are expected to be more attenuative to ultrasound. The amplitude is taken over the same area as the reference region in figure 4, but with just the back wall gated. The results are shown in figure 6.

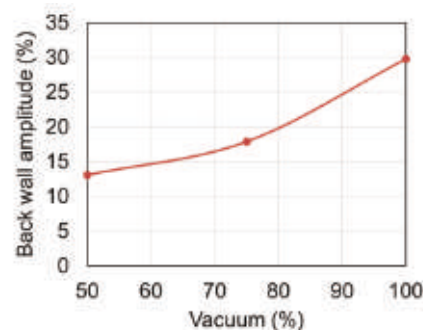


Figure 6. Back wall amplitude of panels cured in different vacuum levels.

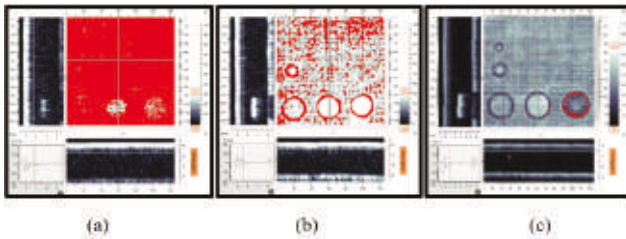


Figure 7. Amplitude view for manually stitched data on panels cured in (a) 50%, (b) 75% and (c) 100% vacuum.

In figure 6, the back wall amplitude reduces with lower vacuum and thus higher porosity. This confirms that the back wall amplitude reduces with increased porosity level. The change is significant and thus the panels of different porosity levels can clearly be distinguished.

To visualise areas of higher porosity, a threshold on amplitude of the C-Scan display can also be utilised. Figure 7 shows the result for a 20% amplitude threshold using the Defect Detection tool of the MAUT analysis tool. This is an effective approach for a quick pass/fail screening of composites, when the percentage amplitude that corresponds to an excessive level of porosity is known.

The panels are cured in a lower vacuum, to increase their porosity, have a larger area highlighted in red, which corresponds to larger areas of low amplitude. This is clearly visible in the A-Scan where a digital display threshold is used to show low amplitude areas in red to be highlighted in the C-Scans respectively to help differentiate the high and low porosity samples from each other. This also helps quantify the fractional area plotted in figure 8, useful for procedures that stipulate a maximum allowable porosity by area fraction.

There may be scenarios where defects need to be detected on more porous samples. Fortunately, the ability to detect

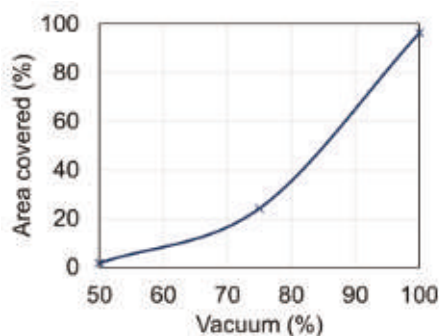


Figure 8. The area covered by the threshold region for panels cured in different vacuum levels.

the reflectors is better than what some of the signal-to-reference values may suggest. Figure 9 shows the manual stitch on the 50% vacuum panel, which represents the most porous and thus, most difficult to inspect panel. In figure 9, the thickness (ToF) view is shown with the back wall included in subfigure (a), and the ToF view is shown with internal gating and a threshold applied to help emphasize the flat bottom holes in subfigure (b).

All five of the flaws are clear to see in this thickness (ToF) view. Thus, the C-Scans reduce the problem to one of pattern

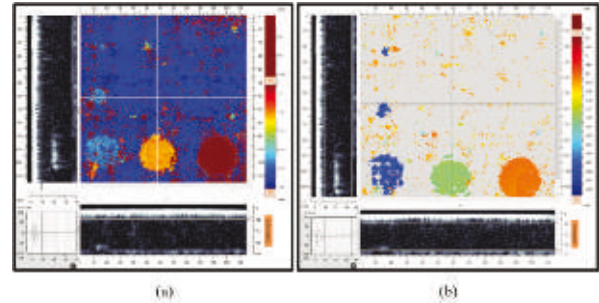


Figure 9. Thickness view of manual stitch taken on 50% vacuum panel. (a) shows the data with the back wall included, and (b) shows the data with internal gating and the amplitude threshold set to 12.5%.

recognition, which humans are well suited to, indicating that there are potentials to detect defects in more porous samples, if necessary. Hence making MAUT live C-Scans entirely unique when compared to traditional A-Scan displays.

5. Conclusion

With the live C-Scans and onboard statistical analysis, MAUT technology offers both detailed images and numerical data. The MAUT test principle is unique in providing live C-Scans from its 16384 virtual elements, and simultaneously enabling the operator to manually stitch the scanned data together for the inspection area. Allowing a rapid data acquisition and mapping.

The MAUT software tools for analysis also offer the functionality to perform statistics on board, where the defect signal strength could be quantified. This is noticeable as the signal-to-reference at the reflector depth was seen to greatly reduce with porosity.

The mean signal-to-reference for the 100% vacuum panel is 17.2 dB, compared to 14.4 dB and 11.4 dB for 75% and 50% vacuum panels respectively, whereby a lower vacuum corresponds to a higher porosity. This highlights the need to ensure porosity content is low, highlighting the “dangers” of porosity in their ability to mask other subsurface flaws and more critical defects such as disbond and delamination. If defects are to be detected and characterised in more porous samples, the MAUT live analysis software can generate C-Scans with ease, facilitating interpretation compared to conventional A-Scan displays.

To quantify the level of porosity, the average back wall amplitude can be monitored, or the Defect Detection tools can be utilised, enabling rapid Pass/Fail quality control according to a variety of required criteria.

6. Literature

This paper is based on a practical case study carried out by utilising the unique MAUT technology hence no current reference to any existing literature is available to the best knowledge of the original and subsequent authors. The measurements were carried out in line with the ASTM E3370-22 (Standard Practice for Matrix Array Ultrasonic Testing of Composites, Sandwich Core Constructions, and Metals Used in Aerospace Applications).

Jerzy Kaszyński*

Emerytowany Profesor Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie

Problematyka badań nieniszczących w budownictwie na krajowych konferencjach KKBN - przeżyjmy to jeszcze raz

1. Stan budownictwa polskiego w okresie powojennym

Powojenna sytuacja Polski wymagała odbudowy całej gospodarki krajowej, niezależnie od tworzenia nowych systemów społeczno politycznych. Zniszczenia wojenne obejmowały liczne obiekty przemysłowe i drogowe, ale przede wszystkim masowe zniszczenia budownictwa powszechnego: mieszkaniowego, sakralnego i wielu innych obiektów użyteczności publicznej. Niektóre obiekty nadawały się do likwidacji uszkodzeń i stosownych remontów, ale znaczna ich część, a zwłaszcza budynki w zbombardowanych dzielnicach mieszkaniowych zostały zniszczone całkowicie. Polski przemysł budowlany był także zubożony przez działania wojenne i inne priorytety w okresie jej trwania.

Odbudowa zaczęła się od uruchomienia cegielni, tartaków, hut i stalowni, a także cementowni, które nabierały coraz większego znaczenia, bo takie były założenia gospodarki budowlanej w krajach należących do tzw. bloku socjalistycznego. Technologie stosowane w budownictwie z konieczności miały tradycyjny charakter, daleki od standardów funkcjonujących w krajach zachodnich i mniej dotkniętych skutkami wojny. Działyły przy tym także czynniki ekonomiczne, polegające głównie na oszczędnym projektowaniu i minimalizacji kosztów budowy. Ponadto w warunkach obowiązującego systemu gospodarki nakazowo rozdzielczej i braku materiałów budowlanych w obrocie wolnorynkowym, powstawały budynki o niskim standardzie użytkowym.

W takiej sytuacji koniecznością było rozszerzenie kontroli technicznej nowo wznoszonych obiektów budowlanych, niezależnie od badania i oceny stanu technicznego budynków uszkodzonych lub wyłączonych z eksploatacji w czasie wojny. Na ogół pierwszoplanowym celem badań było określenie nośności konstrukcji żelbetowej, drewnianej, stalowej lub murowanej w stanie istniejącym. W każdym przypadku konieczne było określenie właściwości mechanicznych tych materiałów, w tym przede wszystkim cech wytrzymałościowych. Nastąpił więc dynamiczny rozwój nieniszczących metod badań materiałów budowlanych, zwłaszcza materiałów konstrukcyjnych.

2. Proces wprowadzania nieniszczących metod badań do budownictwa

Tematykę nieniszczących metod badań podejmowano w Polskiej Akademii Nauk, Instytucie Techniki Budowlanej, w Politechnice Warszawskiej, a następnie w innych uczelniach technicznych. Grono profesorów wiodących w tej dziedzinie stanowili m.in. Antoni Sawczuk, Zdzisław Pawłowski, Józef Pysznik, Lesław Brunarski i Leonard Runkiewicz. Istotnym elementem rozwoju metod nieniszczących było opracowanie przez Instytut Elektrotechniki i wdrożenie do produkcji przez Unipan betonoskopów ultradźwiękowych typu BI oraz sprowadzanie z zagranicy sklerometrów Schmidta, Poldiego i innych.

Stosowanie nieniszczących technik w badaniach konstrukcji budowlanych wymagało też rozszerzenia wiedzy i zdobycia podstawowego doświadczenia wśród kadry inżynierskiej. Wiodącą rolę w popularyzacji tych metod spełniał Instytut Techniki Budowlanej, który w latach 60-tych organizował serię kursów podyplomowych dla inżynierów. Aktywność naukowa profesorów ITB Lesława Brunarskiego i Leonarda Runkiewicza była też ukierunkowana na przygotowanie merytoryczne i wydanie w 1974 r. pierwszych Norm Polskich na nieniszczące badania konstrukcji z betonu: PN-74/B-6261 dla metody ultradźwiękowej i PN-74/B-6262 dla metody sklerometrycznej za pomocą młotka Schmita.

W 1973 r. Polska była organizatorem VII Międzynarodowego Kongresu Badań Nieniszczących w Warszawie pod przewodnictwem prof. Zdzisława Pawłowskiego z IPPT PAN. Następnie w latach 1974-78 odbyły się trzy pierwsze Konferencje Badań Nieniszczących w Budownictwie zorganizowane przez Instytut Techniki Budowlanej i Politechnikę Warszawską. Dalsze konferencje pod taką samą lub podobną nazwą, były organizowane w różnych miastach przez różne ośrodki naukowe i organizacje techniczne. Wśród nich najdłuższą historię mają coroczne Krajowe Konferencje Badań Nieniszczących (KKBN) organizowane przez Sekcję Wytrzymałości Materiałów SIMP (obecnie PTBNiDT – SIMP), łącznie z kolejno zmieniającymi się ośrodkami naukowymi lub naukowo-technicznymi. Od 1995 r. w programie tych konferencji jedna sesja jest tematycznie związana z badaniami materiałów i konstrukcji budowlanych.

Znakomitą postacią na konferencjach KKBN był prof. dr hab. inż. Zdzisław Pawłowski. Jego rozległa wiedza i praca naukowa w IPPT PAN oraz aktywność w dziedzinie popularyzacji

*Autor korespondencyjny.

E-mail: jerzy.kaszyński@zut.edu.pl

badan nieniszczących w kraju i za granicą, poprzez pełnienie wysokich funkcji w organizacjach międzynarodowych sprawiała, że był on autorytetem dla nas „nieniszczyków” i wsparciem dla organizatorów tych konferencji.

Sesje budowlane na konferencjach KKBN były organizowane przy współudziale Instytutu Techniki Budowlanej poprzez aktywność i uczestnictwo profesora dr hab. inż. Leonarda Runkiewicza w komitetach organizacyjnych i naukowych tych konferencji. Poza tym zabiegał on o udział w nich licznej grupy inżynierów i młodych naukowców oraz prezentowanie swoich prac badawczych i doświadczeń praktycznych. Występował też z ciekawymi referatami, w których prezentował postępy w metodach i technice badań, najnowsze wyniki badań realizowanych w ITB i innych ośrodkach lub zespołach naukowo badawczych.

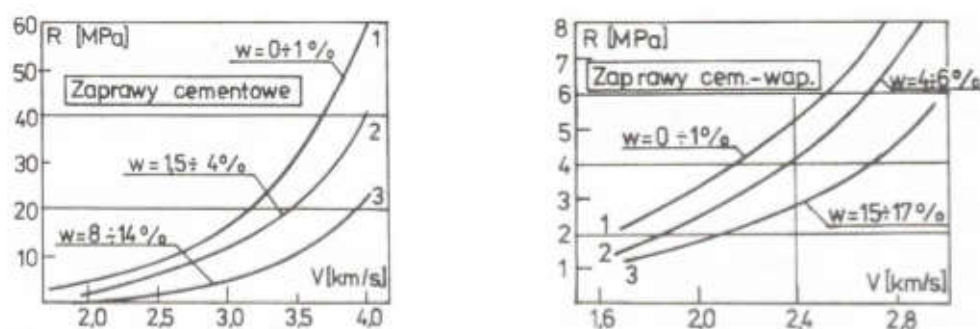
3. Badania wytrzymałości betonu i innych materiałów konstrukcyjnych

Tematyka badań wytrzymałości betonu w istniejących i bieżąco realizowanych konstrukcjach występowała w znacznej części wygłaszanych referatów. Licznie

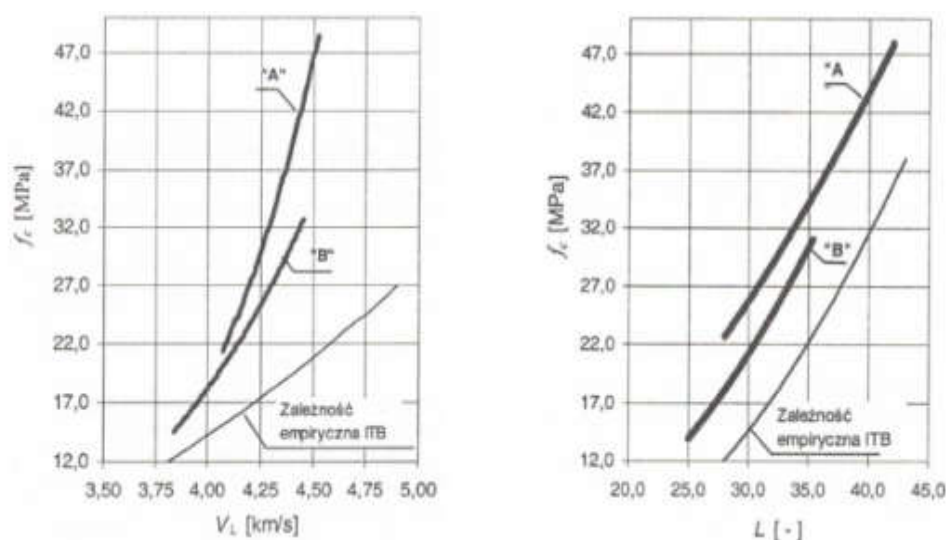
reprezentowany zespół Politechniki Wrocławskiej pod kierownictwem prof. dr hab. inż. Jerzego Hoły, korzystający z doświadczeń i dorobku naukowego prof. Józefa Pysznika, prezentował wyniki swoich badań laboratoryjnych, a także badań in situ różnych starych lub bieżąco wykonywanych obiektach.

Wrocławianie rozwijali ogólnie znane opracowania ITB oraz IPPT PAN związków korelacyjnych wytrzymałości betonu badanego metodą ultradźwiękową $f_c(V)$ i metodą sklerometryczną za pomocą młotka Schmidta $f_c(L)$. Zespół ten z dużym udziałem dr Krzysztofa Schabowicza i dr Bogdana Stawiskiego (obecnie wszyscy mają stopnie dr hab. i profesora lub tytuły profesorskie) opracował i wprowadzał do badań ultradźwiękowych głowice stożkowe, a później eksponencjalne, o quazi punktowej powierzchni kontaktu z badanym materiałem.

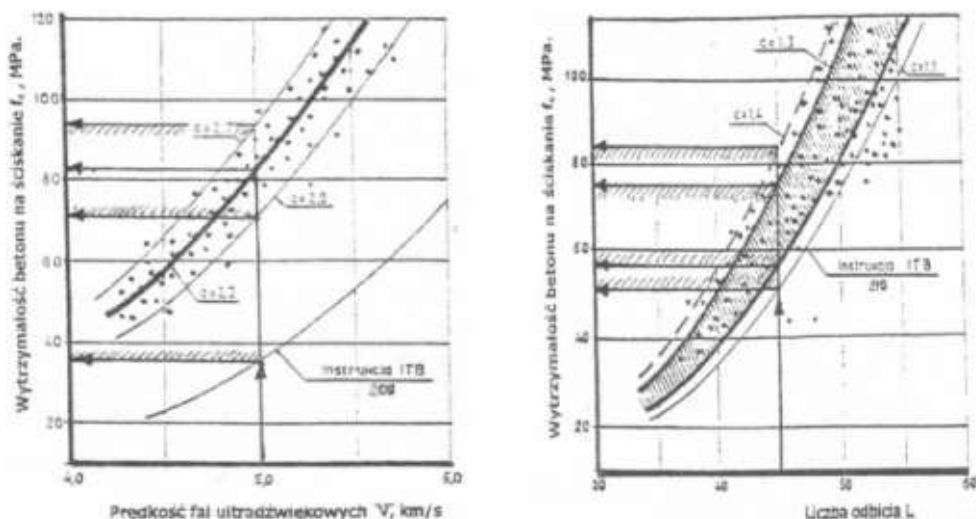
Różnorodność betonów zwykłych pod względem ich struktury i aktualnego stanu fizycznego wymagała korekty znanych związków korelacyjnych na podstawie badań próbek wycinanych z konstrukcji lub formowanych w czasie jej wykonywania. Dla betonów specjalnych, obecnie coraz częściej stosowanych w budownictwie, opracowywano odrębne związki korelacyjne. Możliwość kompleksowego



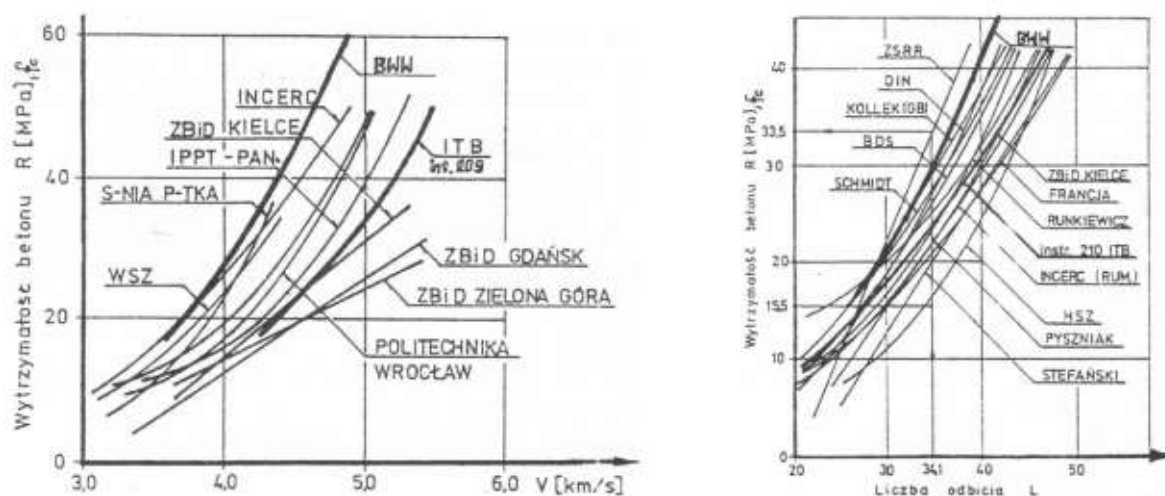
Rys. 1. Krzywe korelacji $R(V)$ dla zapraw cementowych oraz cementowo-wapiennych o różnych stopniach wilgotności.



Rys. 2. Zależności empiryczne do oceny wytrzymałości na ściskanie badanych betonów samozagęszczonych metodą ultradźwiękową oraz sklerometryczną.



Rys. 3. Zależności empiryczne oceny wytrzymałości betonów wysokiej jakości metodą ultradźwiękową i metodą sklerometryczną



Rys. 4. Przykłady charakterystycznych zależności $R - V$ ($f_c - V$) dla metody ultradźwiękowej i $R - L$ ($f_c - L$) dla sklerometrów Schmidta typu N

zastosowania metody ultradźwiękowej i sklerometrycznej na przykładzie badania starej konstrukcji przemysłowej wykazali Kazimierz Kujawiński i A.Pawlonka. Potwierdzeniem skuteczności kompleksowych badań wytrzymałości betonu w istniejących obiektach, jest eksperyment Krzysztofa Schabowicza i D. Kwiatek, wykorzystania kilku parametrów pomiarów nieniszczących, łącznie z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych.

Podobny zespół wrocławski (A.Pawlonka i Bogdan Stawiski) zaprezentował wyniki własnych badań wytrzymałościowo ultradźwiękowych i sklerometrycznych na zaprawach cementowych i cementowo-wapiennych, w różnych stanach ich zawilgocenia w zakresie 0÷15 %.

Stosownie do rozwoju technologii betonu, niezależne opracowania związków korelacyjnych wytrzymałości betonów samozagęszczalnych dla metody ultradźwiękowej i sklerometrycznej $f_c(V)$ i $f_c(L)$, prezentowali ich autorzy J.Hoła, Krzysztof Schabowicz i Tomasz Gorzelańczyk.

Podobne badania na betonach wysokiej wytrzymałości (BWW) prowadzone w ITB przedstawiał prof. Runkiewicz.

Wyniki tych badań wskazują na znaczne różnice w porównaniu z krzywymi skalowania opracowanymi wcześniej w ITB dla betonów zwykłych. Badania eksperymentalne J.Hoły i K.Schabowicza na próbach betonu wysokowartościowego metodami ultradźwiękową i sklerometryczną z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej wskazują na to, że sieć neuronowa poprawnie przewiduje wytrzymałości betonu, bez potrzeby wyznaczania związków empirycznych $f_c(V)$ i $f_c(L)$.

Do grona zespołów uczelnianych, zajmujących się nieniszczącymi metodami badań wytrzymałości betonów dołączyli:

- Jerzy Piasta i L.Hebda z Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach – betony z kruszywem węglanowym,
- grupa Andrzeja Garbacza z Politechniki Warszawskiej – beton żywiczny, polimerobeton,
- grupa Wiesławy Głodkowskiej z Politechniki Koszalińskiej – betony z kruszywem glinoporytowym.

Podobnych opracowań było więcej, co wyraził prof. Runkiewicz, przedstawiając zbiorczo tzw. krzywe skalowania

dla obu metod okresu lat 1956÷1990.

Na tym „festiwal” poszukiwań związków między wytrzymałością betonu i innych materiałów, a efektami ultradźwiękowymi i sklerometrycznymi uległ wyhamowaniu między innymi dlatego, że powstawały zakłady produkujące i dowożące na budowę świeży, testowany beton, tzw. beton towarowy.

Podjmowano też próby badania wytrzymałości murów ceglanych i kamiennych, jednakże wyniki badań ultradźwiękowych lub sklerometrycznych typowymi metodami, nie dawały wystarczająco jednoznacznych wyników. Z punktu widzenia struktury tych materiałów, są to ośrodki kompozytowe, zawierające duże elementy w postaci cegieł ceramicznych lub kamieni. Korzystne wyniki można jednak otrzymywać wg Bogdana Stawiskiego przy stosowaniu głowic ekspotencjalnych, na zasadzie oddzielnych badań ultradźwiękowych zaprawy i cegły lub kamieni.

Najstarszym materiałem budowlanym obok kamieni naturalnych jest drewno, które oprócz wielu zastosowań w budownictwie, jest przede wszystkim materiałem

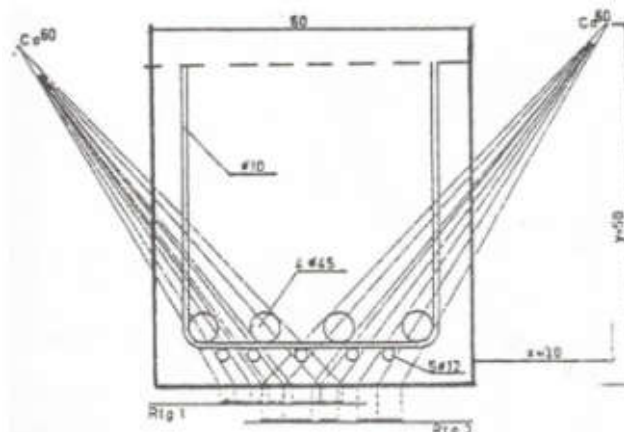
konstrukcyjnym. Drewno nabiera właściwości mechanicznych wynikających z gatunku biologicznego (drzewa), a także z obróbki technicznej. Zmienia swoje właściwości w różnych stanach zawilgocenia, podlega też procesowi starzenia i jest narażony na degradację biotyczną powodowaną grzybami.

Podstawową metodą nieniszczącą badania stanu technicznego drewna jest dynamiczne wciskanie stalowego trzpienia (wstrzeliwanie) w powierzchnię zamocowanego elementu konstrukcji, np. słupa. Stąd bierze się żartobliwa nazwa „metoda Bin Ladena”. Badania takie za pomocą przyrządu nazywanego pilodynem, zaprezentował Wojciech Kokociński z Akademii Rolniczej w Poznaniu.

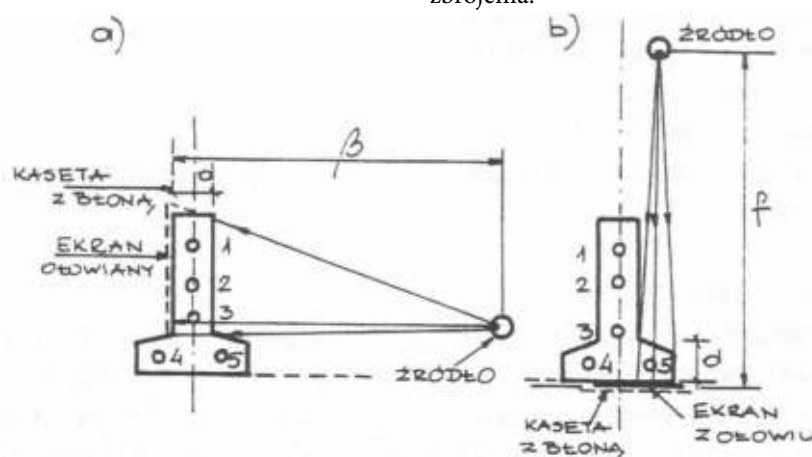
4. Badania konstrukcji (in situ)

Większość badań wykonywanych na rzeczywistych konstrukcjach, oprócz znaczenia praktycznego, miała charakter doświadczalny i dlatego metodykę i technikę tych badań wielokrotnie prezentowano na konferencjach KKBN. Stosowano w nich różne metody z wykorzystaniem techniki ultradźwiękowej, radiologicznej, termowizyjnej, neuronowej elektromagnetycznej, laserowej, emisji akustycznej, a czasem także udarowej.

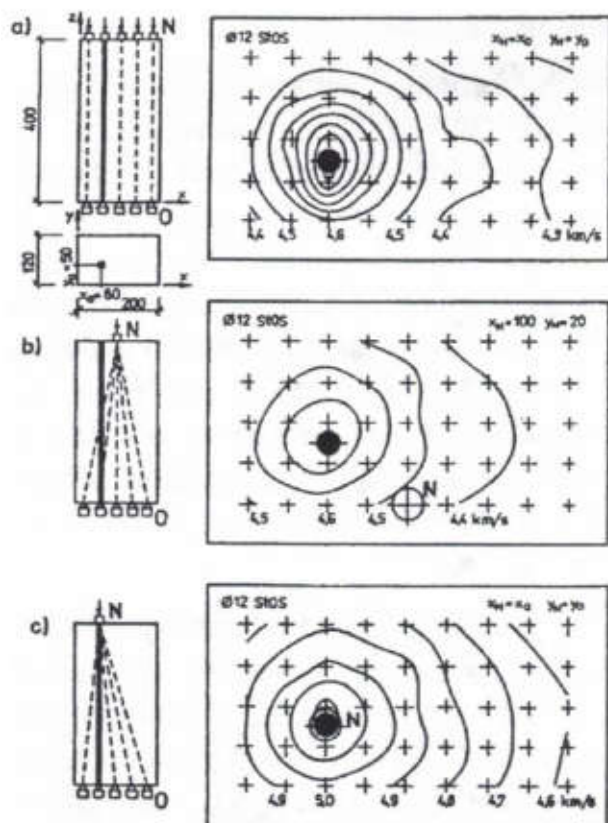
Podstawowym celem badania konstrukcji było zawsze określenie jej nośności i trwałości. Nośność konstrukcji żelbetowej zależy oczywiście od wytrzymałości betonu, ale także w dużej mierze od ilości, rodzaju i rozmieszczenia zbrojenia. Profesor Runkiewicz kilkakrotnie przedstawiał przypadki badania lokalizacji i inwentaryzacji zbrojenia w elementach konstrukcji żelbetowej lub też kabli w belkach sprężonych, z zastosowaniem metody radiograficznej. Badania autora (Jerzy Kaszyński) na modelach elementów żelbetowych, dostępną wówczas aparaturą, dały podstawy do ultrasonografii konstrukcji żelbetowych. Sondowanie współosiowe lub radialne może dać efekt w postaci izolinii prędkości fali ultradźwiękowej, współosiowych z prętem zbrojenia stalowego, natomiast sondowanie kątowe z dowolnego miejsca umożliwia zobrazowanie izolinii fazowych, także wyznaczających usytuowanie elementu zbrojenia.



Rys. 5. Zbrojenie dolne w belce w środku przęsła określone metodą radiograficzną



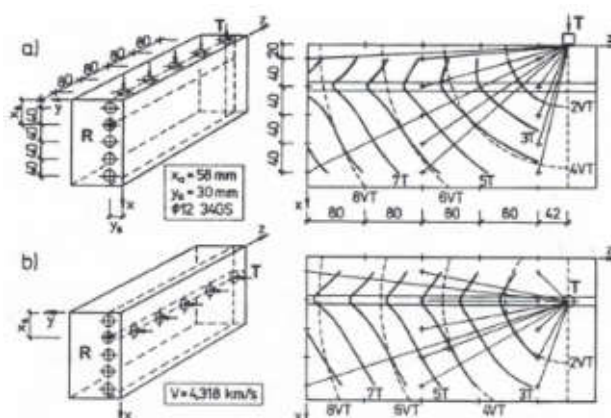
Rys. 6. Układy badań radiograficznych sprężonych dźwigarów kablobetonowych



Rys. 7. Ultrasonogramy modelu betonowego z zabetonowanym prętem 12 St0, otrzymane z sondowania równoległego i radialnego przy użyciu płaskie głowicy nadawczej i punktowej odbiorczej

Późniejsze badania Krzysztofa Schabowicza na bloku betonowym z wewnętrznym styropianowym modelem wady dały efekt tomografii ultradźwiękowej. W badaniach zastosowano przestawianą wielogłowicową antenę transmisyjno-odbiorczą oraz oprogramowanie komputerowe, umożliwiające uzyskanie wizualizacji usytuowania i kształtu wady.

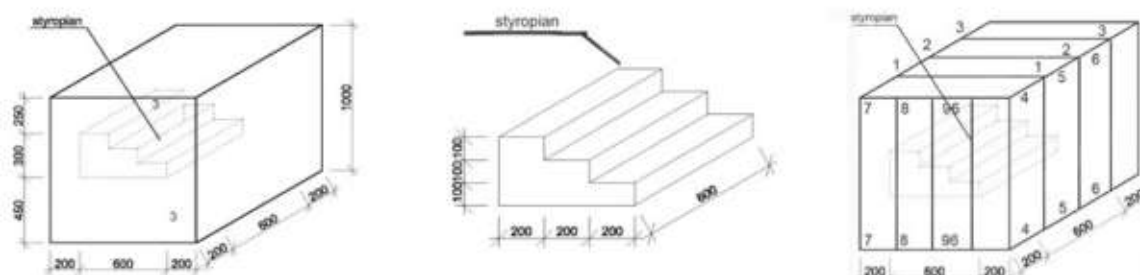
Znana i znormalizowana w 1992 r. metoda Pull-Off pozwalająca na badanie wytrzymałości betonu na rozciąganie w płytowych elementach konstrukcyjnych, a także na badanie przyczepności powłok ochronnych do podłoża betonowego, była opisywana na konferencjach przez Leonarda



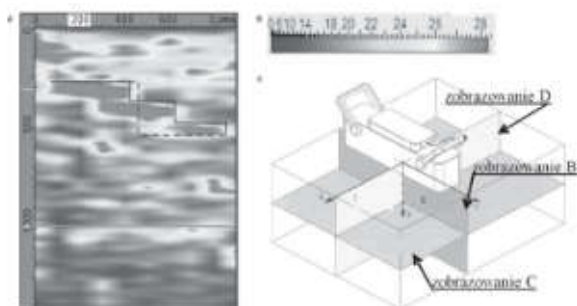
Rys. 8. Przykłady badań ultrasonograficznych w kątowym układzie głowic oraz izolinie fazowe propagacji fal: a – w płaszczyźnie zbrojenia $y = y_0$; b – na powierzchni bocznej modelu

Runkiewicza i Andrzeja Moczko jako metoda quasi nieniszcząca, ze względu na konieczność wykonywania odwiertów koronowych przy każdym pomiarze.

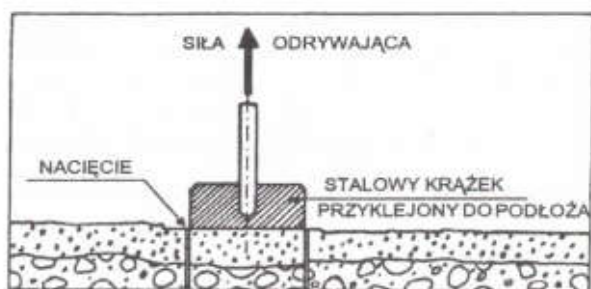
Metoda badania przyczepności i delaminacji powłok polimerowych do podłoża betonowego opisana przez Andrzeja Garbacza i M. Krystosiaka zastępuje uciążliwą w realizacji metodę Pull-Off, gdyż nie wymaga ona wykonywania odwiertów. Bazuje tylko na wykorzystaniu tłumienia fali ultradźwiękowej na styku powłoki z podkładem i wprowadzeniu parametru tzw. średniokwadratowej wartości czasowego rozkładu odbieranego impulsu $MS(t)$. W pełni nieniszcząca metoda Impact-Echo, prezentowana była na konferencjach przez prof. Włodzimierza Starosolskiego i Andrzeja Moczko od strony teoretycznej i aparaturowej. Metoda ta pozwala na pomiar grubości płyty betonowej lub wykrywanie, lokalizację i określanie rozmiarów wady o charakterze rozwarstwiającym. Polega ona na wzbudzeniu krótkiego impulsu fali sprężystej przez uderzenie i odbiór fali odbitej, która po transformacji Fouriera jest zobrazowana w postaci wykresu amplitudowo-częstotliwościowego, z wyraźnym impulsem częstotliwości fali odbitej. Odległość d wady od powierzchni jej wzbudzenia określa się z podstawowego związku kinematycznego ($V = 2df$).



Rys. 9. Schemat próbki do badań z wymiarami zamodelowanej wady w postaci kształtki styropianowej oraz zaznaczonymi miejscami pomiarowymi



Rys. 10. Wyniki badań dla próbki betonowej:
a) obrazowanie D w miejscu pomiarowym 2, b) skala dyspersji ultradźwiękowej, c) antena pomiarowa w układzie współrzędnych i możliwe do uzyskania obrazowanie,



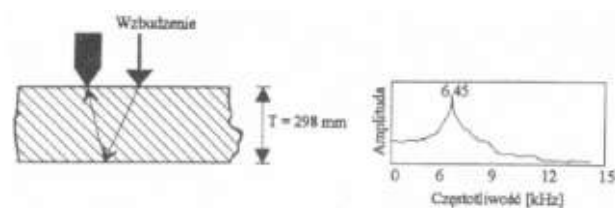
Rys. 11. Schemat badania metodą „Pull-Off”

Przykład zastosowania tej metody w badaniu delaminacji w betonowej posadzce o dużej powierzchni zaprezentował zespół Jerzego Hoły, Łukasza Sadowskiego, Krzysztofa Schabowicza i J. Rybaka. Innym przykładem jest zastosowanie podobnego zestawu aparatury pod firmową nazwą Impulse Response s'Mash w badaniach pai fundamentowych.

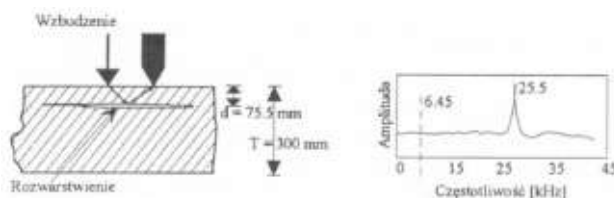
W konstrukcjach żelbetonowych strefy rozciągane zawsze zawierają zbrojenie stalowe, ale w betonie dopuszczone są zarysowania o ograniczonej szerokości rozwarcia. Poza nielicznymi przypadkami, wszystkie rysy w betonie mają największe rozwarcie na powierzchni elementu konstrukcyjnego i nie obejmują całego przekroju. Bywają jednak przypadki zarysowania betonu o większej szerokości rozwarcia, a nawet w sytuacjach awaryjnych, mogą obejmować cały przekrój.

Badania głębokości rysy w konstrukcji żelbetonowej, prezentowane przez Jerzego Kaszyńskiego na KKBN, były prowadzone na modelach betonowych, z prętem zbrojeniowym i z sztucznie uformowaną szczeliną. Pomiar ultradźwiękowy polegał na równoległym usytuowaniu głowic na powierzchni betonu po obu stronach szczeliny, stanowiącej ekran odbijający fale i wykorzystaniu efektu dyfrakcji fali na jej krawędzi. Zapis odbieranego impulsu zawiera złożony efekt fali ugiętej i najwcześniej rejestrowane przejście fali wzdłuż zbrojenia, a także falę odbitą na przeciwległej powierzchni betonu.

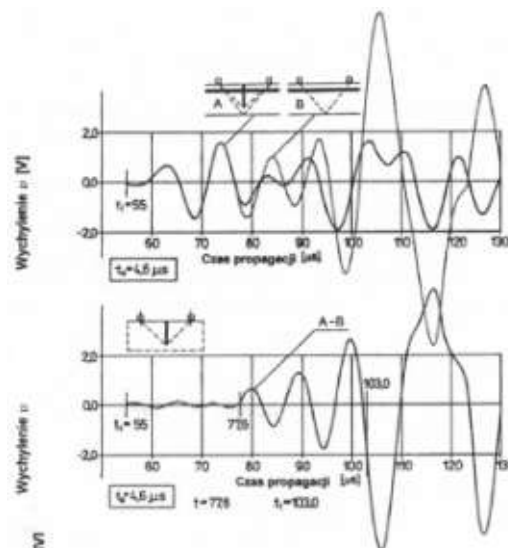
W celu odfiltrowania efektów zakłócających konieczny jest drugi pomiar poza szczeliną, w tej samej linii i w takim samym rozstawie głowic. Różnica obu zapisów oznacza



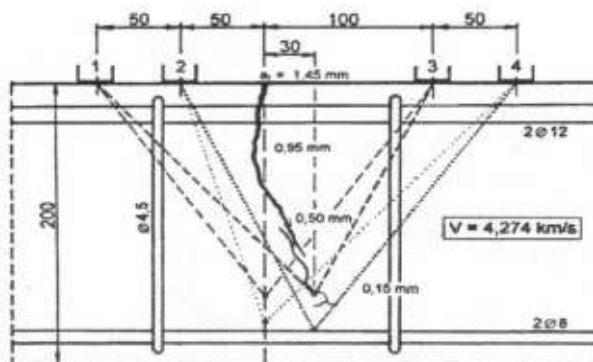
Rys. 12. Przykładowe wyniki pomiaru grubości żelbetowego elementu płytowego



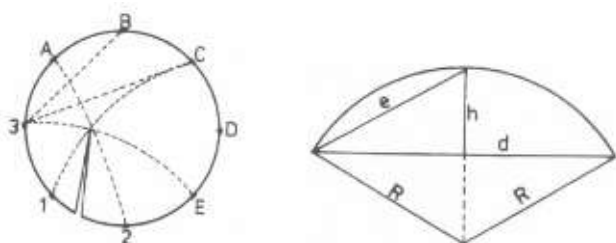
Rys. 13. Przykładowe, wyniki uzyskane w miejscu wystąpienia wady typu „rozwarstwienie”



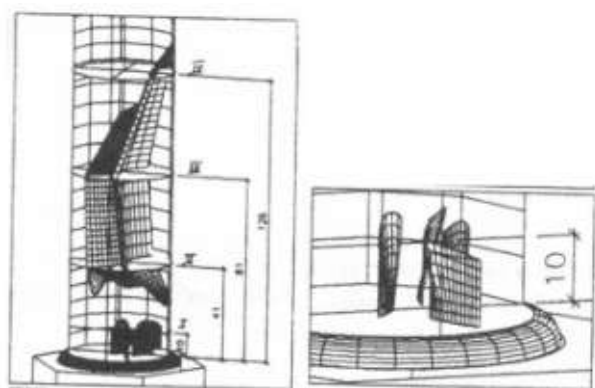
Rys. 14. Badania głębokości szczeliny betonoskopem T544: a, b – rejestracje impulsów z efektami dyfrakcji na krawędzi szczeliny i wzdłuż zbrojenia poza szczeliną, c – rejestracje skorygowane, d – impuls odfiltrowany



Rys. 15. Schemat i wyniki badań głębokości rysy naturalnej przy różnych układach głowic



Rys. 16. Rozmieszczenie punktów dla głowic nadawczych i odbiorczych na obwodzie kolumny w każdym badanym przekroju oraz cięciwa łuku jako model geometryczny



Rys. 17. Płaszczyzny pęknięć w jednej z kolumn pokazane w aksjonometrii w dwóch różnych powiększeniach

rejestrację tylko fali ugiętej i umożliwia określenie głębokości szczeliny.

Przy niesymetrycznym układzie głowic względem szczeliny, możliwe jest odfiltrowanie zakłóceń odbieranego impulsu, przez zamianę głowic bez zmiany ich wzajemnego położenia.

Modelem geometrycznym pomiarów fali ugiętej na krawędzi szczeliny, lub na końcu rysy naturalnej jest elipsa, której ogniska wyznaczone są położeniem obydwu głowic. Promienie wodzące elipsy określają drogę fali padającej i ugiętej na końcu szczeliny. Znając prędkość fali ultradźwiękowej w betonie i czas odbioru fali ugiętej, można określić wszystkie parametry elipsy, a tym samym głębokość rysy prostopadłej do powierzchni betonu. Jeżeli rysa jest ukośna, to należy wykonać dwa pomiary i wówczas współrzędne przecięcia obydwu elips wyznaczają miejsce zakończenia rysy.

Oryginalne w założeniach teoretycznych badania ultradźwiękowe zarysowanych kolumn kamiennych z piaskowca o przekroju kołowym, zaprezentował Bohdan Stawiski. Badania w wielu płaszczyznach poziomych prowadzono przy założeniu, że drogi przepływu fali poza rysą są prostoliniowe, natomiast w obszarze zarysowania do obliczeń przyjęto inne (fikcyjne) założenie, że fale „omijają” rysę, przebiegając po łuku kołowym o promieniu R . Przy dwóch takich pomiarach, punkt przecięcia obydwu łuków wyznacza zakończenie rysy w badanym przekroju.

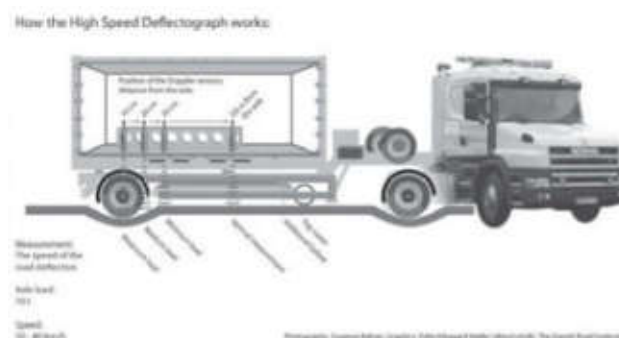


Rys. 18. Rentgenogram złącza czołowego środka z pęknięciem na całej długości styku

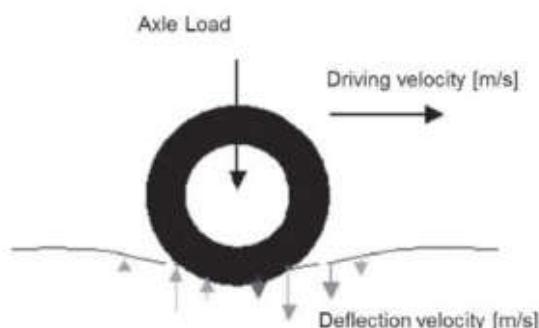
5. Budownictwo komunikacyjne

W dziedzinie budownictwa komunikacyjnego najważniejszymi obiektami są mosty, wiadukty i drogi. Intensywna eksploatacja i wielokrotność obciążenia powodują, że ich trwałość użytkowa jest określana na 60 lat, choć wiele obiektów, w tym także mostów wciąż jeszcze użytkowanych, przekracza wiek 100 lat. Zespół pracowników Zakładu Konstrukcji Metalowych Politechniki Szczecińskiej prowadził wieloletnie (1956÷1990 r.) badania rentgenograficzne głównych spoin czołowych w 155 mostach i wiaduktach stalowych o konstrukcji blachownicowej lub kratowej. Wyniki tych badań wraz z ogólną analizą i klasyfikacją wadliwości badanych mostów kolejowych przedstawił na KKBN Bernard Wichtowski – aktywny uczestnik tych badań.

Także długoletnie badania „wierzchniej warstwy nawierzchni drogowej metodami powierzchniowymi” prowadził i prezentował na konferencjach Romuald Sztukiewicz. Wierzchnie warstwy nawierzchni drogowych i lotniskowych z betonu cementowego oraz nawierzchnie drogowe z warstwą wierzchnią z betonu asfaltowego badano ultradźwiękowo przy równoległym układzie głowic o stałym rozstawie, w 8-letnim okresie monitorowania w wyznaczonych sektorach drogi. Niezależnie od tego badano grubości poszczególnych warstw nawierzchni georadarem RAMAC/RPR. Jest to urządzenie wykonujące pomiary w ruchu na zasadzie wykorzystania fal elektromagnetycznych z ciągłą rejestracją graficzną wyników.



Rys. 19. Ruchomy zestaw pomiarowy z ugięciomierzem laserowym TSD



Rys. 20. Ugięcie nawierzchni pod toczącym się kołem



Rys. 21. Porównanie wartości wskaźnika SCI300 dla czterech prędkości pomiarowych

Postęp techniczny w badaniach nawierzchni drogowych doprowadził do szybkich pomiarów ugięcia warstwy wierzchniej, w czasie jazdy z dużą prędkością, dochodzącą do 80 km/godz.

dzięki wykorzystaniu dopplerowskich czujników laserowych, zamontowanych na specjalnym zestawie pomiarowym w przyczepie samochodu.

6. Tematyka badań wybranych materiałów

Fibrobeton występujący w różnych odmianach rozproszonego zbrojenia z cienkiego drutu w całej objętości betonu jest materiałem o zwiększonej wytrzymałości na rozciąganie i większej odporności na obciążenia dynamiczne i ruchowe. Ma zastosowanie w nawierzchniach drogowych, lotniskowych i posadzkach przemysłowych oraz w wielu innych rozwiązaniach konstrukcyjno budowlanych. W zespole poznańsko wrocławskim (Tomasz Błaszczyński, Marta Przybylska-Fałek, Tomasz Gorzelańczyk, Jerzy Hoła) przeprowadzono badania emisji akustycznej w czasie obciążania ściskającego w porównaniu z betonem niezbrojonym. Stwierdzono, że poziom inicjujących pęknięć σ_{cr} jest trudno zauważalny, a poziom naprężeń krytycznych σ_{cr} jest nieco wyższy niż w betonie nie zbrojonym o tym samym składzie.

Wyroby ceramiczne były badane przez Bohdana Stawiskiego ultradźwiękowo przy zastosowaniu głowic eksponencyjnych. Wyroby ogniotrwałe, nominalnie do temperatury 1500C, z wadami produkcyjnymi o charakterze wewnętrznych rozwarstwień, występowały w pewnych partiach kształtek i cegieł szamotowych. Precyzyjne badania nieniszczące pozwoliły na identyfikację typowych wad, ważnych dla producenta. Podobny charakter i cel miały badania dachówek ceramicznych.

Jest jeszcze wiele tematów prezentowanych i dyskutowanych na 49-ciu minionych konferencjach KKBN. Będą one wspomniane na Jubileuszowej 50-ej Konferencji w gronie jej uczestników i autorów referatów. Dynamiczny postęp w dziedzinie aparatury pomiarowej sprzyja dalszemu rozwojowi metod badania konstrukcji, materiałów budowlanych, a także nowoczesnych technologii. Będzie o czym pisać przy okazji następnego Jubileuszu Konferencji KKBN.

Maciej Martyna*, Roman Martyna

Członkowie O.I.P.E.E.C. Międzynarodowej Organizacji d/s. Badania Trwałości Lin

Laboratorium LRM-NDE, Zabierzów

Możliwości i ograniczenia magnetycznej metody MRT badania stanu technicznego lin stalowych w czasie ich eksploatacji na urządzeniach dźwignicowych

Possibilities and limitations of the magnetic MRT method for investigating the technical condition of wire ropes during their service life

STRESZCZENIE

Liny stalowe są najsłabszymi elementami urządzeń linowych, w czasie eksploatacji druty lin ulegają degradacji spowodowanej zmęczeniem materiału przy wielokrotnym przeginięciu, powierzchniowym starciu, korozji i uszkodzeniom mechanicznym. Okres użytkowania lin jest krótszy niż urządzenia linowego na którym są zainstalowane. O konieczności odłożenia liny z eksploatacji decyduje najbardziej zużyty odcinek. Do tej pory szeroko stosowane i standaryzowane badania niszczące określające ABL (Actual Breaking Load) jak i inspekcja wizualna VT (Visual Testing) lin stalowych nie dają zadowalających rezultatów, a przy zastosowaniu nowoczesnych wielowarstwowych kompaktowanych konstrukcji lin o dużych średnicach nie pozwalają wykryć degradacji zmęczeniowej drutów w linie. Jedynie zastosowanie badań MRT (Magnetic Rope Testing) umożliwia wykrycie całego spektrum uszkodzeń występujących w czasie eksploatacji lin stalowych. Badania NDT lin decydują o bezpieczeństwie pracy i kosztach eksploatacji urządzeń linowych. W artykule opisano warunki eksploatacji lin stalowych na dźwignicach w przemyśle morskim oraz posłużono się przykładem krytycznego uszkodzenia, które wykazuje konieczność priorytetowego zastosowania metody MRT w celu określenia stanu technicznego lin stalowych w czasie ich eksploatacji na dźwignicach. Model matematyczny [L-10] dla metody MFL rozwijany jest w Laboratorium LRM-NDE od ponad 40 lat. Aktualny poziom jego zaawansowania pozwala badać wpływ parametrów uszkodzeń i czujników na przebieg i wartość użytych impulsów diagnostycznych.

Słowa kluczowe: Liny stalowe; MRT; Inspekcje lin stalowych; Dźwigi.

ABSTRACT

Wire ropes are the weakest parts of rope installations, during their utilization the rope wires are subject to deterioration caused by fatigue of material from repeated bending, surface abrasion, corrosion and mechanical damage. The lifetime of wire ropes is shorter than the lifetime of wire rope installation on which they are installed. The need to remove a wire rope from service is often determined by the most worn section. To date, widely used and standardized destructive tests determining ABL (Actual Breaking Load) as well as VT (Visual Testing) inspection of wire ropes do not give satisfactory results, and with modern multilayer/compact rope designs do not allow to detect fatigue deterioration of wires in the wire rope. Only the use of MRT (Magnetic Rope Testing) testing allows the detection of the entire spectrum of damage occurring during the service life of wire ropes. This article describes the operating conditions of wire ropes on cranes in the offshore industry and uses an example of a critical defects that demonstrates the need to use the MRT method as a priority to determine the technical condition of wire ropes during their utilization on cranes. The mathematical model [L-10] for the MFL method has been developed in the LRM-NDE Laboratory for more than 40 years. Its current level of sophistication allows the influence of defect and sensor parameters on the course and value of the diagnostic indications obtained to be studied.

Keywords: Wire ropes; MRT; Wire ropes inspections; Cranes.

1. Wstęp

Światowe zapotrzebowanie na coraz większe i wydajniejsze urządzenia dźwignicowe szybko rośnie. W ślad za zapotrzebowaniem rynku, producenci lin konstruuja liny o coraz większych średnicach, zróżnicowanej konstrukcji, a urządzenia dźwignicowe zwiększają swoje udźwigi, wydajność i prędkości operacyjne, jednocześnie obniżając współczynnik bezpieczeństwa. Szczególnie w przemyśle

morski, przy wydobyciu ropy i gazu, urządzenia dźwignicowe opuszczają i podnoszą swobodnie wiszące ciężary o znacznych masach. Do tych operacji mają zastosowanie wielowarstwowe liny o obniżonej odkrętności, a średnice lin stalowych dla tych instalacji mogą dochodzić do 165 mm, w znaczącej większości przypadków o powierzchniowym styku drutów (liny kompaktowane).

Szeroko pojęta metoda MRT (Magnetic Rope Testing) jak i urządzenia do jej implementacji są już znane od dziesięcioleci [15], jednak stosowanie tej metody w przemyśle dźwignicowym (Rys.1.1 i Rys.1.2) można uznać jako

* Autor korespondencyjny.

E-mail: LRM-NDE@LRM-NDE.CO



Rys. 1.1. Inspekcja MRT liny dźwigowej 128mm.
Fig. 1.1. MRT Inspection of Crane Wire rope 128mm



Rys. 1.2. Inspekcja MRT liny wysięgnika w systemie wielokrążkowym, dźwigu 5000T.
Fig. 1.2. MRT Inspection of boom wire rope in multi-fall system, 5000T Crane

początkowy etap, a ogólną standaryzację urządzeń i personelu za nieregulowaną.

Zebrane doświadczenia z ostatnich lat z ponad 1000 przeprowadzonych inspekcji MRT lin stalowych na systemach dźwignicowych pozwoliły na pogłębienie wiedzy na temat zachowania lin stalowych w czasie eksploatacji w warunkach morskich, a dzięki dodatkowym badaniom laboratoryjnym na próbkach lin zebranych po odłożeniu, umożliwiły sprawdzenie metody MRT w wykrywaniu defektów występujących w nowoczesnych konstrukcjach lin stalowych. Podstawy metody MRT zostały opisane w [5],[10],[11],[15], oraz w artykule [6] opublikowanym na 46 Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących w 2017.

2. Warunki pracy lin stalowych na dźwignicach morskich

Należy zwrócić uwagę na morskie środowisko pracy, które można określić jako wysoko korozyjne. W zależności od akwenu na jakim wykonywane są prace, można spotkać diametralnie różne warunki atmosferyczne. Jednak generalnie liny stalowe narażone są na kontakt ze słoną wodą, która penetruje również do wnętrza liny ze względu na ciśnienie panujące na dużych głębokościach dochodzących nawet do 2500m oraz wilgotnym, słonym powietrzem, które często można spotkać w rejonach tropikalnych. Spotyka się też akwenty, gdzie wysycenie H_2S jest duże, co może wpływać na kruchość stali. Starcia mechaniczne drutów, spowodowane pracą liny w kontakcie ze stalowym rowkiem krążka linowego zostały znacząco ograniczone poprzez zastosowanie kompaktowanych konstrukcji lin. W tej konstrukcji powierzchnia drutów warstwy zewnętrznej mającej kontakt z rowkiem krążka linowego jest istotnie większa w porównaniu z linami o drutach okrągłych. Wyżej wymienione aspekty pracy przyspieszają zużycie lin stalowych, jednak głównym czynnikiem decydującym o okresie bezpiecznej eksploatacji liny jest jej trwałość zmęczeniowa, ilość możliwych do osiągnięcia cykli gięcia, aż do powstania nieciągłości materiału, przerwanych drutów w linie stalowej, a co za tym idzie obniżenie parametru ABL (Actual Breaking Load) liny. Powstawanie pęknięć zmęczeniowych drutów oraz ich propagacja w linie stalowej jest skomplikowanym zjawiskiem zależnym od wielu czynników. Kluczowym parametrem dla wystąpienia zmęczeniowych pęknięć drutów jest liczba przegięć danej sekcji liny, który na instalacjach dźwignicowych realizowana jest na krążkach linowych podczas operacji opuszczania/podnoszenia ładunku. Parametr d/D krążka linowego mieści się w zakresie 18-25.

Należy zwrócić szczególną uwagę na zróżnicowanie instalacji dźwignicowych pracujących w przemyśle offshore, gdzie można spotkać wciągarkę wyposażoną jedynie w bęben linowy i jeden krążek kierujący liną stalową do pionu, jak również systemy wielokrążkowe, gdzie liczba przegięć liny dla jednego cyklu pracy może sięgać nawet 24.

Ze względu na wykorzystywanie dźwignic na statkach morskich, systemy olinowania powinny być wyposażony w urządzeni AHC (Active Heave Compensator). Jest to urządzenie umożliwiające kompensację wertykalnego ruchu statku na falach, co za tym idzie względnej zmiany położenia ładunku. Najnowsze systemy pozwalają na pracę przy amplitudzie fal morskich dochodzącej do 6m, co ma istotny wpływ na trwałość zmęczeniową liny. Zwiększa to bardzo znacząco ilość cykli gięcia na stosunkowo niewielkim odcinku pracującej liny, poprzez ruch oscylacyjny na krążkach linowych, dodatkowo podnosząc lokalnie temperaturę w linie nawet do 100°C poprzez występujące siły tarcia. W zależności od wielkości dźwignicy, a co za tym idzie od średnicy liny stalowej i położenia bębna linowego wykonanie urządzenia AHC jest różne. Dla mniejszych średnic do około 80mm jest zazwyczaj realizowane przez oscylacyjny ruch bębna linowego. Dla lin umieszczonych na wciągarkę pod pokładem stosuje się dodatkowe koło



Rys. 3.1. Inspekcja MRT liny wysięgnika w systemie wielokrążkowym, dźwigu 5000T.

Fig. 3.1. MRT Inspection of boom wire rope in multi-fall system, 5000T Crane



Rys. 3.2. Pomiar średnicy.
Fig. 3.2. Diameter readings



Rys. 3.3. Korozja zewnętrzna.
Fig. 3.3. External corrosion



Rys. 3.4. Pęknięte druty.
Fig. 3.4. Broken wires

napinające o ruchu wahadłowym lub liniowym, co przypomina rozwiązaniem maszyny zmęczeniowej (Bending Cycles Machine) stosowane w laboratoriach badawczych.

Pozostałe występujące czynniki wymuszające odłożenie liny z użytkowania, kategoryzowane jako odkształcenia mechaniczne (permanenna zmiana geometrii liny) nie będą przedmiotem artykułu.

Dla statków pracujących w przemyśle Oil & Gas, jak i w przemyśle morskich farm wiatrowych, gdzie dzienny koszt charteru potrafi wynosić kilkaset tysięcy dolarów, kluczowym elementem wyposażenia są liny stalowe. Na statkach przykładą się szczególną uwagę do stanu technicznego lin stalowych, jak i do ich obsługi. Obsługę lin można w zasadzie ograniczyć do ponownego smarowania odpowiednim smarem, jak i kontroli jakości nawijania liny na bęben.

3. Metody określenia stanu technicznego lin stalowych

Określenie stanu technicznego lin stalowych jest zróżnicowane. Szeroko rozpowszechnione, jak i akceptowane określenie ABL poprzez wykonanie niszczącej próby na maszynie zrywającej (Rys. 3.1). Jest to daleko niewystarczające. Zastosowanie kryterium odkładania, gdy ABL jest mniejsze o 20% od MBL jest prawidłowe, jednak należy zwrócić uwagę, że ta niszcząca próba odnosi się zazwyczaj do odcinka liny przy zakończeniu, a nie mówi nic o stanie technicznym

pozostałej części liny. Niesie to ze sobą dwa znaczące ograniczenia takiego podejścia. Pierwsze, niejednokrotnie wymusza odłożenie z eksploatacji pozostałej części dobrej liny o długości kilku tysięcy metrów, co wpływa na poniesione koszty zakupu i wymiany, jak i na aspekty środowiskowe, związane z utylizacją i wytworzeniem nowej liny. Z drugiej strony, należy bardzo poważnie wziąć pod uwagę, że końcowa sekcja liny wcale nie musi być jej najbardziej zdegradowanym odcinkiem, co może prowadzić do pozostawienia liny w eksploatacji, która posiada wady zagrażające bezpiecznemu jej użytkowaniu. Dochodzi też czynnik poprawności wykonania badań niszczących ABL dla lin o dużych średnicach.

Kolejnym sposobem określenia stanu technicznego lin stalowych jest wykonanie badań wizualnych VT. Inspekcja wizualna jest często przeprowadzana na podstawie normy ISO 4309:2017 z zastosowaniem kryteriów odkładania w niej zawartych. Inspektor wykonujący oględziny wizualne ma za zadanie określić ogólny stan powierzchni liny (Rys.3.3), wykryć i policzyć widoczne pęknięte druty (Rys.3.4) na zadanej długości sumowania, zlokalizować i opisać wady kształtu badanej liny, jak również możliwe ogniska korozji. Inspekcja wizualna jest połączona z pomiarem średnicy liny (Rys.3.2), oraz określeniem stanu środka smarnego. Istotnym ograniczeniem zastosowania tylko tej metody do opisu stanu technicznego badanej liny jest to, że widoczne warstwy



Rys. 3.5. Dr. Roman Martyna wykonujący pierwsze na świecie badanie MRT lin kotwiących platformy wiertniczej w 1985r.

Fig. 3.5. World's first MRT of Anchor ropes performed by Dr Roman Martyna in 1985

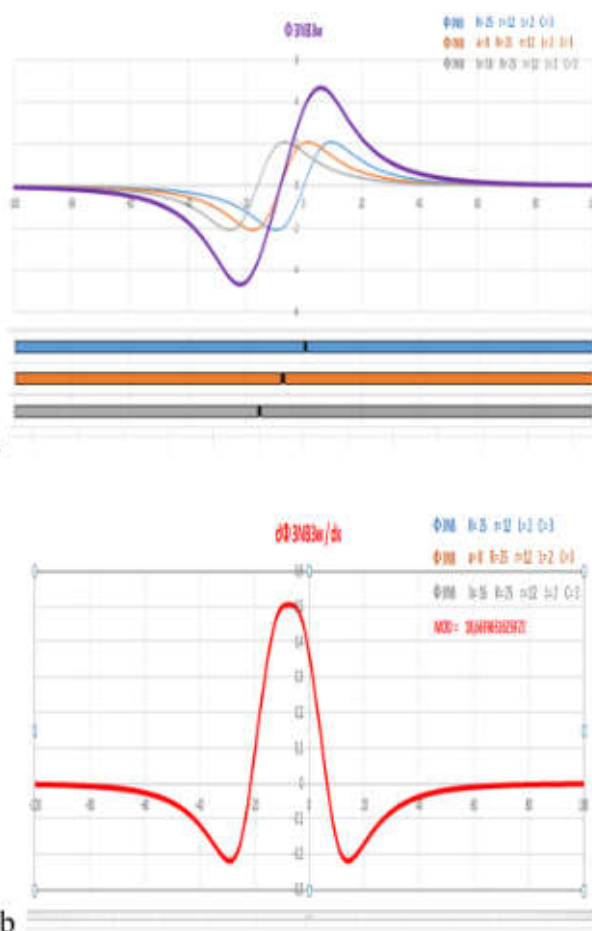


Rys. 3.6. Pierwsza na świecie inspekcja MRT lin pracujących pod wodą.

Fig. 3.6. World's first MRT inspection of ropes working underwater.

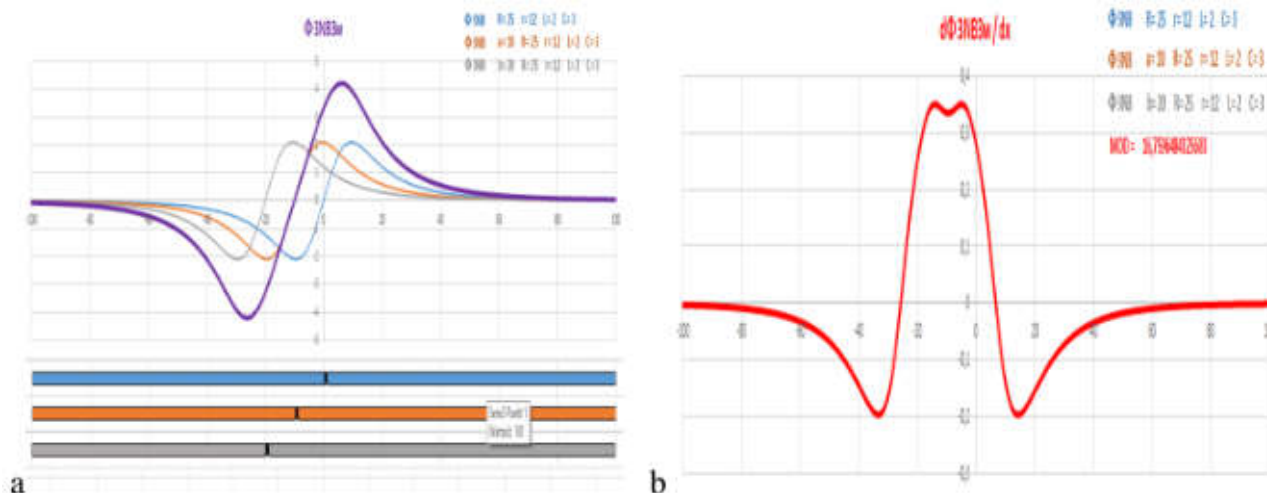
zewewnętrzne drutów w linie mogą stanowić jedynie 20% całego przekroju metalicznego liny. Dodatkowo poprawne przeprowadzenie inspekcji wizualnej jest trudne. Lina w ruchu, trudny dostęp na stanowisku inspekcyjnym, gęsty smar utrudniający pozyskanie dokładnych wyników pomiarów i oględzin, może powodować błędną ocenę stanu technicznego badanej liny. Metoda badań nieniszczących lin stalowych MRT (Magnetic Rope Testing) jest już znana od dziesięcioleci [15], jednak w przemyśle dźwignicowym zaczyna być dopiero wdrażana. Zastosowanie aparatury MRT niesie ze sobą wiele korzyści. Kluczową jest pozyskanie informacji o stanie technicznym liny stalowej w jej całym przekroju metalicznym, nie tylko o defektach nieciągłości, skutków korozji, ale również o zmianach właściwości fizycznych lin. Kolejnym aspektem jest szybkość i cena wykonania inspekcji. Aktualny rozwój urządzeń MRT, wsparcie w ocenie danych, możliwości łatwego porównania kolejnych wyników badań MRT, jak i ich katalogowanie pozwalają zredukować możliwość popełnienia błędu w interpretacji wyników badań. Aplikacja polskiej metody MRT badania lin stalowych obejmuje coraz więcej typów urządzeń linowych, często po raz pierwszy na świecie (Rys.3.5). W dźwigach morskich występują odcinki lin przeginanane na krążkach nie wychodząc nigdy ponad powierzchnię wody, Laboratorium LRM-NDE skonstruowało urządzenie diagnostyczne (Rys.3.6) do badania takich lin. Jak każda metoda NDT, metoda MRT posiada swoje ograniczenia. Nie wynikają one jednak z ograniczeń możliwości aparatury, a ze zjawisk fizycznych rządzących strumieniem magnetycznym MFL rozpraszającym nad uszkodzeniami jako źródłem informacji o stanie degradacji drutów liny.

Model matematyczny [10] dla metody MFL rozwijany jest w Laboratorium LRM od ponad 40 lat. Aktualny poziom jego zaawansowania pozwala badać wpływ parametrów uszkodzeń i czujników na przebieg i wartość uzyskiwanych impulsów diagnostycznych. Przykładowy efekt symulacji wpływu tych parametrów dla najtrudniejszego problemu dla badań magnetycznych lin – zagęszczenia uszkodzeń przedstawiono na Rys.3.7 – 3.9.



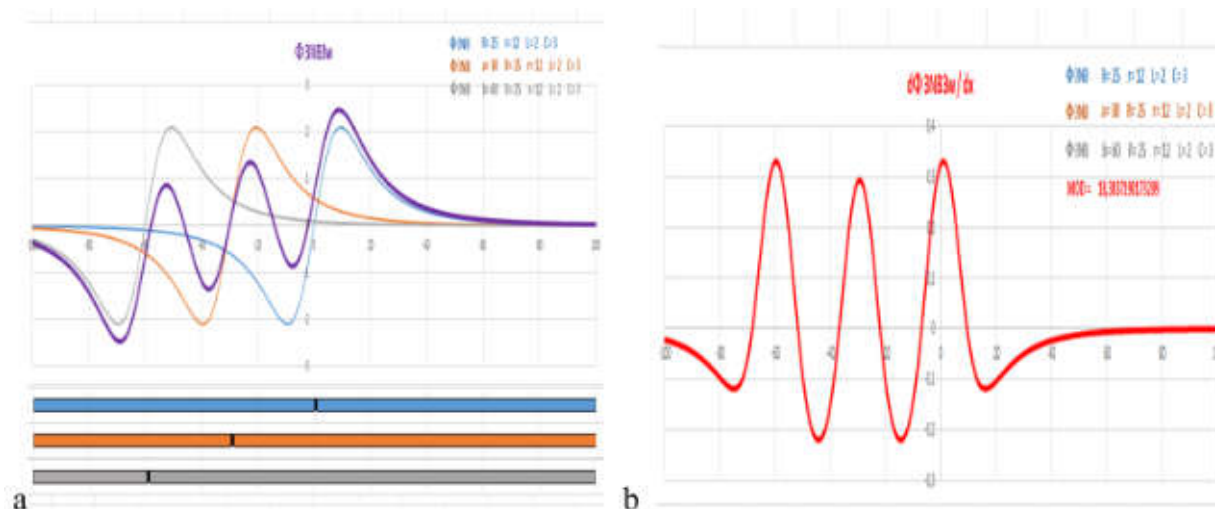
Rys. 3.7. Superpozycja sygnałów MFL od trzech przerwanych drutów zlokalizowanych w odległości $a=8$ i $b=16$ mm od pierwszego. Amplituda sygnału $+0,51$ mV.

Fig. 3.7. WSuperposition of MFL signals from three broken wires located at $a=8$ and $b=16$ mm from the first one. Signal amplitude $+0.51$ mV



Rys. 3.8. Superpozycja sygnałów MFL od trzech przerwanych drutów zlokalizowanych w odległości $a=10$ i $b=20$ mm od pierwszego. Amplituda sygnału $+0,35$ mV.

Fig. 3.8. Superposition of MFL signals from three broken wires located at $a=10$ and $b=20$ mm from the first one. Signal amplitude $+0.35$ mV



Rys. 3.9. Superpozycja sygnałów MFL od trzech przerwanych drutów zlokalizowanych w odległości $a=30$ i $b=60$ mm od pierwszego. Suma amplitud sygnałów $+0,96$ mV.

Fig. 3.9. Superposition of MFL signals from three broken wires located at $a=30$ and $b=60$ mm from the first one. Sum of signal amplitudes $+0.96$ mV

Jak przedstawiono na Rys.3.7 do Rys.3.9 wyniki badań magnetycznych MRT trzech przerwanych drutów na odcinku zagęszczenia są różne i zależą od odległości między uszkodzeniami, mimo że powodują to samo osłabienie liny.

Jednak jak do tej pory nie powstała żadna lepsza metoda badań NDT lin stalowych, która może zostać zaimplementowana w warunkach przemysłowych.

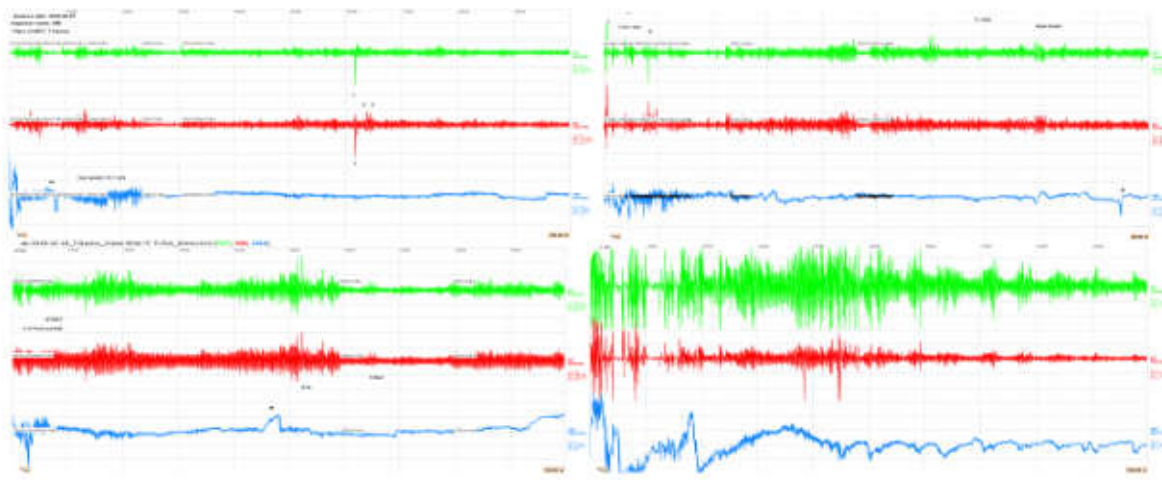
4. Możliwości metody MRT do wykrywania i oszacowania osłabienia liny

Rozpatrując wskazania na wykresach MRT można przyjąć, że różne rodzaje defektów występujących w linach stalowych są reprezentowane przez odmienne wskazania. Wstępnie możemy je podzielić na wskazania pochodzące od Lokalnych Uszkodzeń LF (Local Fault) takich jak przerwane druty lub długich zmian przekroju LMA (Loss of Metallic Area),

przykładowo utraty przekroju metalicznego związanego ze starciami mechanicznymi warstwy zewnętrznej drutów lub korozją.

W rzeczywistości interpretacja wskazań MRT jest bardziej skomplikowana i nie powinna się odnosić jedynie do klasyfikacji typowych wskazań. Przykładowo, wskazania czujników LF pochodzące od poluzowanych spłotów ludożo przypominają te od przerwanych drutów. Również zmiany fizyczne w materiale drutów liny generują wskazania, które mogą być mylnie zinterpretowane. Różne typy degradacji drutów lin występują łącznie i muszą być poprawnie zinterpretowane.

Pomimo zastosowania najwyższych standardów bezpieczeństwa i obsługi lin stalowych w przemyśle Oil & Gas, nie daje to 100% pewności na uniknięcie wypadków. Jako przykład może posłużyć lina, która uległa incydentowi



Rys. 4.1. Wykresy z inspekcji liny 40mm w odstępach co około 6 miesięcy.

Fig. 4.1. Traces from inspection of 40mm wire at intervals of about 6 months



Rys. 4.2. Inspekcja wizualna.

Fig. 4.2. Visual inspection.

w czasie eksploatacji. Sam incydent nie był wynikiem błędnej interpretacji danych z inspekcji czy wyciągniętych wniosków, ale był spowodowany błędami w komunikacji i użyciu dźwigu. Jednak nie mechanizm incydentu jest istotny, a uzyskane dzięki temu dane i konkluzje z tych danych wynikające.

Opisując całe zdarzenie należy zacząć od liny stalowej. Była to lina stalowa o średnicy 40mm, konstrukcji 35(W)xK7-WSC (wielowarstwowa lina nieodkrętna), od uznanego producenta, pozostająca w ciągłej eksploatacji od około 6 lat, zamontowana na statku, na Knuckle-Boom Crane (dźwig wyposażony w hydrauliczny wysięgnik z dodatkowym ramieniem), pracujący w systemie single-fall lub double-fall. Lina ta była poddawana regularnym inspekcjom i obsłudze, zgodnie z procedurą zaimplementowaną na statku. Zgromadzone dane MRT pozwoliły na wyznaczenie krzywej wzrostu zużycia. Poniżej na (Rys.4.1) przedstawiono wykresy MRT dla pierwszych kilkudziesięciu metrów liny z 4 kolejnych inspekcji przeprowadzonych w półrocznych interwałach.



Rys. 4.3. Lina 40mm w miejscu przerwania.

Fig. 4.3. 40mm wire rope in fracture spot.



Rys. 4.4. Sekcja #2 liny po rozpleceniu.

Fig. 4.4. Wire rope sample #2 after disassemble.

Ostatnia z przeprowadzonych inspekcji odbyła się na kilka tygodni przed zaistnieniem incydentu. Jak widać na wykresach MRT przyrost amplitud wskazań jest bardzo, znaczący. Z badań wizualnych VT (Rys. 4.2) również wynikało pogorszenie się stanu technicznego tego odcinka liny, korozja zewnętrzna była widoczna, jednak nie w stopniu budzącym znaczące obawy. Klient nie był przygotowany do natychmiastowej wymiany eksploatowanej liny.

Dzięki bardzo dobrej współpracy z klientem, a także jego chęci do uzyskania wiedzy na temat przyczyn powstania zdarzenia, Laboratorium LRM-NDE udało się uzyskać odcinek liny, wraz z jednym przerwany końcem do dalszych badań laboratoryjnych (Rys. 4.3 i Rys. 4.4).

Tab. 1. Sekcja #2 liny po rozpleceniu.

Tab. 1. Wire rope sample #2 after disassemble.

Type of wire	Diameter [mm]	MCSA [mm ²]	Tensile Strength Total [daN]	Tensile Strength [daN] used	% Ave. Reduction in TS
Core - Central Wire	2,67	5,599	1145	225,5	80,3
Core - External Wire	2,52	4,988	1015	297,35	70,7
Layer 1 - Central Wire	2,41	4,562	945	577,8	38,8
Layer 1 - External Wire	2,27	4,047	787,5	328,4	58,3
Layer 1 - External Wire - Sample from fracture	2,27	4,05	785	369,3	53,0
Layer 2 - Normal Strand Central Wire	2,56	5,15	960	729,3	24,0
Layer 2 - Normal Strand External Wire	2,42	4,6	947,5	513	45,8
Layer 2 - Normal Strand External Wire - Sample from fracture	2,42	4,6	947,5	485	48,8
Layer 2 - Slim Strand External Wire	1,75	2,405	496	243,7	50,8
Layer 3 - Central Wire	2,67	5,6	1145	952,7	16,8
Layer 3 - External Wire	2,52	4,99	985	680,8	30,9
Layer 3 - External Wire - Sample from fracture	2,52	4,99	985	723,6	26,5

Na próbce wykonano inspekcje wizualną wraz z dekompozycją oraz testy aktualnej siły zrywającej dla drutów w poszczególnych warstwach. Powyższe czynności wykonano dla dwóch odcinków Sekcja #1 - dokładnie miejsce przerwania. Sekcja #2- jednometrowy odcinek liny wycięty w odległości 1,5-2,5m od miejsca przerwania liny. Testy wykonane na próbce #1 potwierdziły pierwotne przypuszczenia, że przyczyną zdarzenia był bardzo duży przyrost zmęzeniowych pęknięć drutów również przyspieszony wpływem korozji.

W zewnętrznej warstwie drutów (warstwa #3) liny, druty popękały w odległości około 60cm, z typowymi przełomami zmęzeniowymi. Druty warstw wewnętrznych #1 i #2 popękały praktycznie w jednym miejscu na dystansie około 3-4cm. Siedmiodrutowa splotka rdzeniowa była kompletnie zdegradowana jeszcze przed wystąpieniem rozerwania liny.

Opisując genezę powstania zdarzenia, można stwierdzić, że szybki przyrost pęknięć zmęzeniowych warstwy zewnętrznej liny doprowadził do przekroczenia wytrzymałości pozostałego przekroju liny w stosunku do unoszonego ciężaru, co spowodowało raptowne przerwanie pozostałych drutów w warstwach liny w jednym miejscu.

Dla sekcji #2 oględziny przyniosły zaskakujące wyniki. Należy założyć, że badana lina w przerwanej sekcji, jak i w odcinku oddalonym o 1,5-2,5m od przerwania, lina pracowała w takich samych warunkach, była poddawana takim samym obciążeniom. Jednak ilość przerwanych drutów dla jednometrowej sekcji #2 wyniosła 5, wszystkie w warstwach wewnętrznych, z czego jeden to drut centralny, a 4 pozostałe zostały wykryte w jednej splotce warstwy nr 2.

Korozja również miała kluczowy wpływ na propagację powstawania pęknięć. Wpływ korozji na stan techniczny lin stalowych nie ogranicza się jedynie do ubytku przekroju metalicznego, ale również ma znaczący wpływ na lokalną koncentrację naprężenia w drutach w miejscach powstawania karbów, co obniża ich zdolność zmęzeniową. Z wewnętrznych warstw próbki #2 wyizolowano około 1,1kg produktów korozji z sekcji o długości 1m, głównie w formie metalicznego pyłu poklejonego smarem (badana lina miała masę około 7,87kg na 1m – wartość katalogowa). Z dwóch

badanych próbek liny wycięto po kilka pojedyncze druty z każdej warstwy i podano próbie zrywania, na maszynie zrywającej. Następnie wyniki zebrano i uśredniono z odrzuceniem najbardziej rozbieżnych wartości, co przeważnie odpowiadało przerwaniem drutu w szczęce maszyny. Tabela 1 opisuje zebrane wyniki.

Ostatnia kolumna tabeli wskazuje utratę (redukcję) aktualnej siły zrywającej dla drutów z próbek używanej liny w porównaniu do aktualnej siły zrywającej dla tego egzemplarza liny po procesie produkcji. Porównanie było możliwe dzięki informacjom zawartym w certyfikacie produkcji liny.

Wyniki dla dwóch odcinków lin pokazały, że wytrzymałość pojedynczych drutów w linie jest na podobnym poziomie, co potwierdza tezę o pracy próbek w takich samych warunkach. Co jednak jest najistotniejsze, badania wykazały, że druty o najwyższej aktualnej sile zrywającej (wytrzymałości statycznej) i o najmniejszym obniżeniu jej wartości w stosunku do liny nowej pękły w pierwszej kolejności. Związane jest to z wytrzymałością zmęzeniową materiału. Ze względu na kształt pojedynczych drutów (drut po procesie kompaktowania nie jest już okrągły) jak i dużym poziomem zmęczenia materiału, nie wykonano dokładnych badań wytrzymałości na przeginięcie. Zaobserwowano, że druty warstwy zewnętrznej praktycznie łamały się w rękach, po jednokrotnym przegięciu, a dla wewnętrznych warstw drutów takie zjawisko nie występowało.

5. Podsumowanie

Przykład przedstawiony w artykule jest dowodem na twierdzenie, że zastosowanie jedynie testów określających ABL lub inspekcji wizualnej może być niewystarczające do określenia faktycznego stanu liny. W odległości 1,5m od kompletnego przerwania liny widoczne symptomy zmęzeniowego zużycia były znikome, a odcinek rozpatrywany znajdował się kilkadziesiąt metrów od zakończenia. Błędny jest myślenie, że samo zastosowanie aparatury MRT rozwiązuje wszystkie problemy. Aparaturę MRT należy traktować jako wyposażenie wyszkolonego i doświadczonego inspektora, jednak z założeniem, że powinna ona mieć priorytet w zastosowaniu. Ocena stanu

technicznego lin stalowych powinna być oparty na każdej dostępnej metodzie badawczej i wiedzy na temat użytkowania danej liny w celu poprawnej interpretacji danych, ponieważ równie istotne jest wyznaczenia wartości osłabienia, jak i znalezienie genezy powstania defektów.

6. Literatura

- [1] Martyna M. Czujnik selektywny defektografu magnetycznego. Zgłoszenie Patentowe WIPO ST 10/C PL440721.
- [2] Martyna R. Martyna M.: Czujnik kompaktowy defektografu magnetycznego. Patent PL 223917 B1 Listopad 2016
- [3] Bonetti C., Martyna R., Martyna M. The New Frontier of NDE Using a Combination of MRT, 3D Measurment and Vision System. Rope Present and Future OIPEEC Conference La Rochelle, France 2017 ISBN: 978-0-9552500-4-0
- [4] Błażej R., Domański A., Jurdziak L. Martyna M. Prognozy zmian stanu rdzenia taśm typu ST na podstawie czasu pracy odcinków taśm i długości przenośnika. Mining Science; Fundamental Problems of Conveyor Transport. Wrocław 2014r. ISSN 2353-5423
- [5] Kwaśniewski J. Badania magnetyczne lin stalowych, Wydawnictwo AGH Kraków 2010. ISBN 978-83-7464-348-1.
- [6] Martyna R. Martyna M. Polska technologia badania lin stalowych najpoważniejszych urządzeń linowych na świecie. Badania Nieniszczące i Diagnostyka 4/2017 ISSN 2451-4462; 46 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących Starachowice 2017r.
- [7] Martyna R. Martyna M. LRM-XXI Diagnostic System ready for continuous monitoring high value subsea construction ropes. IMCA Rope Forum Amsterdam 2015.
- [8] Martyna R. Method of Steel Ropes Magnetic Testing Potential, Conditions and Problems, Crane Korea Volume 1 & 2 Seoul 2013
- [9] Martyna R. Wyznaczanie osłabienia lin metodą magnetyczną z zastosowaniem defektoskopu cyfrowego Praca doktorska AGH 1980r.
- [10] Martyna R. A Mathematical Model of the transformation of a Rope Defect into a Magnetic Stray Field, Round Table O.I.P.E.E.C. "How Safe is a Rope?" Cracow, 1981
- [11] Tytko A. Liny stalowe budowa własności eksploatacja zastosowania", PWN 2021
- [12] Martyna R. Method of Steel Ropes Magnetic Testing Potential, Conditions and Problems", Round Table – O.I.P.E.E.C. London 1998r.
- [13] Martyna R. An application of Hall generator sensors for determination of defects in steel ropes, Materials IX KKBN – PAN, SIMP Frombork 1979r,
- [14] Martyna R. Sensor of a Magnetic Defectograph for determination of Long section variations. European Patent No. 86102741.
- [15] Z. Kawecki, J. Stachurski: Defektoskopia magnetyczna lin stalowych. Wyd. Śląsk 1969.
- [16] Martyna R.: Martyna M. System Diagnostyczny LRM® - XXI – postęp w bezpiecznej i niezawodnej diagnostyce lin górniczych. KOMAG Gliwice 2013r.

Mateusz Cybulski, Marek Lipnicki, Krzysztof Mroczek, Rafał Obłąkowski
Koli Sp. z o.o.

Badania ultradźwiękowe Phased Array zaczepów choinkowych stopek łopat stopni L-0 po stronie turbiny i generatora w elektrowni jądrowej w Szwecji

Ultrasonic Phased Array inspection of fir-tree blade roots on L-O stages, both turbine and generator sides in nuclear power plant in Sweden

STRESZCZENIE

W referacie autorzy przedstawiają prace badawczo-rozwojowe zmierzające do opracowania systemu ze skanerem i głowicą wieloelementową, procesu walidacji, procedury badawczej oraz wykonanie badań zaczepów choinkowych, łukowych stopek łopat zamontowanych na wirnikach niskoprężnych (NP) turbiny podczas postoju remontowego w elektrowni jądrowej w Szwecji.

Słowa kluczowe: Badania nieniszczące, Badania ultradźwiękowe, Badania Phased Array, Elektrownia jądrowa, Badania wirników turbin energetycznych.

ABSTRACT

In this paper, authors present research and development (R&D) work done for creating complete testing system including advanced scanner and array probe, validation process, testing procedure and conducting inspection of fir-tree hooks on curved grooves of L-0 blades roots mounted on low pressure (LP) turbine rotors, during overhaul downtime in nuclear powerplant in Sweden

Keywords: Nondestructive testing, Ultrasonic testing, Phased Array testing, Nuclear powerplant, Energetic turbine rotor testing .

1. Wstęp

Energetyka jądrowa jest dosyć młodą gałęzią przemysłu. Powstała dopiero w 1951 r. kiedy to Amerykanie po raz pierwszy wytworzyli parę w reaktorze jądrowym i zastosowali ją do napędu turbiny. Za pierwszą elektrownię jądrową uważa się obiekt otwarty w 1954 r. w Obnińsku w ZSRR, który jako pierwszy wyprodukował energię elektryczną pochodzącą z rozszczepienia jądra atomu. Natomiast za pierwszą komercyjną elektrownię uważa się obiekt w Calder Hall na wyspach brytyjskich. Do końca lat sześćdziesiątych powstało jeszcze na świecie kilkanaście różnych reaktorów określanych mianem Generacji 1. Były to bardzo różne konstrukcje, często prototypowe.

Reaktory drugiej generacji zaczęły powstawać od początku lat siedemdziesiątych i są to konstrukcje w pełni komercyjne, masowo budowane m.in. w USA, ZSRR, Francji czy Wielkiej Brytanii. Wśród nich dominują reaktory wodne ciśnieniowe PWR (lub ich radziecki odpowiednik WWER) oraz wodne wrzące BWR. Reaktory tego typu były budowane do połowy lat dziewięćdziesiątych, kiedy stopniowo rozpoczęto

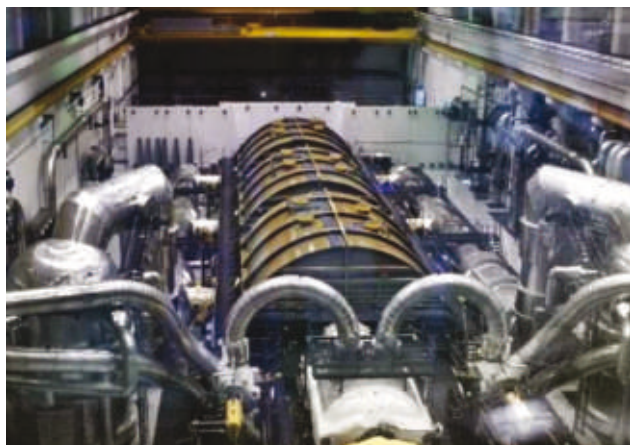


Rys. 1. Elektrownia jądrowa Forsmark z lotu ptaka
– blok energetyczny nr 3 znajduje się w dolnej części zdjęcia.

wdrażanie nowocześniejszych i bezpieczniejszych reaktorów Generacji III/III+ [1].

Elektrownia jądrowa Forsmark w Szwecji, znana na świecie dzięki temu, że jako pierwsza wykryła podwyższone wskaźniki promieniowania związane z katastrofą w elektrowni jądrowej w Czarnobylu. Dostarcza ona na rynek szwedzki ok. 14% energii elektrycznej [2]. Całkowita moc wyjściowa

*Autor korespondencyjny.
E-mail:



Rys. 2. Blok energetyczny nr 3 elektrowni Forsmark – na zdjęciu widoczne są 3 korpusy wirników niskoprężnych, których diagnostykę przeprowadzał zespół Koli Sp. z o.o.

wszystkich bloków wynosi ok. 3270 MW. Budowa trzech bloków energetycznych rozpoczęła się w 1971 r. Całość ukończono i oddano do użytku w 1985 r., natomiast na przestrzeni lat wykonano szereg modernizacji, dzięki którym m.in. zwiększono moc wszystkich bloków energetycznych [3, 4].

Blok energetyczny Forsmark 3, którego dotyczy niniejszy artykuł, napędzany przez reaktor typu BWR, jest najmłodszym i najpotężniejszym z bloków, wytwarzając ok. 1190 MWe [2]. Turbozespół zmodernizowany w 2004 r. składa się z 1 wirnika wysokoprężnego (WP) i 3 wirników niskoprężnych (NP) o łącznej długości ok. 70 m [4].

Badania zostały przeprowadzone na przełomie września i października 2021 r. przez zespół firmy Koli, będący podwykonawcą generalnego wykonawcy remontu GE Power Sweden. Prace diagnostyczne obejmowały badania wizualne, magnetyczno-proszkowe i ultradźwiękowe w technice Phased Array łopatek ostatnich stopni (L-0) trzech wirników

niskoprężnych, pozostających w łożyskach własnych i w niezdemontowanych korpusach wewnętrznych, należących do turbozespołu bloku Forsmark 3.

Niniejszy artykuł obejmuje krótkie omówienie prac badawczo-rozwojowych, procedur, procesu walidacji systemu badawczego oraz przeprowadzenia badań i skupiony jest na części diagnostyki obejmującej technikę Phased Array choinkowych, łukowych stopek łopatek bez ich demontażu.

2. Historia badań łopatek ostatnich stopni wirników NP

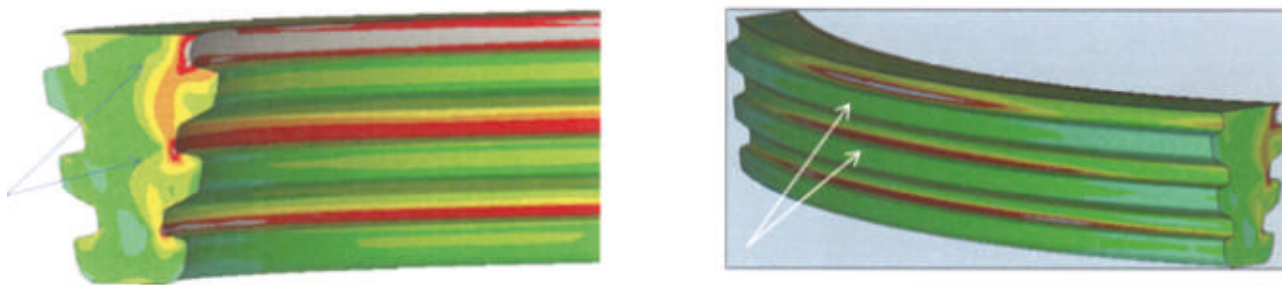
Diagnostyczne badania wrębów wału i łopatek wylotów ND37 i ND41 wirników NP energetycznych turbin parowych realizowane są w Polsce od 2006 roku przez Koli Sp. z o.o. Te pierwsze badania przeprowadzane były głównie dla Alstom Power podczas przeglądów gwarancyjnych i/lub remontowych [5, 6, 7, 8, 9].

Od roku 2012 prace były realizowane w ramach umowy o współpracy pomiędzy Koli Sp. z o.o. i Alstom Power Sp. z o.o. Miały one na celu między innymi opracowanie metodyki i zaawansowanego systemu badań stopni L-0 wirników NP bez demontażu (tzn. badań wizualnych - VT, powierzchniowych badań magnetyczno-proszkowych - MT oraz objętościowych badań ultradźwiękowych głowicami wielo-przetwornikowymi Phased Array (PA) obszarów niedostępnych dla innych badań). W roku 2016/2017 zakwalifikowaliśmy nasz projekt w konkursie na dofinansowanie prac badawczo-rozwojowych z funduszy UE w Agencji Rozwoju Pomorza [10].

Od ponad 11 lat, firma Koli posiada zaawansowane procedury i systemy badawcze, które pozwalają skutecznie, kompleksowo i szybko przeprowadzać badania piór i stopek łopatek ostatnich stopni wirników NP znajdujących się w łożyskach własnych, bez demontażu korpusów turbin. Zespół dysponuje specjalnym, dedykowanym i opracowanym w Koli Sp. z o.o. oprzyrządowaniem do badań VT, MT i PAUT.



Rys. 3 Warunki panujące podczas badania stopek łopatek wirnika NP techniką Phased Array, przeprowadzane przez firmę Koli w zamkniętym układzie przepływowym turbiny



Rys. 4. Analiza naprężeniowa zaczepów stopki łopaty, która posłużyła do stworzenia właściwych próbek odniesienia.

3. Prace badawczo-rozwojowe

Prace badawczo-rozwojowe nad systemem do badania piór i stopek łopat ostatnich stopni wirników NP bloku energetycznego nr 3 w elektrowni Forsmark rozpoczęły się w maju 2021 r. Termin realizacji projektu był bardzo krótki, ponieważ walidacja gotowego systemu, przeprowadzona przez specjalistę z GE Power, miała odbyć się pod koniec sierpnia 2021r.

Jednym z największych utrudnień był niewątpliwie fakt, że wirniki oraz łopaty zdecydowanie różniły się od tych, które zespół Koli badał wcześniej – inne promienie krzywizny stopki i pióra łopat, mniejsza ilość zaczepów choinkowych w stopce, mniejszy odstęp pomiędzy piórami łopat oraz znacznie większe gabaryty i masa (łopata 124kg/sztuka). Wszystkie te czynniki sprawiły, że nie można było w pełni wykorzystać żadnego z już posiadanych skanerów – możliwe było jedynie inspirowanie się wcześniej stworzonymi i opatentowanymi przez nas rozwiązaniami.

Istotnym czynnikiem, który utrudniał, komplikował i wpływał na plan prac zespołu w roku 2021, była pandemia i ograniczona dostępność stali oraz wysoki koszt metali i ich obróbki mechanicznej, zwłaszcza dla produkcji jednostkowej i geometrycznie skomplikowanej.

Wszystkie powyższe czynniki sprawiły, że należało podjąć niekonwencjonalne działania, wykorzystać synergii zespołu, a także przeznaczyć dodatkowe środki na inwestycje, pozwalające znacznie przyspieszyć tempo prac i wykonanie systemu.

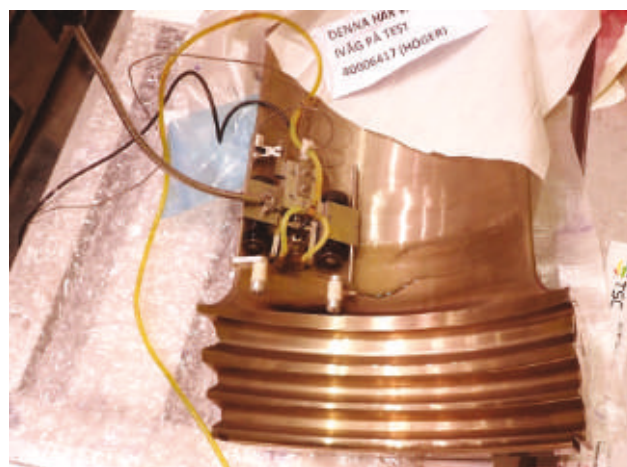
Dzięki temu, że dosyć szybko przysłano do siedziby firmy Koli jedną z zapasowych łopat dla wirników bloku Forsmark 3, zespół zdecydował się na skorzystanie z metody inżynierii odwrotnej, czyli zeskanowanie do modelu 3D części pióra oraz całości stopki łopaty. Dodatkowo zakupione zostało nowe oprogramowanie do modelowania 3D oraz duża drukarka 3D. W ten sposób zyskano możliwość szybkiego stworzenia dedykowanych, dopasowanych prototypów skanerów do badań PA UT.

Kolejnym krokiem była analiza kształtu stopki łopaty, określenie naprężeń związanych z charakterem pracy i geometrią łopaty oraz wyznaczenie miejsc krytycznych, w których najbardziej prawdopodobne jest powstawanie pęknięć zmęczeniowych. Na podstawie obliczeń i wyciągniętych wniosków, eksperci GE Power, w konsultacji z zespołem Koli, zaprojektowali i zlecieli wykonanie specjalnego wzorca imitującego rzeczywistą łopatę wirnika

(stopkę oraz kawałek pióra), wraz z nacięciami ułożonymi pod różnymi kątami i w różnych miejscach po stronie wklęsłej i wypukłej. Tak przygotowane wzorce posłużyły do projektowania skanerów, odpowiedniego dobrania dedykowanych głowic wraz z klinami oraz przeprowadzenia prób badań i walidacji systemu.

Pierwszym etapem tworzenia skanerów było przygotowanie projektu i stworzenie prototypu skanera do badania strony wypukłej (podciśnienia) stopki łopaty. Wykorzystując zdobyte już doświadczenie, zbudowano specjalny wózek z uchwytem dla głowicy i enkodera. Mocowanie głowicy zaprojektowano tak, aby zapewnić jej stały docisk do badanego materiału. W celu pozbycia się błędów odczytu, związanych z nierównomiernym rozproszaniem sprężenia, zastosowano pompę perystaltyczną, podającą środek sprężający w sposób ciągły. Ze względu na bardzo krótki termin realizacji zlecenia, zdecydowano się na zastosowanie ręcznego napędu skanera. Do badań wybrano 28-elementową głowicę o częstotliwości 5MHz oraz klin o kącie 36o ze względu na parametry i wymiary obiektu.

Znacznie trudniejszym zadaniem było przygotowanie skanera do badania części wklęsłej (ciśnienia) stopki łopaty. Wyzwaniem był kształt łopaty w miejscach wprowadzenia wiązki do materiału, który powodował konieczność zastosowania kilku różnych klinów – skanowanie z platformy,



Rys. 5. Skaner wraz z głowicą i enkoderem do przeprowadzania badań wypukłej części stopki łopaty.



Rys. 6. Klin ciągły wraz ze skanerem, głowicą i enkoderem – system zamontowany na łopacie wirnika NP w elektrowni Forsmark.



Rys. 7. Badanie Phased Array przeprowadzane ręcznie z powierzchni bocznej stopki łopaty, w celu wykrycia wad położonych najbliższej części wylotowej (Sonatest Prisma 16:64).

z okolic przejścia pióra w platformę stopki i z pióra łopaty. Po wielu próbach, obliczeniach i modelowaniu 3D, zespół Koli wpadł na pomysł stworzenia tzw. klina ciągłego. Idea polegała na tym, aby powierzchnię dolną klina dopasować do kształtu łopaty w miejscach wprowadzania wiązki, a górną powierzchnię klina ukształtować w 3 płaszczyznach (w 3D) tak, aby zapewnić jak najlepszą wykrywalność w miejscach spodziewanych wad.

Do tak zaprojektowanego klina dopasowano skaner z enkoderem i ręcznym napędem, aby zapewnić stały posuw głowicy po powierzchni klina. Sprzęgacz w formie żelu był наносzony ręcznie pomiędzy klin i powierzchnie łopaty, natomiast sprzężenie pomiędzy głowicą i kształtowym klinem było zapewnione przez pompę perystaltyczną. Do badania części wklęsłej zastosowano po kilku wariantowych próbach, tę samą głowicę co do części wypukłej stopki.

Wady położone w pobliżu końca stopki łopaty, od strony wylotu, zostały przewidziane do ręcznego wykrywania bez

użycia skanera. Zastosowano defektoskop PA z 16-elementową głowicą zintegrowaną o kącie wprowadzenia wiązki do materiału 58° i częstotliwości fali 4MHz ze względu na jej wielkość, aperturę i odpowiednie właściwości fali [11, 12].

4. Walidacja systemu i opracowanie procedury badawczej

Elektrownia jądrowa to zdecydowanie jedno z najbardziej odpowiedzialnych i krytycznych miejsc w jakich można przeprowadzać badania. Zagrożenie związane z promieniowaniem i zanieczyszczeniami promieniotwórczymi dotyczy nie tylko aparatury i personelu badawczego, ale może dotknąć także osoby postronne. W związku z tym cały proces walidacji przeprowadzony przez specjalistę z GE Power obejmował nie tylko system diagnostyczny, ale również personel przeprowadzający badania.

Aby przejść proces walidacji, należało spełnić 35 punktów. Część z tych punktów obejmowała kwalifikacje, certyfikaty personelu i sprzętu oraz doświadczenie i stan zdrowia oraz niekaralność personelu.

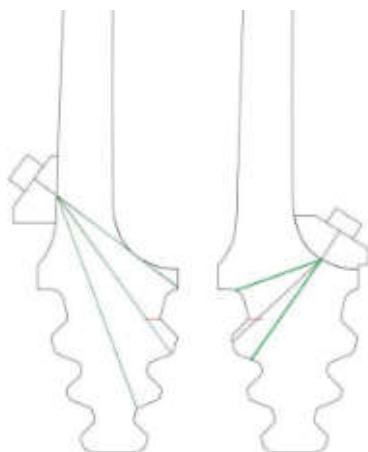
Kolejnym etapem było napisanie procedur i instrukcji badawczych, podlegających zatwierdzeniu przez GE Power i wymagających praktycznej demonstracji gwarantującej, że diagnostyka będzie prawidłowa i rzetelnie przeprowadzona, bez pominięcia któregośkolwiek z istotnych obszarów [11, 12].

Natomiast zdecydowanie najwięcej punktów procesu walidacji obejmowało system badawczy i takie zagadnienia jak:

- jakość wykonania skanerów (łatwy montaż skanerów, ich kształt i sztywność oraz trwałość, pewne zamocowanie głowicy i enkodera, płynny posuw głowicy itd.);
- sposób wykonania skanerów (powtarzalność skanowania i wykrywania wad, łatwość montażu systemów na obiekcie, czas badania jednej łopaty itd.);
- specyfikacja urządzeń (maksymalna możliwa rozdzielczość skanu, ilość dostępnych kanałów phased array, dokładność enkodera, wymiarowanie wskazań itd.);
- parametry ultradźwiękowe (maksymalny dostępny zakres badania i rejestracji, minimalna wielkość wykrywanej wady, stosunek sygnału wady do szumu itd.);
- ośrodek sprzęgający (czy zawiera inhibitory korozji, sposób jego nanoszenia na łopatę, sposób zapewnienia stałej jakości sprzężenia itd.);

Oprócz spełnienia wszystkich punktów tabeli walidacji, kluczową kwestią było przeprowadzenie badań na łopacie walidacyjnej, czyli specjalnej próbce odniesienia imitującej kształt badanej łopaty oraz eksploatacyjne pęknięcia zmęczeniowe w miejscach wyznaczonych doświadczeniem i analizą.

Należało wykryć łącznie co najmniej 80 % wszystkich nacięć, które znajdowały się na zaczepach stopek łopat, zarówno po stronie ciśnienia, jak i podciśnienia. Nacięcia wykonane zostały pod różnymi kątami w osi poziomej oraz pionowej. Autorom artykułu udało się spełnić wszystkie wymagania i wykryć wymaganą ilość zaimplantowanych wad.



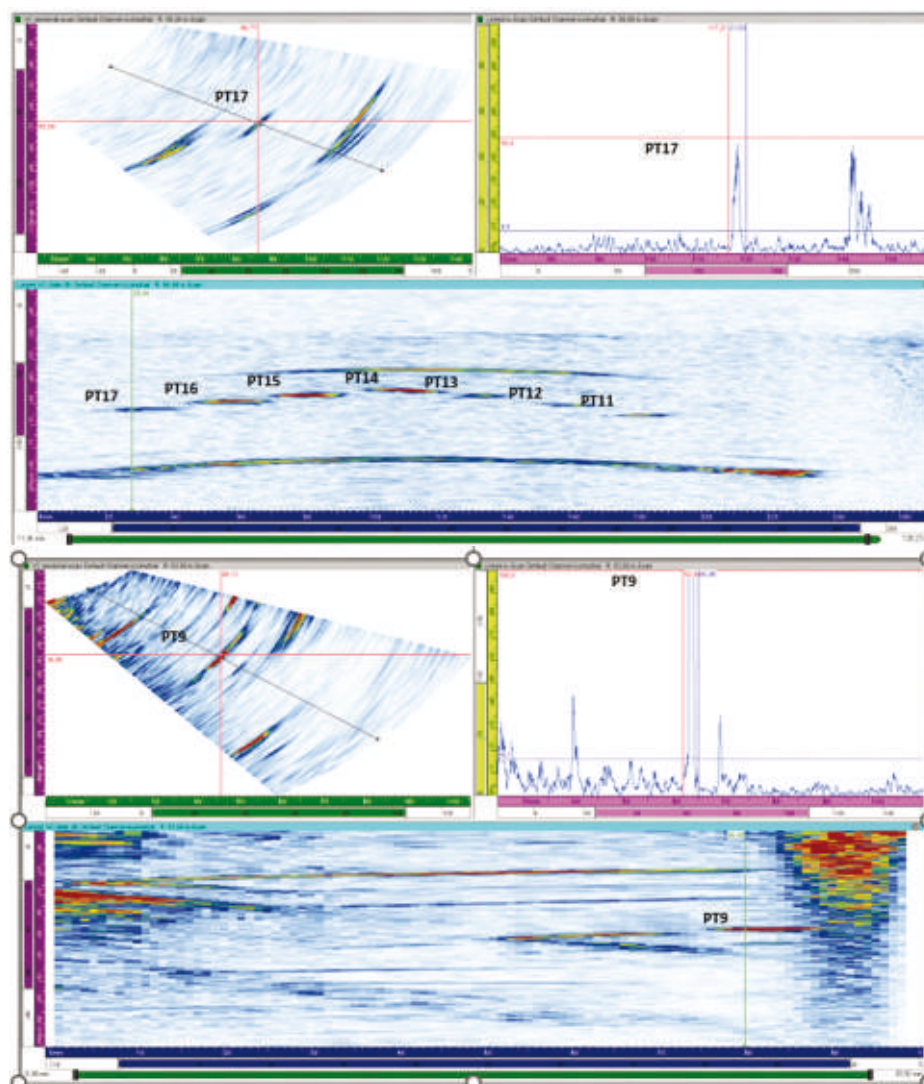
Rys. 8. Obszar pokrycia wiązką ultradźwiękową zaczepów stopki łopaty wraz z zaznaczonym przykładowym pęknięciem (widok z boku) – z lewej strony obszar pokrycia wiązką części wypukłej stopki łopaty; z prawej strony obszar pokrycia wiązką ultradźwiękową części wklęsłej stopki łopaty.

5. Przeprowadzenie badań wirników

Badania wirników rozpoczęły się 17 września 2021r. od szczegółowej diagnostyki wizualnej, następnie magnetyczno-proszkowej, a w ostatnim etapie ultradźwiękowej techniką Phased Array.

Dzięki wielu próbom na próbkach odniesienia, poprawkom i modernizacjom zespołu skanerów wdrażanym na bieżąco podczas prób oraz walidacji wykonanej w laboratorium Koli, badania na obiekcie nie stanowiły problemu. Wszystkie elementy systemu były bardzo dobrze dopasowane do łopat rzeczywistych wirników, a uzyskane skany były powtarzalne i dawały pewność skuteczności badania.

Wszystkie badania Phased Array przeprowadzono między 23 września i 2 października 2021r., z czego kilka dni zostało poświęconych wyłącznie na przegląd i „równoległą” analizę uzyskanych skanów. Dzięki temu personel badający miał całkowitą pewność co do uzyskanych wyników [13].



Rys. 8. Zapisy skanów wykonanych na łopacie walidacyjnej: u góry – skan części wypukłej, wraz z zaznaczonymi wykrytymi nacięciami; na dole – skan części wklęsłej od strony wylotu, wraz z oznaczonym wykrytym nacięciem

6. Podsumowanie

W ciągu około 4 miesięcy od podjęcia rozmów, uzgodnień i zlecenia z GE Power, zespołowi Koli udało się wykonać zaawansowane prace koncepcyjne i badawczo-rozwojowe oraz stworzyć kompletny system do badania zamontowanych stopek łopat ostatnich stopni wirników NP bloku energetycznego nr 3 w elektrowni jądrowej Forsmark w Szwecji.

Kompletna diagnostyka obejmowała przeprowadzenie badań wizualnych i magnetyczno-proszkowych piór oraz dostępnych powierzchni stopek łopat. Jednak to, co było prawdziwym wyzwaniem, to badanie Phased Array objętości stopek łopat w miejscach newralgicznych, poddanych największym obciążeniom, w których zachodzi ryzyko pojawienia się krytycznych pęknięć zmęczeniowych.

Dzięki zdobytym wcześniej doświadczeniom podczas badań stopek niezdemontowanych łopat wirników niskoprężnych dla Alstom Power oraz GE Power, a także dzięki inwestycjom w najnowocześniejsze oprogramowanie oraz sprzęt do modelowania i druku 3D, udało się stworzyć kompletny zestaw skanerów, dobrać odpowiednie głowice i kliny oraz defektoskopy do realizacji rzetelnych i zaawansowanych badań.

Tym, co świadczyło o wysokiej odpowiedzialności badanej konstrukcji, był proces walidacyjny systemu badawczego i personelu NDT, w którym 35 merytorycznych punktów, dotyczących kwalifikacji i doświadczenia personelu badawczego, jakości i sposobu wykonania skanerów, specyfikacji aparatury i wyposażenia, parametrów ultradźwiękowych i jakości sprzęgacza zostało spełnionych przez zespół Koli, co dało autorom artykułu kwalifikacje do przeprowadzenia badań na tak odpowiedzialnym obiekcie.

Diagnostyka, przeprowadzona przez zespół Koli na przełomie września i października 2021r. na łopatach ostatnich stopni 3 wirników niskoprężnych bloku numer 3 w elektrowni jądrowej Forsmark, jest pierwszą tego typu przeprowadzoną przez polską firmę w jakiegokolwiek elektrowni jądrowej. Przeprowadzone prace R&D i badania Phased Array stanowią o niezwykle innowacyjnym i pomysłowym podejściu do diagnostyki ultradźwiękowej oraz o ciągle dużych możliwościach drzemających w tej technice. Szkoda, że w tak niewielkim stopniu wykorzystywane są one do utrzymania dobrego stanu technicznego „niemłodych” już krajowych bloków energetycznych.

7. Literatura

- [1] <https://www2.deloitte.com/pl/pl/pages/energy-and-resources/articles/atom-in-action/elektrownia-jadrowa-rodzaje-reaktorow-dzialanie-i-budowa.html>
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Forsmark_Nuclear_Power_Plant
- [3] <https://group.vattenfall.com/se/var-verksamhet/forsmark/forsmark-nuclear-power-plant/about-forsmark>
- [4] https://group.vattenfall.com/se/siteassets/sverige/forsmark/in-english/about-forsmark/the_history_of_forsmark.pdf
- [5] Koli Sp. z o.o. – opracowania własne, prace badawcze, sprawozdania z badań ultradźwiękowych techniką Phased Array, Polska – Finlandia – Niemcy – Anglia, 2005÷2020
- [6] M. Lipnicki: „Efficient MPI application to increase safety”, Swedish National NDT Conference, Sodertälje, 22÷24.04.2007
- [7] M. Lipnicki: „Zaawansowane badania ultradźwiękowe – geneza, zalety, ograniczenia i kierunki rozwoju techniki Phased Array”, VI Międzynarodowa Konferencja, Łągow-Berlin, 09÷12.06.2010
- [8] M. Lipnicki, K. Mroczek, B. Ostrowski, M. Wójcik: „Zaawansowane badania diagnostyczne wirników turbin energetycznych techniką Phased Array na przykładzie badania kształtowych elementów mocowania łopatek”, Seminarium Badań NDT, IPPT PAN, Zakopane, 03.2011
- [9] M. Lipnicki: “High-Tech NDT diagnostic – UT PA on steam turbine LP rotors”, DEKRA, Stockholm, 11.2015
- [10] M. Lipnicki, K. Mroczek, R. Obłąkowski: „Badania UT PA wrębów wału i stopek łopatek stopni L-0 wirników NP turbin parowych dużej mocy – B+R i walidacja”, KKBN, Kołobrzeg, 2018r.
- [11] M. Lipnicki, K. Mroczek, R. Obłąkowski: Procedury badawcze: “VT of Turbine Blades”, “MPI of Turbine Blades & Blade Roots”, “PA Ultrasonic Inspection of Turbine Blade Roots” – Blades assembled on the rotor; Koli NDT Laboratory, Banino k/Gdańska, 30.07÷01.09.2021
- [12] M. Lipnicki, K. Mroczek, B. Ostrowski, R. Obłąkowski, M. Cybulski, „Validation No. 28/09-2021: PREPARED for GE POWER FORSMARK-3 POWER PLANT OUTLETS of LP TURBINE ROTORS BLADES ROOT INSPECTION”
- [13] M. Lipnicki, K. Mroczek, R. Obłąkowski, M. Cybulski, M. Wójcik: „Raporty z badań VT, MT i PAUT łopat ostatnich stopni wirników niskoprężnych bloku energetycznego nr 3, przeprowadzonych w elektrowni Forsmark 3 w Szwecji”; Banino k/Gdańska, 20.10.2021r.

Bartosz Hyla*, Michał Sobczak, Jakub Roemer
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Badania nieniszczące materiałów kompozytowych metodą termografii laserowej

Non-destructive testing of the composite materials with use of Laser Thermography

STRESZCZENIE

Termografia jest jedną z metod badań nieniszczących, która wykorzystuje termowizję do wnioskowania o stanie technicznym materiału. Termografia laserowa jest rodzajem termografii aktywnej w której źródłem wymuszenia jest promieniowanie laserowe. Metoda ta pozwala na bardzo precyzyjne kontrolowanie ilości energii dostarczanej do próbki. Istotną zaletą w badaniach laserowych jest możliwość wykrywania zarówno delaminacji jak i pęknięć będącymi głównymi rodzajami uszkodzeń strukturach kompozytowych. W pracy przedstawione zostanie stanowisko do badań, którego prototyp jest opracowywany na AGH oraz wyniki skanowania na przykładzie próbki z włókna węglowego w osnowie polimerowej.

Słowa kluczowe: Bbadania nieniszczące, termografia laserowa, kompozyty, delaminacje, pęknięcia, NDT.

ABSTRACT

Thermography is a non-destructive testing method that utilizes infrared camera to infer the technical condition of a material. Laser thermography is a type of active thermography in which laser radiation serves as the excitation source. This method allows for highly precise control of the amount of energy delivered to the sample. An important advantage of laser testing is the capability to detect both delamination and cracks, which are the main types of damage in composite structures. This paper presents a test setup developed at AGH University of Krakow and the results of scanning a sample made of carbon fiber reinforced polymer.

Keywords: NDT; laser thermography; CFRP; delamination; crack;.

1. Wstęp

W obliczu stale rosnących wymagań dotyczących bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji oraz optymalizacji parametrów strukturalnych, które nie pozwalają już tak jak dawniej stosować wysokich współczynników bezpieczeństwa, konieczne staje się prowadzenie regularnych badań nieniszczących lub stosowanie systemów monitorowania stanu technicznego konstrukcji. Badania nieniszczące dostarczają informacji o obecności wad nie wpływając negatywnie na stan techniczny konstrukcji i jej dalsze użytkowanie. Większość metod stosowanych w dzisiejszych czasach posiada już opracowane procedury inspekcji dla konkretnych typów materiałów i konstrukcji. Rozwój nowych materiałów i konstrukcji wymaga jednak rozwoju nowych metod badań nieniszczących pozwalających utrzymać wysoki poziom bezpieczeństwa ich użytkowania.

Jedną z metod badań nieniszczących jest termografia w podczerwieni umożliwiająca badanie znacznych powierzchni konstrukcji, zwłaszcza w przypadku struktur cienkościennych. Metoda bazuje na pozyskiwaniu i analizie informacji termicznej, uzyskanej z bezkontaktowych urządzeń do obrazowania termicznego. Jej dużą zaletą jest fakt, że jest to metoda bezkontaktowa, a uzyskiwane są dane

w postaci obrazów lub sekwencji obrazów co ułatwia ich interpretację przez operatora. Podstawowym podziałem metod termograficznych jest podział na termografię aktywną (TA) oraz na termografię pasywną (TP). W przypadku termografii pasywnej, nie jest używane żadne dodatkowe źródło ciepła, analizowany jest jedynie obraz badanej konstrukcji rejestrowany przez kamerę termowizyjną. Termografia aktywna wykorzystuje natomiast zewnętrzne wymuszenie i analizuje zmiany temperatury na powierzchni badanej konstrukcji w odpowiedzi na nie. Najczęściej stosowane wymuszenie optyczne, może być w wytworzone przy użyciu lamp halogenowych [1], lamp wyładowczych [2] lub przy użyciu lasera [3]. Ze względu na niską cenę źródła światła i stosunkowo prosty system do badań najczęściej używane są lampy halogenowe. Wśród wad tej metody można wyróżnić nierównomierne rozłożenie ciepła na powierzchni badanej próbki oraz dużą bezwładność cieplną źródła. Ograniczenia te pozwala przezwyciężyć zastosowanie wymuszenia laserowego, którego zaletą jest możliwość precyzyjnej kontroli parametrów źródła, w tym kształtu i rozmiaru plamki lasera, czasu trwania impulsu oraz ilości dostarczonej energii. W przypadku punktowej plamki lasera, fala cieplna przybiera sferyczny kształt, co daje możliwość wykrycia pęknięć prostopadłych do powierzchni próbki [4]. Termografia laserowa wydaje się być wyborem szczególnie dobrym dla testowania mniejszych obszarów, gdzie dzięki małej plamce lasera i mniejszemu

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



Rys. 1 Schemat stanowiska badawczego.

Fig. 1 Test stand scheme.

polu widzenia kamery (przy tej samej rozdzielczości kamery) jesteśmy w stanie analizować okolice plamki lasera w lepszej rozdzielczości przestrzennej. Możliwe jest połączenie obrazów (mozaikowanie) z poszczególnych punktów pomiarowych w taki sposób, że obraz wynikowy przypomina wynik klasycznego badania metodą impulsową [5]. Wadą termografii laserowej jest dłuższy czas potrzebny do przeprowadzenia badania, ze względu na mniejszy obszar obserwacji wokół punktu wymuszenia oraz dużą liczbę punktów w siatce pomiarowej. Dodatkowo termografia laserowa wymaga bardziej skomplikowanego systemu pomiarowego, w którym kamera, laser oraz pozycjonery próbki będą odpowiednio zsynchronizowane. Dane z kolejnych zebranych punktów, muszą zostać odpowiednio złączone w całość, aby uzyskać pełen obraz badanej próbki.

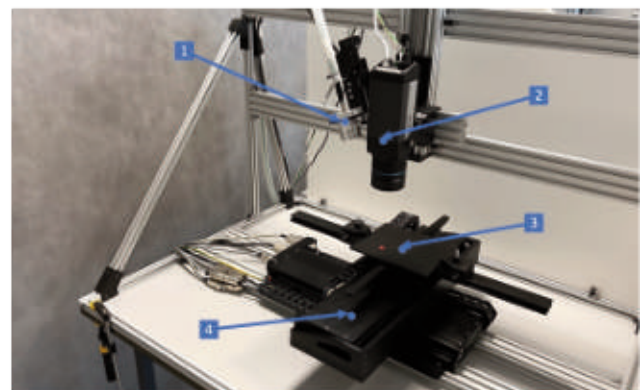
W niniejszej pracy zaprezentowane zostało stanowisko badawcze do badań metodą termografii laserowej będące w stanie dostarczać powtarzalne wyniki wraz z algorytmem przetwarzania danych. Stanowisko rozwijane w ramach prac prowadzonych na AGH w Krakowie [6], [7]. W proponowanym podejściu tworzony jest spójny obraz całej próbki pozwalający na wykrycie obszarów uszkodzonych. Zmozaikowany obraz przedstawia temperaturę próbki w danej chwili czasowej z nałożonymi wektorami reprezentującymi zaburzenia temperatury dla przekrojów plamki lasera.

2. Metodologia

2.1 Opis stanowiska

W celu przeprowadzania badań eksperymentalnych stworzone zostało stanowisko do badań metodą termografii laserowej. Całość systemu oparta jest na sprzęcie firmy National Instruments wraz z oprogramowaniem LABVIEW 2021 uruchomionym na komputerze PXIe-8821 z systemem czasu rzeczywistego oraz na komputerze klasy PC, na którym dostępny jest panel sterowania dla użytkownika. Zastosowanie systemu czasu rzeczywistego pozwala na precyzyjną synchronizację procesów oraz sygnałów sterujących, takich jak sygnał kontrolujący pracę lasera czy rozpoczęcie nagrywania przez kamerę. Dzięki odpowiedniej

synchronizacji otrzymane wyniki są powtarzalne oraz posiadają podobną formę, dzięki czemu algorytmy ich przetwarzania są skuteczniejsze i bardziej dokładne. Część systemu odpowiedzialna za wytworzenie wiązki lasera składa się z kontrolera lasera CS412 Amtron oraz źródła lasera Limo 120-F400-DL808-AV5-A o mocy 120W. Laser generuje wiązkę światła o długości fali 808 nm. Wiązka lasera prowadzona jest światłowodem zakończonym soczewką kolimującą, która tworzy na powierzchni badanej próbki plamkę o średnicy 10 mm. Pomiar pola temperatury następuje przy użyciu kamery FLIR A655SC, która operuje w zakresie fali 7.5–15 μm . Kamera jest w stanie nagrywać z rozdzielczością 640x480 pikseli oraz częstotliwością 50 klatek na sekundę. Pole widzenia kamery na próbce to około 64x48 mm. Komputer PC połączony jest z pozycjonerami, które odpowiedzialne są za odpowiednie ustawienie badanej próbki względem wiązki lasera i kamery. W stanowisku wykorzystane zostały bezpośrednie napędy liniowe Standa 8MTL1401-30 o zakresie roboczym 300mm w kierunku X oraz Y. Schemat systemu przedstawiony jest na Rys. 1. Zdjęcia stanowiska przedstawione są na Rys. 2.



Rys. 1 Stanowisko badawcze termografii laserowej.

1 – soczewka lasera, 2 – kamera termograficzna, 3 – próbka do badań, 4 – pozycjoner XY.

Fig. 2 Laser thermography test stand.

1 – laser optics, 2 – thermal camera, 3 – sample, 4 – XY positioner.

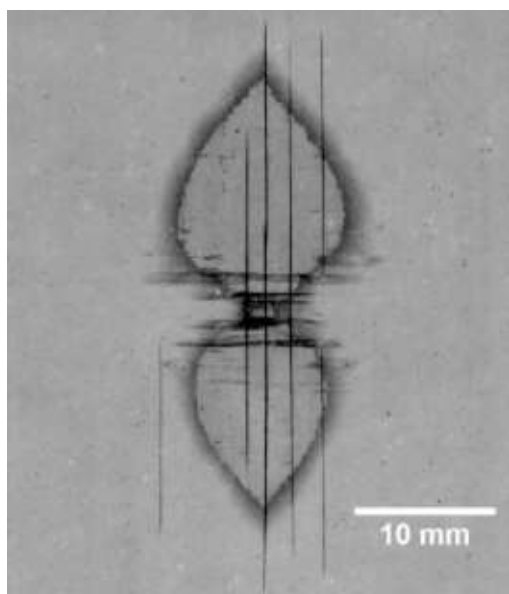
2.2 Próbką

Eksperyment został przeprowadzony na płycie kompozytowej zbrojonej włóknem węglowym i polimerową osłoną o wymiarach 300x150x2mm. Próbką do badań została wykonana z jednokierunkowych warstw prepregu (Seal HS160/REM) w ułożeniu [03/903]_s. Wolna od wad produkcyjnych próbka uległa zniszczeniu w badaniu udarowym z małą prędkością. Uszkodzenie znajduje się w centralnej części próbki. Od spodniej strony widoczne są 2 pęknięcia o długości 27 i 30 mm. Ponadto badania metodą radiografii ukazały delaminacje je oraz kolejne 3 pęknięcia.



Rys. 3. Widok próbki z góry.

Fig. 3. Sample top view



Rys. 4. Wyniki badania radiograficznego próbki.

Fig. 4. Results of radiography investigation

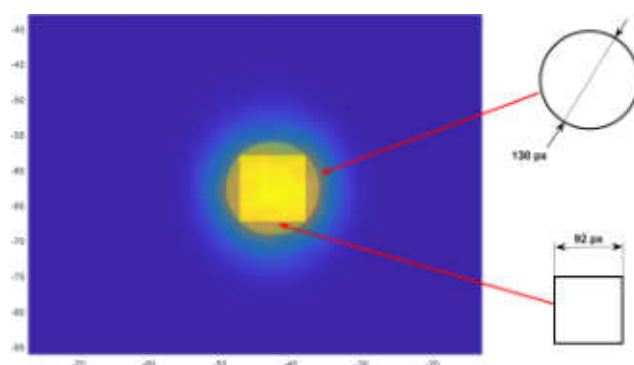
2.3 Procedura badawcza

Punkty pomiarowe rozmieszczono co 5 mm, co dało siatkę składającą się z 20 x 25 punktów. Łącznie zebrano dane z 501 punktów. Aby uniknąć wpływu termicznego sąsiadujących punktów, ścieżka inspekcji nie została ułożona w linii prostej. Pomiary wykonywano co 4 punkty w kierunku X i co 2 punkty w kierunku Y. Zmieniona ścieżka umożliwiła odprowadzenie ciepła z sąsiedztwa poprzedniego punktu pomiaru. Do każdego punktu pomiarowego dostarczono energię 97J, długość impulsu lasera ustawiono na 800ms, a moc na 100W. Kamera rejestrowała sekwencje termograficzne z prędkością 50kl./s. Dla każdego punktu zarejestrowano

460 klatek, co dało 9.2 sekundy uzyskanej sekwencji termograficznej.

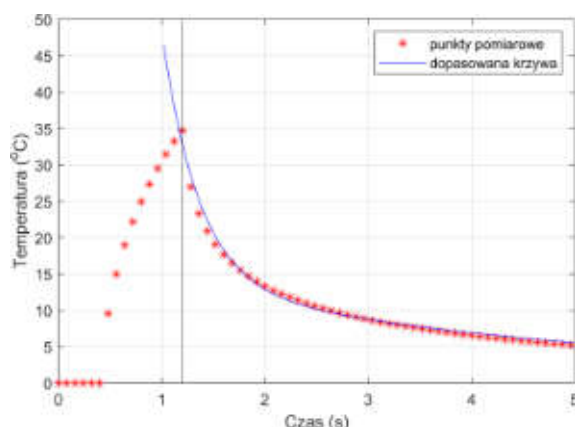
2.4 Przetwarzanie danych

W wyniku uzyskanym w ramach procedury badawczej uzyskano zestaw plików zawierających pojedyncze pomiary. Przetwarzanie tych danych może być podzielone na dwa etapy. Pierwszy etap polega na analizie indywidualnych sekwencji, co umożliwia wydobywanie lokalnych informacji z poszczególnych pomiarów. W drugim etapie informacje pozyskane z pojedynczych plików są agregowane, co umożliwia wnioskowanie na temat całego badanego obszaru. Pierwszy etap rozpoczyna się poprzez wczytanie jedynie pojedynczej sekwencji ze względu na duży rozmiar pojedynczej, nieskompresowanej sekwencji termograficznej. Następnie przeprowadzana jest operacja odejmowania tła, co skutkuje analizą tylko zmiany temperatury w trakcie eksperymentu. Kolejnym etapem jest uzyskanie informacji dotyczącej wymuszenia cieplnego. Poszukiwana jest plamka lasera. W tym celu wykorzystuje się fragment nagranej sekwencji, w którym laser nagrzewa próbkę. W tym okresie kontrast jest największy, a krótki czas wymuszenia powoduje minimalne zniekształcenia kształtu plamki, nawet w przypadku materiałów o wysokiej przewodności cieplnej, takich jak kompozyty. Na podstawie tych informacji można wyznaczyć kilka parametrów: rzeczywiste położenie środka plamki, jej rozmiar oraz stworzyć binarne maski. Rzeczywiste położenie plamki jest obliczane przy każdym pomiarze, aby zapewnić większą dokładność. Położenie plamki może się nieznacznie zmieniać, na przykład wskutek zmian w odległości między układem pomiarowym a powierzchnią próbki, wynikających z niejednorodnej grubości badanego materiału. W trakcie eksperymentu różnica w położeniu środka plamki wynosiła maksymalnie 6 pikseli, co odpowiada 600 μm . Rozmiar plamki jest wyznaczany na podstawie obrazu zbinaryzowanego. Ponadto tworzone są maski, które są obrazami binarnymi mającymi ułatwić identyfikację plamek lasera. Przykład obrazu plamki lasera z nałożonymi półprzezroczystymi maskami przedstawiono na Rys.5.



Rys. 5. Plamka lasera z nałożonymi maskami: okrągłą i kwadratową.

Fig. 5. Laser spot overlaid with circle and square semi-transparent masks



Rys. 6. Dopasowana funkcja eksponentialna do przebiegu temperatury, metodą minimalizacji błędów średniokwadratowego.

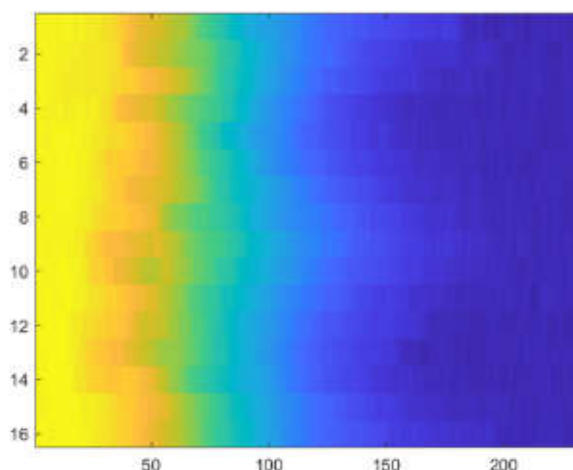
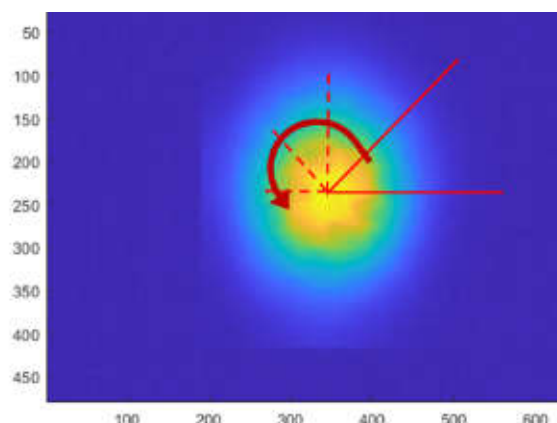
Fig. 6. Exponential function fitted to temperature course with use of least-square method

W następnym etapie analizy danych zastosowano zmodyfikowaną metodę Rekonstrukcji Sygnału Termicznego. W oryginalnej metodzie dla każdego piksela dopasowywane są parametry funkcji, której celem jest oddanie przebiegu temperatury w czasie schładzania po ustaniu wymuszenia cieplnego. W niniejszym przypadku, z zastosowaniem kwadratowej maski, w celu zwiększenia precyzji dopasowania, operacja ta została wykonana poprzez uśrednienie pól o rozmiarze 5x5 pikseli w obrębie prostokątnej maski. Proces dopasowania przeprowadzono względem funkcji o następującej postaci (1):

$$T(t) = A * e^{B*t} + C * e^{D*t} \quad (1)$$

Zastosowanie takiej funkcji jest rozwinięciem rozwiązania równania opisującego temperaturę przejściową dla ciał o skupionej pojemności cieplnej do postaci drugorzędowej. Pozwala na zwiększenie dokładności odwzorowania przebiegu temperatury w czasie chłodzenia. Przykładowe dopasowanie przedstawiono na rysunku 6. Różnice w parametrach dopasowanych krzywych są wystarczające do wskazania punktów o innej pojemności cieplnej, wywołanej np. delaminacją.

W kolejnym etapie wykonywane zostały przekroje temperatury rozchodzące się promieniście ze środka plamki, a następnie zostały przekonwertowane do obrazu we współrzędnych polarnych. Proces ten został schematycznie przedstawiony na rysunku 7. W dalszej kolejności przebiegi zostały wygładzone średnią kroczącą, a ostatecznie policzone zostało odchylenie standardowe dla każdego przebiegu. Wartość tego wskaźnika została potraktowana jako długość wektora. Orientacja wektorów pozostała zgodna z kierunkiem wykonywania przekrojów. Powstały w ten sposób zestaw wektorów został zsumowany geometrycznie, w wyniku czego otrzymano wektor wypadkowy. Powstały w ten sposób wektor wskazuje w kierunku charakteryzującym się największą zmiennością przebiegu sygnału. Po wykonaniu powyższych operacji na wszystkich punktach pomiarowych wykonywana



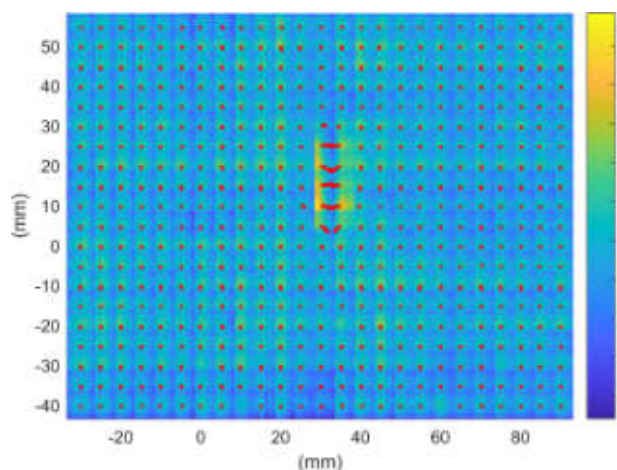
Rys. 7. Konwersja obrazu do współrzędnych polarnych.

Fig. 7. Image conversion to polar coordinates scheme.

jest mozaika danych TSR. W kolejnym kroku wykonywana jest rekonstrukcja przebiegu temperatury w każdym z punktów mozaiki danych.

3. Wyniki

Surowe dane termograficzne dla serii pomiarowej zajmują 140 GB przestrzeni dyskowej. W ramach zastosowanych metod obróbki objętość ta jest zmniejszana do 4 GB w przypadku zachowywania części surowych danych z przekrojów, lub nawet 20 MB, jeśli zachowywane są jedynie wyniki. Czas potrzebny do wykonania pomiarów, na obszarze 12 500 mm², na obecnym etapie rozwoju metody wynosi 5 godzin. Natomiast obróbka uzyskanych danych kolejne 4 godziny, co sumarycznie zajmuje 9 godzin. W wyniku przeprowadzonych operacji otrzymywana jest sekwencja temperatur obejmująca pełen obszar badanej próbki oraz zestaw wektorów, który można umieścić w miejscach odpowiadających środkom punktów pomiarowych. Wyniki otrzymane obiema metodami można na siebie nałożyć jak na rysunku 8. Zostały one przedstawione w rzeczywistym układzie współrzędnych pozycjonera.



Rys. 8. Wynik nałożenia na siebie temperatury i wektorów wypadkowych w chwili czasowej $t = 1.2$ s od wyłączenia wymuszenia laserem.

Fig. 8. Resulting image from reconstructed temperature from TSR method and resultant vector from each measurement point at 1.2 s after switching off the irradiance source.

4. Omówienie wyników

Otrzymane wyniki pozwalają na jednoznaczne określenia miejsca występowania wad. Rozdzielczość pomiaru dla zmodyfikowanej metody TSR zapewniająca zadowalającą ostrość obrazu wynosi $500 \mu\text{m}$, jednak może zostać zwiększona do poziomu rozdzielczości systemu wizyjnego równego $100 \mu\text{m}$ bez konieczności ponownego przeprowadzania pomiarów. Dzięki analizie rozkładu temperatury można zlokalizować delaminację, natomiast analiza wypadkowych wektorów dostarcza informacji o pęknięciach. W testowanej próbce obszar delaminacji pokrywa się z obszarem, na którym występują pęknięcia, stąd widoczne są wektory o większej wartości w okolicy obszarów o wyższej temperaturze. Z użyciem tej metody wykryta została delaminacja o rozmiarach około $10 \times 30 \text{ mm}$ co odpowiada wynikom otrzymanym w radiografii, które zostały przedstawione na rysunku 5. W przypadku metody wektorowej rozdzielczość jest równa odległości między punktami pomiarowymi w tym przypadku równej 5 mm .

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono system umożliwiający wykrycie defektów za pomocą termografii laserowej wraz z procedurą przetwarzania. Stanowisko badawcze składa się z komputera PC, komputera PXIe, kontrolera lasera, kamery na podczerwień i dwóch pozycjonerów liniowych. Zastosowanie systemu czasu rzeczywistego pozwala na precyzyjną synchronizację generowanych sygnałów sterujących. Dzięki zastosowaniu zmodyfikowanej metody Rekonstrukcji Sygnału Termograficznego uzyskano znaczną kompresję

danych. Z danych zebranych dla kolejnych punktów badania tworzona jest mozaika przedstawiająca temperaturę w kolejnych chwilach czasowych. Dzięki analizie wartości temperatury możliwe jest wskazanie obszarów z delaminacją. Na uzyskany obraz temperatury nałożone zostały wektory wypadkowe odpowiadające sumie odchylenia standardowego dla przekrojów temperatury przez plamkę lasera, co pozwala na wykrycie uszkodzeń typu pęknięcie. Doświadczenie przeprowadzone na próbce CFRP dało zadowalające wyniki pozwalające na wskazanie obszarów uszkodzonych. Metoda charakteryzuje się długim czasem akwizycji oraz przetwarzania, pozostawiając szerokie pole do ulepszeń w tym zakresie np. w postaci zastosowania metod przetwarzania równoległego ze względu na niezależność od siebie niektórych etapów obliczeń.

Podziękowania

Badanie sfinansowano przez NCBiR w ramach projektu nr 0001/L-11/2019 „Laser thermography testing for damage detection in composite structures”, a także częściowo z funduszy własnych AGH nr grantu 16.16.130.942/G.D./28.

6. Literatura

- [1] Q. Luo, B. Gao, W. L. Woo, and Y. Yang, “Temporal and spatial deep learning network for infrared thermal defect detection” NDT and E International, vol. 108, no. August, p. 102164, Dec. 2019
- [2] J. Zhou, W. Du, L. Yang, K. Deng, S. Addepalli, and Y. Zhao, “Pattern Recognition of Barely Visible Impact Damage in Carbon Composites using Pulsed Thermography” IEEE Trans Industr Inform, vol. PP, pp. 1–1, 2021
- [3] N. Montinaro, D. Cerniglia, and G. Pitarresi, “Flying Laser Spot Thermography technique for the NDE of Fibre Metal Laminates disbonds” Compos Struct, vol. 171, pp. 63–76, Jul. 2017
- [4] J. Rodríguez-Aseguinolaza, M. Colom, J. González, A. Mendioroz, and A. Salazar, “Quantifying the width and angle of inclined cracks using laser-spot lock-in thermography” NDT and E International, vol. 122, Sep. 2021
- [5] Z. He et al., “Joint Scanning Laser Thermography Defect Detection Method for Carbon Fiber Reinforced Polymer” IEEE Sens J, vol. 20, no. 1, pp. 328–336, Jan. 2020
- [6] B. Hyla, M. Sobczak, P. Synaszk, and J. Roemer, “Laser spot thermography and Pulse thermography – comparison of performance for non-destructive testing of composite structures” Int J Multiphys, vol. 17, no. 1, pp. 91–104, Mar. 2023
- [7] M. Sobczak, A. Machynia, Z. Dworakowski, and J. Roemer, “Experimental Setup for Nondestructive Testing of Composite Structures Using Laser Spot Thermography” Applied Condition Monitoring, vol. 21, pp. 75–84, 2023

Mateusz Napiórkowski¹, Mariusz Szóstak², Krzysztof Schabowicz²

1) Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Szkoła Doktorska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

2) Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Budownictwa Ogólnego, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Nieniszczące, wizualne metody badań wykorzystujące wirtualną rzeczywistość w budownictwie – stan wiedzy

Non-destructive, visual testing methods using virtual reality in construction - state-of-the-art

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono możliwości zastosowania wirtualnej rzeczywistości i innowacyjnych technologii (m.in. zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych, skaningu laserowego) do nieniszczących, wizualnych badań w budownictwie. Zastosowanie wirtualnej rzeczywistości umożliwia przeprowadzenie zdalnej i bezpiecznej inspekcji budowlanej, bez konieczności „fizycznego” wejścia i przebywania na niebezpiecznej konstrukcji lub w obiekcie budowlanym, będącym w złym stanie technicznym. Wizualne badania stanu technicznego, uszkodzeń, można wykonać w wirtualnym świecie, za pomocą gogli VR. Wirtualna rzeczywistość to technologia, która pozwala na stworzenie trójwymiarowego wirtualnego świata, w którym użytkownik ma możliwość swobodnej eksploracji. Środowisko cyfrowe zostaje stworzone w oparciu o dane pozyskane w sposób bezpieczny (zdalny) przy pomocy skanerów laserowych i dronów. Zapewnia to dokładne odwzorowanie obiektu w środowisku cyfrowym oraz zapewnia możliwość wykonania precyzyjnej inspekcji. VR może również stanowić platformę do koordynacji międzybranżowej dla obiektów wymagających planów naprawczych przy braku możliwości wizji lokalnej. W artykule przedstawiono obecny stan wiedzy oraz zaproponowano kolejne kierunki badań.

Słowa kluczowe: wirtualna rzeczywistość, badania nieniszczące, nowe technologie, budownictwo

ABSTRACT

The paper presents the possibilities of using virtual reality and innovative technologies (including the use of drones, laser scanning) for non-destructive, visual inspections in construction. The use of virtual reality makes it possible to carry out a remote and safe construction inspection, without the need to "physically" enter and stay on a precarious structure or in a construction object that is in poor condition. Visual inspections of technical condition, damage, can be performed in a virtual world, using VR goggles. Virtual reality is a technology that allows the creation of a three-dimensional virtual world in which the user is free to explore. The digital environment is created based on data acquired securely (remotely) using laser scanners and drones. This provides an accurate representation of the object in the digital environment and ensures that precise inspections can be performed. VR can also provide a platform for interprofessional coordination for facilities requiring remediation plans in the absence of on-site inspection. The article presents the current state of knowledge and proposes future research directions.

Keywords: virtual reality, nondestructive testing, new technology, construction

1. Wprowadzenie

Obecnie znajdujemy się w okresie czwartej rewolucji przemysłowej (Przemysł 4.0 – digitalizacja). Czwarta rewolucja przemysłowa obejmuje proces transformacji technologicznej i charakteryzuje się wykorzystaniem Internetu (sieci) jako spoiwa do połączenia wszystkich procesów oraz ich uczestników. Dzięki sieci mamy możliwość zdalnego podglądu w czasie rzeczywistym oraz interakcji w procesy produkcyjne, logistyczne oraz decyzje. Przemysł ten opiera się na coraz to silniejszym przenikaniu się cyfrowego i analogowego świata. Pomimo wciąż rozwijającego się przemysłu 4.0, chociażby przez rozwój sieci 5 i 6G, trwają prace nad przemysłem 5.0, w którym to człowiek jest w centrum, a technologia otacza go i dopełnia jego pracę. Przemysł 5.0 zorientowany jest na człowieka, a otaczające go pozostałe dwa filary skierowane są w kierunku

zrównoważonego rozwoju oraz odporności. Zorientowanie na człowieka oznacza umiejscowienie ludzkich potrzeb i interesów w sercu procesu produkcji, które możliwe jest dzięki zastosowaniu nowoczesnych i innowacyjnych technologii, między innymi wirtualnej rzeczywistości. Wirtualna rzeczywistość otwiera przed nami nowe możliwości, których do tej pory nie znaliśmy.

Wirtualna rzeczywistość jest jedną z innowacyjnych technologii, dzięki której praca człowieka może zostać dopełniona. Człowiek jest kluczową postacią procesu produkcji, tzn. posiada wiedzę oraz umiejętności zrozumienia problemów a technologia, jako jego dopełnienie, pozwala mu na szybsze, łatwiejsze oraz bezpieczniejsze wykonanie zadania. W artykule przedstawiono aktualny stan wiedzy na temat nieniszczących, wizualnych metod badań wykorzystujących wirtualną rzeczywistość w budownictwie oraz zaproponowano możliwości zastosowania wirtualnej rzeczywistości (ang. virtual reality) jako element poprawiający bezpieczeństwo pracy, podczas wizualnych

* Autor korespondencyjny.

E-mail: mariusz.szostak@pwr.edu.pl

badan obiektów budowlanych będących w złym stanie technicznym, uniemożliwiającym fizyczne wejście do obiektu.

2. Wirtualna rzeczywistość w badaniach naukowych

Wirtualna rzeczywistość jeszcze do niedawna kojarzona była głównie ze światem rozrywki, w szczególności z grami komputerowymi. Świat gier komputerowych pozwalał graczowi na niemal fizyczne doświadczenie innej rzeczywistości – wirtualnej.

Wirtualna rzeczywistość to komputerowo skonstruowane trójwymiarowe środowisko, które pozwala użytkownikowi na poruszanie się i interakcję, której wynikiem jest stymulacja trzech z pięciu zmysłów człowieka - najczęściej wzroku, słuchu oraz dotyku [1]. Wirtualna rzeczywistość jest jedną ze składowych kontinuum rzeczywistości, które rozciąga się od świata rzeczywistego, przez rozszerzoną rzeczywistość oraz rozszerzoną wirtualność, do wirtualnej rzeczywistości.[2]

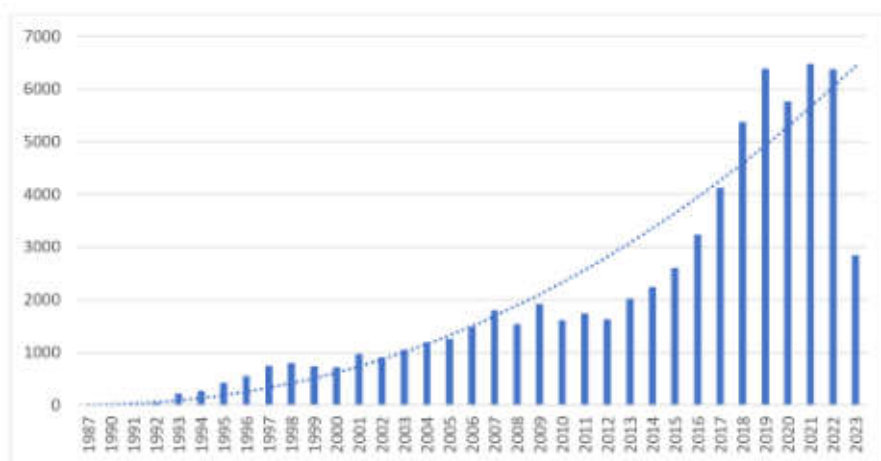
Stosowanie wirtualnej rzeczywistości staje się coraz powszechniejsze. Jest ona obecna w różnych branżach m. in. w architekturze [3], medycynie [4], a także branży rozrywkowej [5]. Zauważalne jest również duże

zainteresowanie wykorzystaniem tej technologii w budownictwie. Zastosowanie w badaniach naukowych wirtualnej rzeczywistości występuje już od 35 lat. Pierwszy artykuł na ten temat został opublikowany w „The Sciences” już w 1987 roku [6]. Z kolei pierwsze praktyczne wykorzystanie wirtualnej rzeczywistości przedstawiono w pracy [7] z 1998 roku, dzięki opracowaniu aplikacji Lightning VR [7].

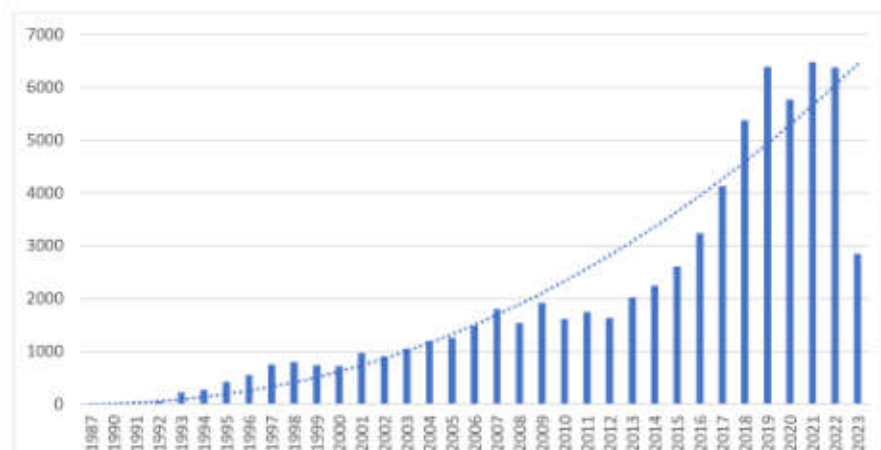
Na rys. 1 przedstawiono dynamikę wzrostu zainteresowania przez badaczy technologią wirtualnej rzeczywistości w badaniach naukowych w ostatnich 35 latach. Dane do opracowania wykresu zostały pozyskane za pomocą wyszukiwarki artykułów naukowych bazy danych Web of Science dla słowa kluczowego: virtual reality.

Z rys. 1 wynika, że w ostatnich latach liczba publikacji poświęconych temu zagadnieniu gwałtownie wzrasta. Widoczny wzrost nastąpił od 2012 roku, a tendencja wzrostowa utrzymuje się na wysokim poziomie.

Z kolei w budownictwie wirtualna rzeczywistość jest obecna od 1993 roku i pierwszego artykułu, dotyczącego teorii percepcji oraz systemów obrazowania [8]. rys. 2 przedstawiono liczbę artykułów dla słów kluczowych: virtual reality oraz civil engineering indeksowanych w bazie danych Web of Science.



Rys. 1. Wirtualna rzeczywistość w pracach indeksowanych w bazie danych Web of Science dla słowa kluczowego: virtual reality.



Rys. 2. Wirtualna rzeczywistość w pracach indeksowanych w bazie danych Web of Science dla słów kluczowych: virtual reality i civil engineering

Jak można zauważyć, zainteresowanie w branży budowlanej pokrywa się z przedstawionym na rys. 1 i do dnia dzisiejszego utrzymuje tendencję wzrostową. W 2017 roku odnotowano znaczny wzrost liczby publikacji o 107%, w stosunku do roku poprzedniego. Ponowny wzrost liczby publikacji zbiega się z pojawieniem się wizji piątej rewolucji przemysłowej (2021) i stale rośnie.

3. Wirtualna rzeczywistość w badaniach nieniszczących

Zgodnie z artykułem [9] różnica między metodami półniszczącymi i nieniszczącymi polega na tym, że w przypadku metod półniszczących materiał jest zwykle lokalnie i powierzchownie uszkodzany podczas badania. Takie uszkodzenia nie występują z kolei w przypadku metod nieniszczących. Jest to jeden z powodów, dla których są one odpowiednie do stosowania podczas badania dużych powierzchni do znacznej głębokości oraz w budownictwie ogólnym. Co więcej, w przypadku badań nieniszczących, pomiary mogą być powtarzane, dzięki czemu wyniki testów mogą być weryfikowane, zatwierdzane i walidowane.

Wirtualna rzeczywistość może stanowić nową podstawę dla badań nieniszczących lub ich dopełnienie. Mimo dużego zainteresowania zastosowaniem wirtualnej rzeczywistości to technologia ta, w aspekcie badań nieniszczących, jest rzadko spotykana. Analiza publikowanych prac indeksowanych w bazie danych Web of Science wykazała, że dla słów kluczowych: virtual reality oraz non-destructive otrzymano 33 prace.

Pierwsza praca [10] pojawiła się już w 1999 roku, w której autorzy zastanawiali się, jaką rolę, w rozwoju badań nieniszczących, będzie pełniło modelowanie elementu i symulowanie jego pracy w środowisku wirtualnym. Autorzy dostrzegli korzyści z możliwości uzyskania informacji zwrotnej w czasie rzeczywistym, bez konieczności wytworzenia rzeczywistego elementu [10].

W niniejszej pracy omówiono prace, w których wirtualna rzeczywistość została wykorzystana, jako pomocnicza lub podstawowa metoda badań nieniszczących. Artykuły [11-12] pomimo, że dotyczą branży lotniczej z powodzeniem mogą zostać zaaplikowane w branży budowlanej.

W pracy [11] przedstawiono wykorzystanie wirtualnej oraz rozszerzonej rzeczywistości do wykonywania badań ultradźwiękowych. Zaproponowana przez autorów metoda zakłada, że dane z badań ultradźwiękowych (UT) są powiązane z ich współrzędnymi przestrzennymi i wektorem kierunku do badanej próbki. Odpowiednio przetworzone wyniki badań nieniszczących (NDT) mogą być wizualizowane bezpośrednio na próbce w czasie rzeczywistym przy użyciu rzeczywistości rozszerzonej lub wirtualnej. Aby umożliwić połączenie danych NDT z obiektem fizycznym, wykorzystywany jest system śledzenia 3D. Proces badania składa się z rejestracji, przetwarzania i wizualizacji danych. Wszystkie trzy kroki są wykonywane w czasie rzeczywistym. Dane są rejestrowane przez interfejs UT-USB, przetwarzane na stacji roboczej PC i wyświetlane za pomocą systemu rzeczywistości mieszanej (MR). System umożliwia wizualizację 3D ultradźwiękowych danych NDT w czasie

rzeczywistym, które są bezpośrednio wyświetlane w wirtualnej reprezentacji. Dzięki prowadzeniu badań z wykorzystaniem rozszerzonej i wirtualnej rzeczywistości pojawia się możliwość wspomagania operatora podczas ręcznego procesu badania. Zaproponowane przez autorów nowe podejście skutkuje znacznie bardziej intuicyjnym procesem testowania i opracowaniem zestawu danych przygotowanych do zapisu w środowisku cyfrowego bliźniaka.

Z kolei w artykule [12] udowodniono, że stosowanie obrazów 2D jest niewystarczające do zilustrowania i wyjaśniania wyników testów badań nieniszczących. Autorzy wskazali konieczność opracowania bardziej odpowiednich narzędzi i metod wizualizacji 3D, w celu poprawy zrozumienia i interpretacji danych NDT. Autorzy opracowali interfejs rzeczywistości rozszerzonej umożliwiający wizualizację wyników z badań nieniszczących bezpośrednio na badanym elemencie/konstrukcji. W ten sposób operator może łatwiej i szybciej zidentyfikować obszary wymagające dalszego badania. Według autorów ten tryb wizualizacji jest bardziej intuicyjny niż analiza danych liczbowych, oszczędza czas i zmniejsza złożoność zadania inspekcji.

W artykule [13] zaproponowano metodę inspekcji mostów, która przenosi konstrukcje mostów do środowiska cyfrowego, umożliwiając ich późniejszą weryfikację w rzeczywistości wirtualnej (VR). Według autorów nowe podejście zapowiada się, jako wysoce efektywne pod względem interpretacji wyników, dostępu do kluczowych obszarów oraz zapewnienia bezpieczeństwa inspektorom. Praca stanowi istotny krok w kierunku opracowania cyfrowych bliźniaków elementów infrastruktury w środowisku miejskim. Do głównych zalet tej metody uznano: możliwość dokonania inspekcji z dowolnego miejsca na świecie (można to porównać do konsultacji medycznej z lekarzami z całego świata), możliwość inspekcji elementów bez konieczności używania dźwigów lub podnośników oraz zwiększenie bezpieczeństwa dla osób dokonujących kontroli.

4. Propozycja zastosowania wirtualnej rzeczywistości w badaniach naukowych

Zdaniem autorów, głównym efektem zastosowania wirtualnej rzeczywistości może być poprawa bezpieczeństwa osób pracujących przy wykonywaniu inspekcji. Spodziewanymi dodatkowymi rezultatami jest zwiększona dokładność kontroli oraz ich wnikliwość, rozumiana jako możliwość dotarcia do miejsc wcześniej trudno- lub niedostępnych.

Podstawę zastosowania wirtualnej rzeczywistości w planowanych badaniach stanowić będzie chmura punktów, czyli model reprezentujący rzeczywisty obiekt wraz z jego cechami np. kolorem. [14]. Chmura punktów jest to zbiór punktów, w którym każdy punkt posiada przypisaną współrzędną (X, Y, Z) oraz barwę (RGB) [15]. Chmury punktów mogą być pozyskiwane przy pomocy czujników np. skanerów LiDAR, zestawu kamer lub jednej kamery poruszającej się wokół obiektu. Obecnie rozwiązanie to jest coraz bardziej popularne ze względu na łatwość i szybkość pozyskania danych. W badaniach pozyskanie chmury

punktów będzie realizowane na dwa sposoby, za pomocą bezzałogowego statku powietrznego (elementy zewnętrzne), za pomocą autonomicznego robota z mobilnym skanerem laserowym (MLS) (elementy wewnątrz analizowanego obiektu).

Bezzałogowe statki powietrzne, potocznie zwane dronami, znajdują coraz szersze zastosowanie. Są one dostępne i powszechnie wykorzystywane w różnych sektorach gospodarki, takich jak produkcja filmowa, monitorowanie bezpieczeństwa [16], czy przemysł budowlany [17]. W budownictwie drony służą między innymi do pomiarów terenowych za pomocą fotogrametrii [18], bieżącej kontroli postępu prac [19] oraz inspekcji obiektów, np. takich jak mosty [20]. W przypadku dronów, kluczową rolę odgrywa ich wyposażenie, takie jak kamery i sensory laserowe. To właśnie dzięki nim możliwe jest przeprowadzanie nalotów oraz skanowanie całych struktur, w celu pozyskania chmur punktów pomiarowych. Sam dron, jako statek powietrzny byłby niewystarczający, gdyby nie został wyposażony w tak zaawansowane technologie. W badaniach dron zostanie wykorzystany do pozyskania chmury punktów elewacji oraz dachu (elementów zewnętrznych) obiektu budowlanego, która będzie stanowić jedną ze składowych modelu, w którym będzie możliwa inspekcja wizualna.

Elementy wnętrza zostaną poddane skanowaniu za pomocą metody dynamicznej [21]. W celu zapewnienia maksymalnego bezpieczeństwa, skanowanie będzie realizowane przy użyciu dwóch urządzeń: skanera mobilnego oraz autonomicznego robota, np. Spot z firmy Boston Dynamics, na którym umieszczony zostanie skaner. Możliwość wykorzystania autonomicznego robota zostało opisane w artykule [22]. Taki zestaw zostanie wprowadzony do obiektu w celu przeprowadzenia kompleksowej eksploracji, mającej na celu osiągnięcie pełnego zeskanowanie obiektu.

Po przeprowadzeniu procesu skanowania pozyskane dane zostaną poddane obróbce, modelowaniu i zostaną przeniesione, za pomocą odpowiedniego oprogramowania, do wirtualnej rzeczywistości. Za pomocą gogli VR oraz dzięki kontrolerom wirtualnej rzeczywistości osoba wykonująca inspekcję zostanie „przeniesiona” do wirtualnej rzeczywistości. W wirtualnym środowisku możliwa będzie ocena stanu technicznego obiektu, nanoszenie uwag i komentarzy. Proponowany sposób prowadzenia inspekcji, poza poprawą bezpieczeństwa, ułatwi proces komunikacji przy identyfikacji miejsc wymagających naprawy.

Zaproponowana metoda będzie miała na celu weryfikację wizualną, na podstawie której będzie można określić m.in. skalę zagrożenia, miejsca wymagające napraw, a także pozwoli stwierdzić czy obiekt może być dłużej użytkowany.

Jak przedstawiono w artykule, na podstawie aktualnego stanu wiedzy, możliwe jest zastosowanie wirtualnej rzeczywistości do wizualizacji wyników badań, jako narzędzie towarzyszące podstawowym badaniom nieniszczącym. Analiza aktualnych trendów, przedstawiona w pracy [23], związanych z rozwojem wirtualnej rzeczywistości wskazuje, że pod względem liczby publikacji sytuacja powinna zacząć się stabilizować. Mimo, że pojawiają się nowe propozycje metod oraz prace zajmujące się tą

technologią, to istotnym problemem jest brak ich praktycznego wykorzystania.

Zdaniem autorów niezbędne jest przeprowadzenie projektów pilotażowych, w których możliwe będzie zweryfikowanie i praktyczne zastosowanie tej technologii. W dzisiejszych czasach sama technologia wirtualnej rzeczywistości nie stanowi przeszkody i wydaje się być wystarczająca do wykonania proponowanego planu badań.

5. Podsumowanie

Wirtualna rzeczywistość zyskuje dużą popularność, co widać po tendencji wzrostowej prowadzonych badań i publikowanych prac z nią związanych. Zainteresowanie jej zastosowaniem w budownictwie również rośnie, co jest dobrym prognostykiem na przyszłość. Również nowe technologie, takie jak bezzałogowe statki powietrzne, skanery laserowe, roboty autonomiczne, zaproponowane do zastosowania w planowanych badaniach, są już obecne w budownictwie i ich zastosowanie również jest coraz częstsze. Łącząc wszystkie te technologie podjęta zostanie próba podążania w planowanych badaniach za nowymi trendami związanymi z Przemysłem 5.0.

6. Bibliografia

- [1] Guttentag D.A. "Virtual Reality: Applications and Implications for Tourism", *Tourism Management*, No. 31(5), 637-651, 2010
- [2] Milgram P. Kishino F. "A Taxonomy of Mixed Reality", *Transactions on Information Systems*, Vol. E77-D no.12, 1994
- [3] Zhou W. Whyte J. Sacks R. "Construction safety and digital design: A review", *Automation in Construction*, 22, 102-111, 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2011.07.005>.
- [4] Cannon W.D. Garrett Jr. W.E. Hunter R.E. Sweeney H.J. Eckhoff D.G. Nicandri G.T., Hill J.A. "Improving residency training in arthroscopic knee surgery with use of a virtual-reality simulator: a randomized blinded study", *The Journal of Bone and Joint Surgery* 96 (21), 1798 - 1806, 2014 <http://dx.doi.org/10.2106/JBJS.N.00058>.
- [5] Dickinson J.K. Woodard P. Canas R. Ahamed S. Lockston D. "Game-based trench safety education: development and lessons learned", *Journal of Information Technology in Construction*, vol. 16 , 119-134, 2011, <http://www.itcon.org/2011/8>.
- [6] Wright, R. „Virtual Reality” *The Sciences*, 27(6), 8-10, 1987, DOI:10.1002/j.2326-1951.1987.tb02976.x
- [7] Blach R. Landauer J. Rosch A. Simon A. "A highly flexible virtual reality system", *Future Generation Computer Systems*, 14, 167-178, 1998
- [8] Smets GJF. Overbeeke CJ. Stappers PJ. „Perception theory and imaging systems", *Advanced Technologies*, 405-410, 1993.
- [9] Schabowicz K. „Non-Destructive Testing of Materials in Civil Engineering", *Materials*, 12, 2019, doi:10.3390/ma12193237
- [10] Generazio E.R. Harris C.E. "The role of modelling and simulation in the development of advanced non-destructive evaluation systems", *The Aeronautical Journal*, czerwiec 1999, 325-328.
- [11] Rehbein J. Lorenz S. J. Holtmannspötter J. Valeske B. „3D-Visualization of Ultrasonic NDT Data Using Mixed Reality", *Journal of Nondestructive Evaluation* 41:26, 2022, DOI:

- 10.1007/s10921-022-00860-7.
- [12] Ababsa F. „Augmented Reality Application in Manufacturing Industry: Maintenance and Non-destructive Testing (NDT) Use Cases”, 7th International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics, 2020, Lecce, Italy. pp.333-344.
- [13] Omer M. Margetts L. Mosleh M. Hewitt S. Parwaiz M. “ Use of gaming technology to bring bridge inspection to the office” , Structure and Infrastructure Engineering, 15:10, 1292-1307, DOI: 10.1080/15732479.2019.1615962
- [14] Oliveira Rente P. Brites C. Ascenso J. Pereira F. “Graph-based Static 3D Point Clouds Geometry Coding”, IEEE Transactions on Multimedia, vol. 21, no. 2, pp. 284-299, Feb. 2019, DOI 10.1109/TMM.2018.2859591
- [15] Nowobilski T. Szóstak M. “Kontrola stanu technicznego rusztowań budowlanych z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych”, Przegląd Komunikacyjny, 23-25, 2-3/2022.
- [16] T. Addabbo et al., "An Automatic Battery Recharge and Condition Monitoring System for Autonomous Drones," 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT, Roma, Italy, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138314.
- [17] Nowobilski T. Szóstak M. „Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych w budownictwie”, Przegląd Komunikacyjny, 26-31, 2-3/2022.
- [18] Lee J. Jo H. Oh J. “Application of Drone LiDAR Survey for Evaluation of a Long-Term Consolidation Settlement of Large Land Reclamation”, Appl. Sci. 2023, 13, 8277, <https://doi.org/10.3390/app13148277>
- [19] Lee S. Song M. Kim S. Won J. “Change Monitoring at Expressway Infrastructure Construction Sites Using Drone”, Sensors and Materials, Vol. 32, No. 11, 3923–3933, 2020.
- [20] Nowobilski T. „Bezzałogowe statki powietrzne w kontroli obiektów budowlanych” Builder 02 (271), 18-20, 2020. DOI: 10.5604/01.3001.0013.7500
- [21] Liu Z. Oosterom P. Balado J. Swart A. Beers B. “Data frame aware optimized Octomap-based dynamic object detection and removal in Mobile Laser Scanning data”, Alexandria Engineering Journal, 327-344, Volume 74, 2023.
- [22] Lindqvist B. Karlsson S. Koval A. Tevetzidis I. Haluska J. Kanellakis C. Agha-mohammadi A. Nikolakopoulos, G. „Multimodality robotic systems: Integrated combined legged-aerial mobility for subterranean search-and-rescue”, Robotics and Autonomous Systems, Volume 154, 2022, DOI: doi.org/10.1016/j.robot.2022.104134.
- [23] Saavedra M. L. Miro - Amarante L. Domínguez – Morales M. „Augmented and Virtual Reality Evolution and Future Tendency”, Applied Sciences, 10, 2020, DOI:10.3390/app10010322.

Mateusz Wróbel, Maciej Szwed

Urząd Dozoru Technicznego, Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego

Fitness for service dla urządzeń ciśnieniowych – doświadczenia UDT

Fitness For Service engineering assessment for pressure equipment - experience of the Office of Technical Inspection

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono możliwości zastosowania wirtualnej rzeczywistości i innowacyjnych technologii (m.in. zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych, skaningu laserowego) do nieniszczących, wizualnych badań w budownictwie. Zastosowanie wirtualnej rzeczywistości umożliwia przeprowadzenie zdalnej i bezpiecznej inspekcji budowlanej, bez konieczności „fizycznego” wejścia i przebywania na niepewnej konstrukcji lub w obiekcie budowlanym, będącym w złym stanie technicznym. Wizualne badania stanu technicznego, uszkodzeń, można wykonać w wirtualnym świecie, za pomocą gogli VR. Wirtualna rzeczywistość to technologia, która pozwala na stworzenie trójwymiarowego wirtualnego świata, w którym użytkownik ma możliwość swobodnej eksploracji. Środowisko cyfrowe zostaje stworzone w oparciu o dane pozyskane w sposób bezpieczny (zdalny) przy pomocy skanerów laserowych i dronów. Zapewnia to dokładne odwzorowanie obiektu w środowisku cyfrowym oraz zapewnia możliwość wykonania precyzyjnej inspekcji. VR może również stanowić platformę do koordynacji międzybranżowej dla obiektów wymagających planów naprawczych przy braku możliwości wizji lokalnej. W artykule przedstawiono obecny stan wiedzy oraz zaproponowano kolejne kierunki badań.

1. Wstęp

Normy dotyczące urządzeń ciśnieniowych zawierają wymagania odnoszące się do etapu wytwarzania. W trakcie eksploatacji urządzeń z uszkodzeniami analiza stanu technicznego obiektu nie jest już tak oczywista. Niektóre ze standardów technicznych (np. API 653 – Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction) opisują jedynie metodę wykonania naprawy lub zmianę parametrów procesowych. Dokument ten nie daje natomiast odpowiedzi na temat akceptowalności danego uszkodzenia oraz pozostałej trwałości eksploatacyjnej.

Uszkodzenia urządzeń ciśnieniowych wynikają w dużej mierze z oddziaływania aktywnych mechanizmów degradacji. Mogą one prowadzić do wystąpienia uszkodzeń tj.:

- pocienia (ogólne, miejscowe oraz pitting),
- pęknięcia powierzchniowe i podpowierzchniowe,
- mikropęknięcia i mikropory,
- zmiany struktury materiału,
- zmiany geometrii.

Dostępne publikacje naukowe, które opisują tego typu zagadnienia, są często pozbawione inżynierskiego podejścia, co znacząco ogranicza możliwość ich wykorzystania w praktyce inspekcyjnej. Ocena zidentyfikowanych uszkodzeń oraz ustalenie bezpiecznego okresu i warunków dalszej eksploatacji stanowi zatem wyzwanie.

W takich przypadkach rozwiązaniem może być

wykorzystanie standardu technicznego – opracowanego wspólnie przez Amerykański Instytut Naftowy (American Petroleum Institute – API) i Amerykańskie Stowarzyszenie Inżynierów Mechaników (American Society of Mechanical Engineers – AMSE) – API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service. Dokument ten jest zbiorem procedur pozwalających na ocenę urządzeń ciśnieniowych z wykrytymi uszkodzeniami oraz szacowanie ich pozostałej trwałości eksploatacyjnej. API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service zawiera ponadto szereg przydatnych wskazówek związanych z wykonywaniem badań NDT, zapobieganiem ponownym uszkodzeniom czy też dotyczących sposobu monitorowania urządzeń w trakcie dalszej eksploatacji. Metodologia Fitness For Service została opracowana z myślą o urządzeniach instalowanych w przemyśle rafineryjnym i petrochemicznym.

2. CZĘŚĆ I - Wprowadzenie do metodologii fitness for service

2.1 Budowa standardu

Standard API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service został podzielony na 14 części.

W części 1 opisano metodologię Fitness For Service. Wymieniono w niej także najważniejsze obszary zastosowania omawianego dokumentu.

Część 2 stanowi wprowadzenie do procedur Fitness For Service. Opisane zostały w niej poszczególne poziomy oceny, a także związane z nimi kryteria. W zależności od rodzaju

* Autor korespondencyjny.

E-mail: mariusz.szostak@pwr.edu.pl

uszkodzenia ocenę przeprowadza w oparciu o:

- wartości naprężeń dopuszczalnych,
- współczynnik wytrzymałości resztkowej – RSF,
- diagramy oceny uszkodzeń – FAD.

W załącznikach 2A+2F API 579-1/ASME FFS-1 można znaleźć szczegółowe informacje dotyczące m.in. obliczeń wytrzymałościowych i wymaganych właściwości materiałowych.

Części 3÷14 zawierają procedury oceny stanu komponentów z konkretnymi rodzajami uszkodzeń. Zestawienie typów uszkodzeń ujętych w metodologii Fitness For Service przedstawiono na Rysunku 1.

Każda z części 3÷14 charakteryzuje się usystematyzowaną i jednolitą budową. Wyróżnić można w nich rozdziały opisujące kolejno:

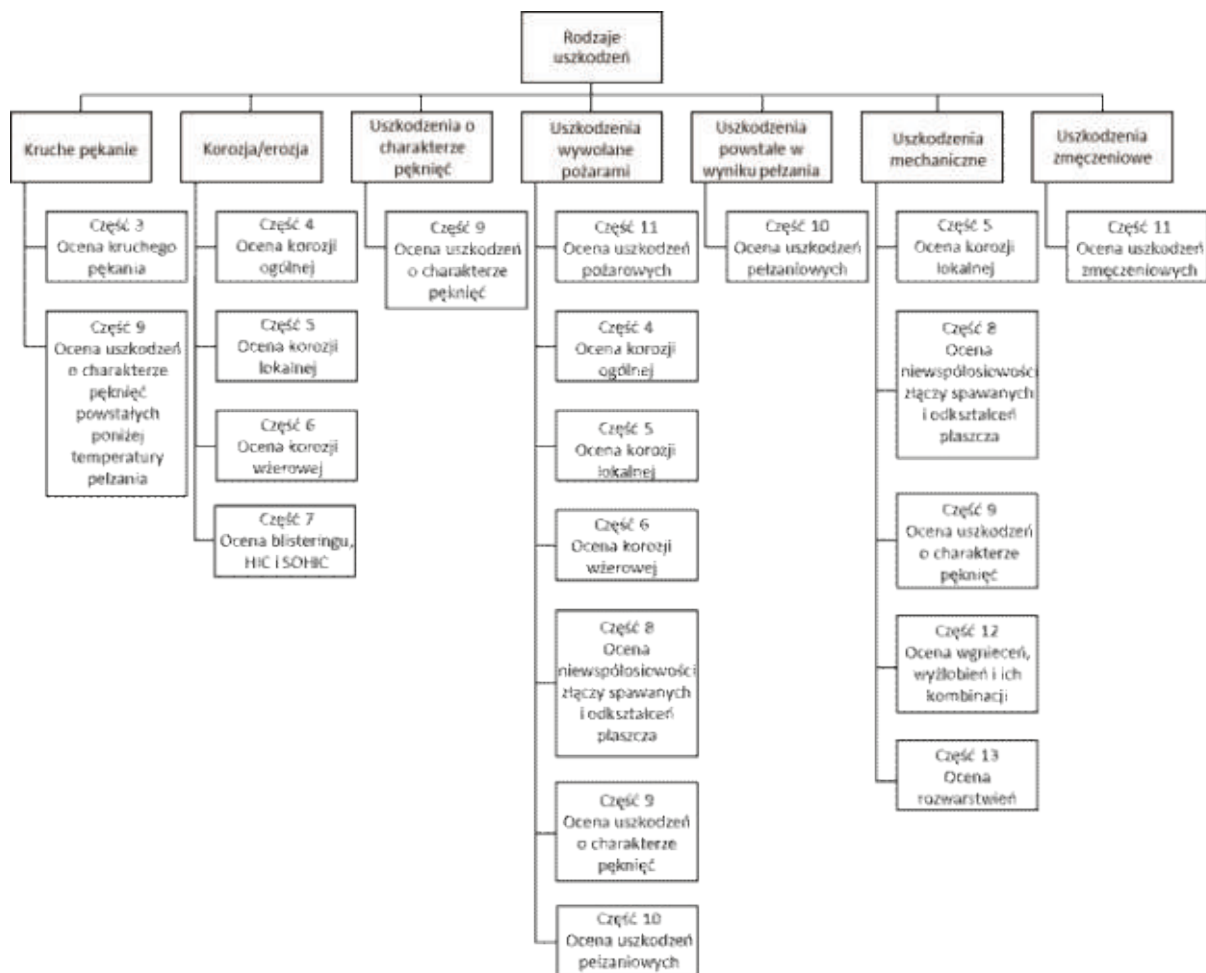
- identyfikację uszkodzenia wywołanego danym mechanizmem degradacji,
- stosowność i ograniczenia dla poszczególnych procedur oceny,
- dane, które są wymagane do przeprowadzenia oceny,
- techniki oceny i kryteria akceptacji,
- sposób oceny pozostałej trwałości eksploatacyjnej,
- środki zaradcze przed powstaniem danego uszkodzenia,
- zalecenia dotyczące sposobu monitorowania urządzenia,
- wymagania dotyczące dokumentowania procesu oceny.

Poszczególne procedury oceny są ze sobą ściśle powiązane. Nieznajomość jednej z części może skutkować brakiem możliwości przeprowadzenia oceny dla innego typu uszkodzenia.

2.2 Zespół wykonujący ocenę fitness for service

Wykonanie oceny Fitness For Service wymaga stworzenia interdyscyplinarnego zespołu osób, które powinny posiadać kompetencje z zakresu m.in. inżynierii materiałowej, metalurgii, korozji, budowy urządzeń ciśnieniowych, wytrzymałości konstrukcji, mechaniki pęknięcia, badań nieniszczących czy inżynierii procesowej.

Przeprowadzenie rzetelnej oceny zależy od ścisłej współpracy pomiędzy inspektorami UDT i służbami odpowiedzialnymi za eksploatację analizowanego urządzenia. Fitness For Service wykorzystuje wyniki przeprowadzonych inspekcji, które wraz z danymi konstrukcyjnymi analizowanego urządzenia stanowią podstawę do przeprowadzenia oceny. Wiarygodność i dokładność przeprowadzonych badań jest kluczowa dla poprawności uzyskanych wyników. Istotną rolę odgrywa zatem komunikacja pomiędzy zespołem prowadzącym ocenę Fitness For Service a personelem wykonującym badania NDT, który powinien otrzymać informację o celu przeprowadzenia badań oraz o oczekiwanym typie



Rys. 1. Rodzaje uszkodzeń ocenianych według metodologii Fitness For Service [na podstawie Figure 2.1 API 579-1/ASME FFS-1].

uszkodzeń. Ważny aspekt stanowi również dobór odpowiednich metod badawczych, tak aby możliwe było precyzyjne zwymiarowanie uszkodzenia i dokładne określenie jego lokalizacji w danej konstrukcji. Rekomendowane jest również ustalenie oczekiwań związanych z wynikami badań przed ich przeprowadzeniem, np. dobór odpowiedniej siatki pomiarowej podczas pomiarów grubości.

2.3 Poziomy oceny fitness for service

Metodologia Fitness For Service przewiduje przeprowadzenie oceny stanu urządzenia na trzech poziomach.

- Ocena na poziomie 1 – Procedury oceny dają najbardziej zachowawcze wyniki. Stosowane algorytmy obliczeniowe pozwalają na stosunkowo szybką ocenę przy dostarczeniu jedynie podstawowych informacji o danym urządzeniu.
- Ocena na poziomie 2 – Ocena związana jest z bardziej szczegółową analizą. Wymagane jest dostarczenie większej ilości danych, a poszczególne obliczenia i zależności algebraiczne są bardziej skomplikowane. Otrzymane wyniki cechuje jednak większa precyzja od tych, które uzyskano podczas oceny na poziomie 1.
- Ocena na poziomie 3 – Do przeprowadzenia oceny wymagane jest zazwyczaj wykonanie inspekcji w bardzo szerokim zakresie i pozyskanie dogłębnych

informacji dotyczących urządzenia. Analiza zwykle opiera się na metodach numerycznych, np. metodzie elementów skończonych.

Omawiając metodologię Fitness For Service, warto podkreślić, że niespełnienie wymagań oceny np. na poziomie 1 nie oznacza, że urządzenie powinno zostać wyłączone z eksploatacji. Możliwe jest wykonanie dodatkowej analizy na wyższym poziomie oceny (2 lub 3), której wynik może okazać się pozytywny. W przypadku otrzymania negatywnych rezultatów podczas oceny na każdym z poziomów należy rozważyć wyłączenie urządzenia z eksploatacji, przeprowadzenie naprawy lub zmianę dotychczasowych warunków pracy. Powiązania pomiędzy poszczególnymi poziomami oceny przedstawiono na Rysunku 2.

2.4 Stosowalność i ograniczenia

Bardzo ważnym aspektem przy wykorzystaniu metodologii Fitness For Service jest znajomość zakresu stosowalności i ograniczeń dotyczących poszczególnych procedur oceny. Przykładem są tu wymagania dla różnych typów obiektów. W zależności od ocenianego elementu (rodzaju urządzenia, jego geometrii, warunków pracy) możliwe jest przeprowadzenie oceny na danym poziomie. Zestawienie opisujące możliwe do zastosowania poziomy oceny dla konkretnego typu obiektów zestawiono w Tablicy 1.



Rys. 2. Zależność pomiędzy poziomami oceny Fitness For Service.

Tab. I. Typy obiektów i stosowane dla nich poziomy oceny.

TYPY OBIEKTÓW			
OBIEKTY TYPU A	OBIEKTY TYPU B		OBIEKTY TYPU C
OCENA NA POZIOMIE 1, 2 LUB 3	OCENA NA POZIOMIE 2 LUB 3		OCENA NA POZIOMIE 3
	KLASY 1	KLASY 2	
Cylindryczne zbiorniki ciśnieniowe i elementy stożkowe, kuliste zbiorniki ciśnieniowe i kuliste zbiorniki magazynowe, dennice, proste odcinki rurociągów, łuki i kolana	Obiekty o takich samych cechach geometrycznych i temperaturowych jak obiekty typu A, dla których obciążenia dodatkowe rzutują na wymaganą grubość ścianki	Króćce zbiorników ciśnieniowych, obszar wzmocnień elementów stożkowych, kołnierze, połączenia płaszcza z płaskim dnem, połączenia wkładów rurowych.	Połączenia dennic z płaszczem, pierścienie wzmacniające, podpory i spódnice, połączenia płaszcza z dnem zbiorników magazynowych

2.5 Dokumentowanie wykrytych uszkodzeń i dane wymagane do przeprowadzenia oceny

Dokumentowanie wykrytych uszkodzeń to kolejny istotny element metodologii Fitness For Service. Sposób opisu uszkodzeń oraz wiarygodność pozyskanych danych pomiarowych rzutuje w kolejnym etapie na poprawność wykonanej oceny.

Metodologia Fitness For Service wymaga dostępu do szeregu danych dotyczących danego urządzenia, tj.:

- dokumentacja projektowa i obliczenia wytrzymałościowe,
- raporty z badań przeprowadzonych na etapie wytwarzania,
- dokumenty kontroli,
- informacje na temat warunków pracy urządzenia i stosowanych urządzeń zabezpieczających,
- wyniki prób ciśnieniowych,
- informacje na temat dotychczasowej historii eksploatacji,
- informacje na temat zmian dotyczących ciśnienia i temperatury prowadzonego procesu, medium roboczego, szybkości korozji itp.,
- wyniki okresowych badań NDT,
- informacje na temat przeprowadzonych napraw i/lub modernizacji.

Bez dostępu do powyższych danych praktycznie niemożliwe staje się wykonanie oceny zgodnie z wymaganiami opisanymi w dokumencie API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service.

3. CZĘŚĆ II – przykłady analiz fitness for service zrealizowanych przez UDT

PRZYKŁAD 1 – korozja lokalna kolana rurociągu

Opis problemu

Podczas okresowych pomiarów grubości na zewnętrznej tworzącej kolana rurociągu wykryto pocienienia. Pozostała grubość materiału była mniejsza od wymaganej grubości minimalnej wynoszącej 4,63 mm. Dane dotyczące rurociągu zestawiono w Tabelcy 2.

Tab. 2. Dane dotyczące rurociągu

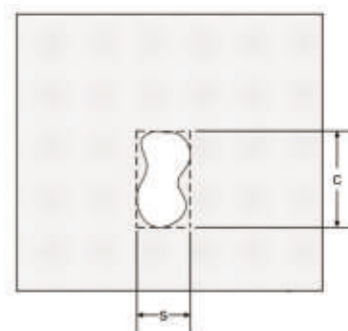
Materiał kolana	ASTM A234 Grade WPB
Parametry obliczeniowe:	
Ciśnienie, P	0,78 MPa
Temperatura, T	240 °C
Średnica zewnętrzna rurociągu, D _o	168,3 mm
Grubość nominalna, t _{nom}	7,11 mm
Napężenia dopuszczalne, S _a	133,04 MPa
Medium robocze	Amina bogata

Początkowo pomiary wykonano jedynie w 5 punktach pomiarowych zlokalizowanych na zewnętrznej tworzącej kolana. Zastosowana siatka pomiarowa nie pozwoliła na przeprowadzenie analizy Fitness For Service. Z uwagi na zbyt mały zakres badań niemożliwe było dokładne oszacowanie wymiarów powstałego pocienienia definiowanego przez:

- minimalną zmierzoną grubość,
- zasięg (szerokość) zlokalizowanego pocienienia w kierunku obwodowym,
- zasięg (długość) zlokalizowanego pocienienia w kierunku wzdłużnym.

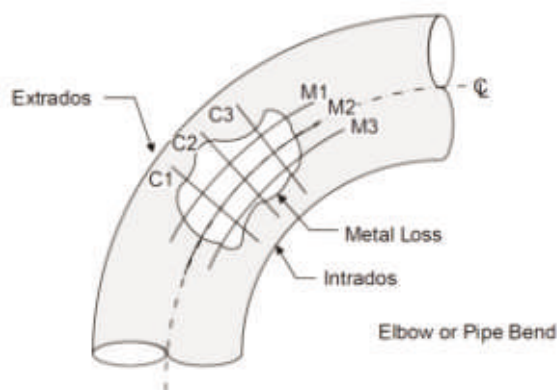
Dobór siatki pomiarowej

API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service zawiera szereg wytycznych dotyczących wymiarowania ubytków korozyjnych. W przypadku ubytków o charakterze lokalnym należy oszacować rozmiary wykrytego pocienienia (wymiary s i c) – patrz Rysunek 4.



Rys. 4. Wymiarowanie pocienienia wg API 579-1/ASME FFS-1, Figure 4.11.

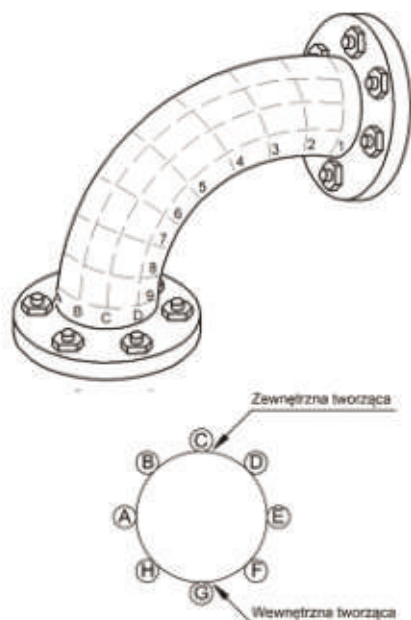
Przykład siatki pomiarowej stosowanej dla kolan rurociągów przedstawiono na Rysunku 5.



Rys. 5. Schemat siatki pomiarowej stosowanej do oceny kolan i łuków wg API 579-1/ASME FFS-1, Figure 4.

Stosowana siatka pomiarowa powinna być możliwie gęsta. W dokumencie API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service zawarto równania pozwalające na wyznaczenie rekomendowanej odległości między punktami pomiarowymi (L_s). Wartość ta uwarunkowana jest m.in. przez średnicę wewnętrzną urządzenia i grubość t_{rd} .

Na podstawie zaleceń zawartych w dokumencie API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service zaprojektowano siatkę pomiarową dla analizowanego komponentu – patrz Rysunek 6. Zwiększona (w stosunku do pierwotnej) liczba punktów pomiarowych pozwoliła na dokładniejsze zwymiarowanie powstałego pocienienia.



Rys. 6. Schemat siatki pomiarowej zastosowanej podczas powtórzonych pomiarów.

Analiza danych pomiarowych

Wyniki otrzymanych pomiarów zestawiono w Tabelcy 3.

Tab. 3. Wyniki pomiarów grubości na zagęszczonej siatce pomiarowej.

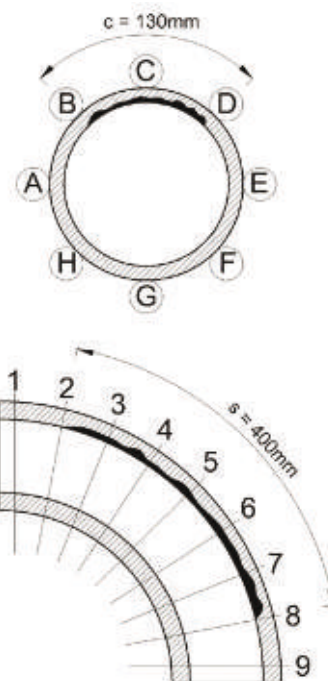
Punkt pomiarowy	A	B	C	D	E	F	G	H	Wzdłużny CTP
1	6,0	5,6	5,5	5,6	5,8	5,9	6,0	6,1	5,5
2	5,8	4,5	4,5	4,9	5,7	5,8	6,2	6,0	4,5
3	5,9	4,1	3,7	4,5	5,9	5,7	6,1	6,0	3,7
4	6,0	3,8	3,2	3,9	5,8	5,7	6,2	5,8	3,2
5	5,6	3,7	3,0	3,8	5,9	5,9	6,1	5,7	3,0
6	5,8	3,6	3,3	4,0	6,0	5,8	6,0	5,7	3,3
7	5,7	3,8	3,7	4,2	5,6	5,8	6,2	5,9	3,7
8	5,7	4,1	4,0	5,6	5,8	5,9	6,0	6,0	4,0
9	5,9	5,8	5,7	5,8	5,7	5,9	6,1	6,0	5,7
Obwodowy CTP	5,6	3,6	3,0	3,8	5,6	5,7	6,0	5,7	

Granice wykrytego lokalnego pocienienia

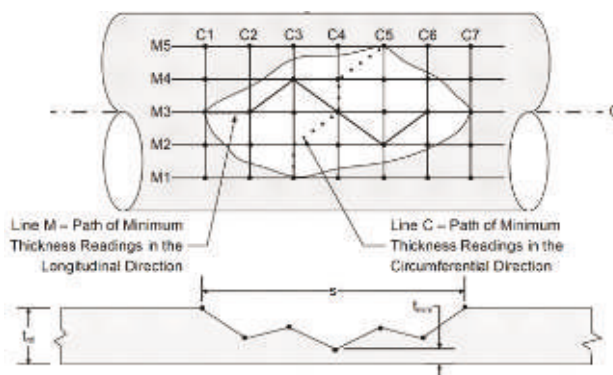
Zarejestrowane zmiany grubości potwierdzają lokalny charakter wykrytego ubytku korozyjnego. Pocienienie zlokalizowane było na zewnętrznej tworzącej kolana. Określono minimalną zmierzoną grubość ($t_{mm}=3,0$ mm). Oszacowany został także zasięg występowania pocienienia. Wymiar obwodowy, $c=130$ mm, a wymiar wzdłużny, $s=400$ mm – patrz Rysunek 7.

Odpowiednio dobrana siatka pomiarowa jest niezbędna do wyznaczenia krytycznych profili grubości (ang. Critical Thickness Profile – CTP). Sposób wyznaczania CTP przedstawiono na Rysunku 8.

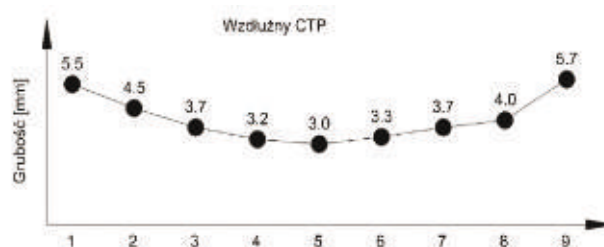
Przykładowy CTP analizowanego kolana rurociągu dla kierunku wzdłużnego przedstawiono na Rysunku 9.



Rys. 7. Schematyczne przedstawienie zasięgu występowania



Rys. 8. Sposób wyznaczania CTP wg API 579-1/ASME FFS-1, Figure 4.10



Rys. 9. Wzdłużny CTP dla analizowanego kolana rurociągu

W kolejnym etapie oceny krytyczne profile grubości są wykorzystywane do wyznaczenia minimalnych wartości współczynnika RSF. Procedura określenia tego parametru wymaga m.in. podziału krytycznego profilu grubości na podsekcje.

Każdą z podsekcji analizuje się następnie pod kątem wielkości powstałego ubytku. Minimalna wartość RSF (otrzymana dla danej podsekcji) pozwala następnie na określenie MAWPr, wg zadanych kryteriów:

$$MAWPr = MAWP \left(\frac{RSF}{RSFa} \right)$$

dla $RSF < RSFa$

lub

$$MAWPr = MAWP$$

dla $RSF \geq RSFa$

Ostatnim etapem oceny jest oszacowanie czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji zgodnie z zależnością.

$$R_t \rightarrow \frac{t_{mm} - (C_{rate} \cdot time)}{t_{rd} - (C_{rate}^{rd} \cdot time)}$$

W ocenie ubytków korozyjnych zgodnie z metodologią Fitness For Service kluczowe jest dokładne zwymiarowanie powstałego ubytku korozyjnego. Dokonać można tego poprzez zastosowanie odpowiednio gęstej siatki pomiarowej podczas wykonywania punktowych pomiarów grubości, wykorzystanie technik służących do mapowania korozji (UT C-skan, radiografia cyfrowa) lub pomiary wykonywane w warunkach badania wizualnego, np. podczas oceny wżerów korozyjnych.

Istotne dla przeprowadzenia analizy jest również uzyskanie dodatkowych informacji tj. odległość od najbliższej głównej nieciągłości konstrukcyjnej czy odległość do złączy spawanych znajdujących się w sąsiedztwie wykrytego pocienia.

Metodologia opisana w dokumencie API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service zawiera także dodatkowe wskazówki dotyczące badań NDT komponentów z wykrytymi uszkodzeniami, np. badania powierzchniowe i objętościowe złączy spawanych znajdujące się w sąsiedztwie ubytków korozyjnych.

PRZYKŁAD 2 – reaktor pracujący w warunkach pełzania

Opis problemu

Reaktor pracujący w warunkach pełzania przekroczył przyjęty w dokumentacji projektowej czas eksploatacji – 100000 h. Aparat ten pracuje w środowisku zawierającym wodór.

Przeprowadzenie oceny na poziomie 1 i/lub 2 jest możliwe, jeśli dany komponent pracujący w warunkach pełzania nie zawiera dodatkowych uszkodzeń tj. pocienia i wżery korozyjne, uszkodzenia wywołane obecnością wodoru (blistering, HIC, SOHIC, HTHA), zmiany mikrostrukturalne (grafityzacja, wydzielenia fazy sigma, nawęglanie), czy też pęknięcia. W przypadku wystąpienia jednego lub kilku z wyżej wymienionych uszkodzeń należy zastosować bardziej skomplikowane procedury oceny na poziomie 3 wykorzystujące analizy numeryczne.

Tab. 4. Dane dotyczące reaktora

Material	ASTM A387 Grade F22 Class 1
Ciśnienie obliczeniowe płaszcza, P	3,8 MPa
Ciśnienie robocze	3,18/3,05 MPa
Temperatura obliczeniowa, T	540 °C
Temperatura robocza	455/488 °C
Naddatek na korozję/FCA	3/0,75 mm
Średnica zewnętrzna, D _o	1290 mm
Grubość nominalna, t _{nom}	50 mm
Naprężenia dopuszczalne, S _a	53,89 MPa

Analiza wyników badań nieniszczących

Ocenę reaktora należy rozpocząć od wykonania badań nieniszczących w celu wykazania braku innych rodzajów uszkodzeń. Zrealizowane badania wizualne, magnetyczno-proszkowe i ultradźwiękowe nie wykazały obecności wskazań nieakceptowalnych. Podczas pomiarów grubości nie stwierdzono obecności ubytków korozyjnych. Badania struktury materiału metodą replik wykazały strukturę ferrytyczno-perlityczną bez pustek pełzaniowych. Twardość materiału była wyższa od 140HB (wartość kryterialna podana w standardzie). Na podstawie analizy wykresu Nelsona stwierdzono, że reaktor nie jest narażony na wystąpienie wysokotemperaturowego ataku wodorowego (HTHA – ang. High Temperature Hydrogen Attack).

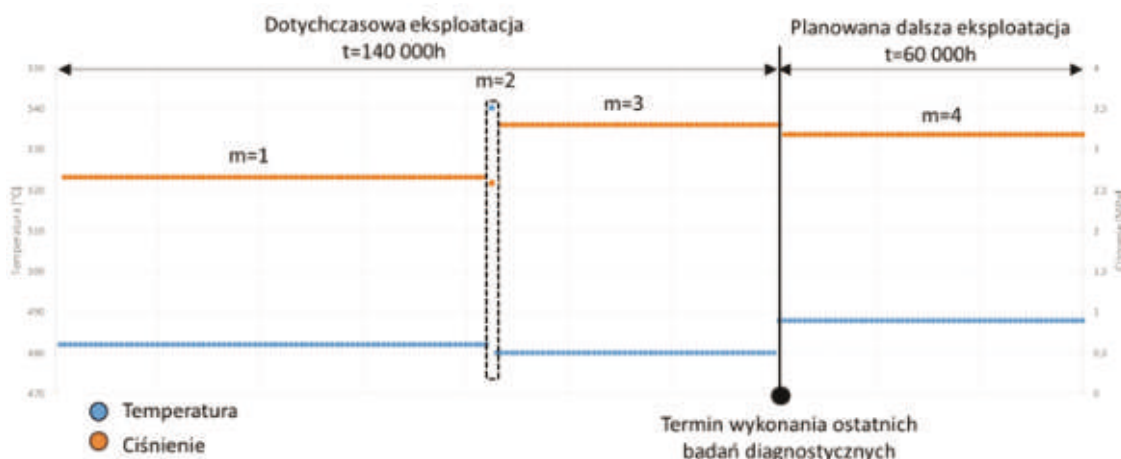
Nie stwierdzono obecności ograniczeń uniemożliwiających przeprowadzenie oceny na poziomie 1 i/lub 2.

Historia eksploatacji

Przeprowadzając ocenę Fitness For Service konieczna jest analiza historii eksploatacji danego urządzenia. Na podstawie danych otrzymanych od eksploatującego ustalono, że warunki pracy reaktora ulegały wahaniom. Zmiany te są istotne, dlatego konieczne staje się określenie tzw. cykli operacyjnych. W prezentowanym przykładzie wyróżniono 4 cykle operacyjne, przy czym cykl m=4 dotyczy przyszłych planowanych warunków eksploatacji. Dla każdego z cykli operacyjnych konieczne jest obliczenie trwałości podczas pracy w warunkach pełzania, ułamków uszkodzenia i ich następne porównanie z wartości kryterialną. Cykle operacyjne przyjęte do analizy przedstawiono na Rysunku 10. Warunki pracy i czasy trwania każdego z cykli zestawiono w Tabeli 5

Tab. 5. Warunki pracy każdego z cykli eksploatacyjnych

Parametry	Cykle operacyjne			
	m=1	m=2	m=3	m=4
Temperatura [°C]	482	540	480	488
Ciśnienie [MPa]	2,66	2,6	3,3	3,18
Czas eksploatacji [h]	84 000	1000	55 000	60 000
	Σ 140 000			



Rys. 10. Cykle operacyjne przyjęte do analizy

Określenie trwałości pełzaniowej

Określenie trwałości pełzaniowej składa się z kilku etapów, spośród których najważniejsze dotyczą:

- wyznaczenia wartości składowych naprężeń głównych,
- wyznaczenia wartości naprężeń zredukowanych,
- obliczenia trwałości za pomocą jednego z dostępnych modeli, np. za pomocą równań Larsona-Millera.

Równania Larsona-Millera służą do wyznaczenia trwałości

$$LMP(S_{eff}) = \frac{A_0 + A_2 S_{eff}^{0.5} + A_4 S_{eff} + A_6 S_{eff}^{1.5}}{1 + A_1 S_{eff}^{0.5} + A_3 S_{eff} + A_5 S_{eff}^{1.5}}$$

podczas pracy w warunkach pełzania. W celu przeprowadzenia obliczeń konieczna jest konwersja jednostek na naprężenia wyrażone w [ksi] i temperaturę wyrażoną w [°F]. W obliczeniach wykorzystuje się pewne parametry zależne od rodzaju materiału. Zestawienie parametrów Larsona-Millera dla stali z grupy 2.25Cr-1Mo zawarto w Tablicy 6.

Tab. 6. Parametry Larsona-Millera dla stali 2.25Cr-1Mo

Materiał	Parametry	Minimalny parameter Larsona-Miller – LMP_m
2.25Cr-1Mo	A_0	$4,3981719 \cdot 10^4$
	A_1	$-8,4656117 \cdot 10^{-1}$
	A_2	$-4,0483005 \cdot 10^1$
	A_3	$2,6236081 \cdot 10^{-1}$
	A_4	$1,5373650 \cdot 10^1$
	A_5	$4,9673781 \cdot 10^{-2}$
	A_6	$6,6049429 \cdot 10^{-1}$
	C_{LMP}	20,0

Wartość $LMP(S_{eff})$ pozwala następnie na wyznaczenie trwałości pełzaniowej dla danego cyklu eksploatacyjnego korzystając z zależności:

$$\log_{10}[L] = \frac{1000 \cdot LMP(S_{eff})}{(T_{refa} + T)} - C_{LMP}$$

Znając trwałość pełzaniową możliwe jest wyznaczenie ułamka uszkodzenia dla danego cyklu operacyjnego:

$$D_c = \sum_{n=1}^N \frac{t}{L}$$

Całkowite uszkodzenie wywołane pracą w warunkach pełzania nie może być większe niż:

$$D_c^{total} = \sum_{m=1}^M D_c \leq D_c^{allow}$$

W omawianym przykładzie D_c^{total} jest mniejsze od $D_c^{allow} = 0,8$. Płaszcz reaktora spełnił kryteria oceny wg API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service – Part 10 – Assessment of components operating in the creep range – Level 2 Assessment – Larson-Miller Parametr. Jego eksploatacja może być kontynuowana przez założony w analizie okres.

4. Podsumowanie

Przeprowadzenie analizy Fitness For Service zgodnie z metodologią opisaną w API 579-1/ASME FFS-1 wymaga znajomości wymagań zawartych w tym dokumencie odniesienia. Poszczególne procedury zawierają szczegółowe informacje dotyczące danych koniecznych do przeprowadzenia oceny (sposób charakteryzowania uszkodzeń, dane projektowe), jak i ograniczeń w ich stosowności. Wykonanie analizy Fitness For Service wymaga stworzenia interdyscyplinarnego zespołu osób, które powinny posiadać kompetencje z zakresu m.in. inżynierii materiałowej, metalurgii, korozji, budowy urządzeń ciśnieniowych, wytrzymałości konstrukcji, mechaniki pęknięcia, badań nieniszczących czy inżynierii procesowej.

5. Bibliografia

- [1] API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service, June, 2016
- [2] Materiały własne Urzędu Dozoru Technicznego.

SPIS SKRÓTÓW I OZNACZEŃ

$A_0 \rightarrow A_5$	parametry równania Larsona-Millera <i>Larson-Miller parametr</i>		parametru Larsona-Millera dla n-tego przyrostu czasu
C_{rate}	szybkość korozji <i>future corrosion rate</i>		<i>effective stress used to compute the remaining life in terms of the Larson-Miller parameter for the n^{th} time increment</i>
C_{rate}^{rd}	szybkość korozji dla materiału z dala od miejscowego ubytku korozyjnego <i>anticipated future corrosion rate away from the local metal loss</i>	σ_e	naprężenia zredukowane <i>effective stress</i>
C_{LMP}	stała Larsona-Millera <i>Larson-Miller constant</i>	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	składowe naprężeń głównych <i>principal stress</i>
D_c	uszkodzenie pełzaniowe <i>creep damage</i>	t_{mm}	minimalna zmierzona grubość określona w momencie oceny <i>minimum measured thickness determined at the time of the inspection</i>
D_c^{allow}	dopuszczalne uszkodzenia pełzaniowe <i>allowable creep damage</i>		
D_c	uszkodzenia pełzaniowe w n-tym okresie czasu <i>creep damage for the n^{th} time period</i>	t_{rd}	jednolita grubość z dala od miejscowego miejsca ubytku metalu, ustalona na podstawie pomiarów grubości w czasie oceny <i>uniform thickness away from the local metal loss location established by thickness measurements at the time of the assessment</i>
D_c^{total}	całkowite uszkodzenia pełzaniowe, uwzględniające wszystkie cykle pracy <i>total creep damage considering all operating cycles</i>	T_{refa}	temperatura odniesienia <i>reference temperature</i>
FAD	diagramy oceny uszkodzeń <i>Failure Assessment Diagram</i>	T	temperatura <i>temperature</i>
FCA	naddatek na korozję mający zastosowanie do obszaru z dala od miejsca ubytku materiału <i>Future Corrosion Allowance applied to the region away from the metal loss</i>	t	czas <i>time</i>
FCA_{ml}	naddatek na korozję mający zastosowanie do obszaru ubytku materiału <i>Future Corrosion Allowance applied to the region of metal loss</i>		
L	trwałość przy danej historii obciążania w n-tym przyroście czasu <i>rupture time for the loading history for the n^{th} time increment</i>		
$LMP(S_{eff})$	parameter Larsona-Millera będący funkcją naprężenia S_{eff} <i>Larson-Miller parameter at stress S_{eff}</i>		
L_s	zalecana odległość między punktami pomiarowymi <i>recommended spacing of thickness readings</i>		
m	aktualny numer cyklu operacyjnego <i>current operating cycle number</i>		
$MAWP$	maksymalne dopuszczalne ciśnienie robocze nieuszkodzonego elementu <i>Maximum Allowable Working Pressure of the undamaged component</i>		
$MAWP_r$	zredukowane maksymalne dopuszczalne ciśnienie robocze dla uszkodzonego elementu <i>reduced maximum allowable working pressure of the damaged component</i>		
RSF	obliczony współczynnik wytrzymałości w oparciu o zasięg południkowy LTA <i>computed remaining strength factor based on the meridional extent of the LTA</i>		
RSF_a	dopuszczalny współczynnik wytrzymałości <i>allowable remaining strength factor</i>		
S_{eff}	naprężenia zredukowane użyte do obliczenia pozostałego okresu trwałości za pomocą		

Maciej Szwed*, Tomasz Jakubowski, Michał Targoński
Urząd Dozoru Technicznego, ul. Szczęśliwicka 34, 02-353 Warszawa

Detekcja pęcherzy wodorowych metodami ultradźwiękowymi TOFD, TULA i Phased Array

Hydrogen blisters detection by TOFD, TULA and Phased Array ultrasonic methods

STRESZCZENIE

Badaniom poddano wycinek płaszcza aparatu instalacji rafinerijnej pracującego w środowisku zawierającym wodór, w którym na powierzchni wewnętrznej, podczas rutynowych oględzin, odnotowano obecność pęcherzy wodorowych. Przeprowadzone badania ultradźwiękowe wykazały występowanie wskazań pochodzących od nieciągłości materiałowych o różnej wielkości i różnie umiejscowionych w badanej próbce. Zastosowane w niniejszej pracy techniki badań, dzięki możliwości wykorzystania różnych form obrazowania graficznego i większej rozdzielczości, pozwoliły na znacznie łatwiejszą interpretację wyników niż miałyby to miejsce w przypadku zastosowania klasycznych badań ultradźwiękowych, z głowicą o pojedynczym przetworniku, opartych na analizie poszczególnych impulsów (zobrazowań typu A). Analizując różne typy zobrazowań, w oparciu o informacje dotyczące warunków eksploatacji oraz możliwych do wystąpienia mechanizmów degradacji, określono rodzaj i pochodzenie nieciągłości. Podjęto również próbę określenia na podstawie widocznych wskazań na jakim etapie powstawania są pęcherze wodorowe.

Słowa kluczowe: degradacja wodorowa, pęcherze wodorowe, badania ultradźwiękowe

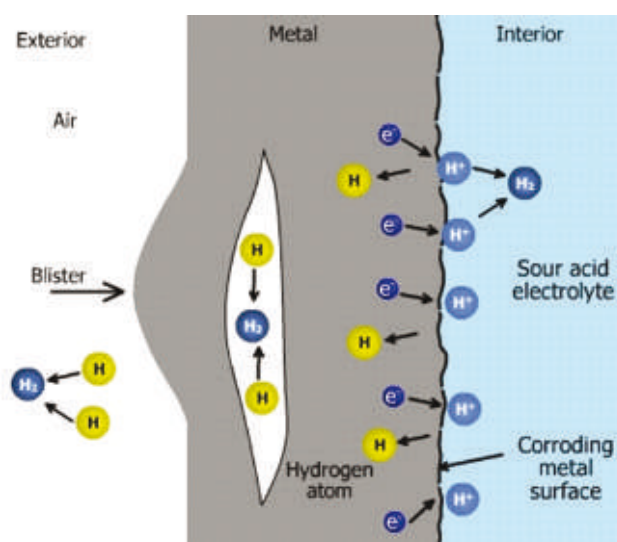
ABSTRACT

A section of the shell of the unit of a refining plant operating in a hydrogen-containing environment was examined, where the presence of hydrogen blisters was noted on the inner surface during routine visual inspection. The ultrasonic tests carried out revealed indications coming from material discontinuities of various sizes and different locations in the test sample. The testing techniques used in this study, due to the possibility of using various forms of graphic imaging and higher resolution, allowed for a much easier interpretation of the results than would be possible if classical ultrasonic tests, with a single transducer head, based on the analysis of individual pulses (A-scan) were used. Analyzing different types of imaging, based on information on operating conditions and possible degradation mechanisms, the character and origin of discontinuities were determined. An attempt was also made to determine, based on the visible indications, at what stage of formation the hydrogen blisters are.

Keywords: hydrogen degradation, hydrogen blisters, ultrasonic testing

1. Wstęp

Blistering jest formą niszczenia wodorowego głównie stali węglowych i niskostopowych pracujących w środowisku wilgotnego siarkowodoru. Występuje najczęściej na wewnętrznej powierzchni zbiorników ciśnieniowych. Tworzenie pęcherzy wodorowych powodowane jest przez atomy wodoru, które powstają na powierzchni stali w wyniku zachodzących reakcji korozyjnych. Siarka, obecna w medium, stanowi promotor wnikania wodoru do materiału, spowalniając reakcję rekombinacji wodoru z postaci atomowej do cząsteczkowej, pozwalając tym samym na dłuższą jego obecność na powierzchni materiału [1]. W wyniku zachodzących procesów atomy wodoru mogą łatwo dyfundować do sieci krystalicznej materiału i gromadzić się w miejscach nieciągłości materiałowych takich jak wtrącenia niemetaliczne, pory czy rozwarstwienia, gdzie następnie łączą się w cząsteczki. Molekuły wodoru są zbyt duże, żeby dalej dyfundować przez sieć krystaliczną, zostają zatem



Rys. 1. Mechanizm powstawania pęcherzy wodorowych [3].

Fig. 1. Mechanism of hydrogen blister formation [3]

* Autor korespondencyjny.

E-mail: Maciej.Szwed@udt.gov.pl

uwięzione w pułapce. Z czasem zachodzenia procesów korozyjnych na powierzchni i dyfuzji wodoru w głąb stali wzrasta ilość spulapkowanego wodoru, a tym samym jego ciśnienie w pułapce, i w konsekwencji dochodzi do powstania lokalnego odkształcenia materiału w postaci pęcherza (blistra) [2].

2. Techniki ultradźwiękowe wykorzystywane m.in. w detekcji degradacji wodorowej

Dokumenty opisujące mechanizmy degradacji materiałów w przemyśle rafineryjnym [2] wskazują również metody badań nieniszczących umożliwiających ich detekcję. W przypadku możliwości wystąpienia zjawisk związanych z niskotemperaturowymi odmianami degradacji wodorowej, niekiedy wystarczające mogą być badania wizualne. Jednak, przykładowo, w początkowym stadium powstawania pęcherzy wypełnionych wodorem, nieciągłości pozostają w objętości materiału i nie są widoczne na powierzchni, dlatego ich wykrycie powierzchniowymi metodami jest niemożliwe, i należy tutaj wykorzystać objętościowe metody badań nieniszczących, tj. badania ultradźwiękowe. W przypadku, gdy spodziewanym rodzajem uszkodzenia jest np. pęknięcie indukowane wodorem (HIC), i pęknięcia powstają na powierzchni materiału, odpowiednie będzie zastosowanie powierzchniowych metod badań nieniszczących. Natomiast w przypadku, gdy spodziewanym uszkodzeniem są wysokotemperaturowe odmiany degradacji wodorowej (HTHA) zazwyczaj stosuje się zaawansowane technik badań ultradźwiękowych (Phased Array, Advanced Ultrasonic Backscatter Technique, pomiar ilorazu prędkości fal ultradźwiękowych, Time of Flight Diffraction, pomiar tłumienia fali ultradźwiękowej) ukierunkowane w stronę detekcji tego rodzaju uszkodzeń.

Najczęściej wykorzystywaną metodą badań ultradźwiękowych jest metoda echa przy zastosowaniu klasycznej głowicy o jednym przetworniku. Jednakże w niniejszej pracy skupiono się na porównaniu wyników uzyskanych nowoczesnymi technikami badań ultradźwiękowych, tj. Phased Array (PA), Time of Flight Diffraction (TOFD) i TOFD-Ultra Low Angle (TULA).

Technika Phased Array

W technice Phased Array do generowania wiązki fali ultradźwiękowej wykorzystuje się głowice wieloprzetwornikowe, w których każdy z elementów (przetworników) jest generowany i sterowany indywidualnie. Powszechnie stosowane głowice PA posiadają najczęściej od 16 do 128 przetworników, a każdy z nich posiada oddzielne podłączenie i przetwornik analogowo-cyfrowy oraz jest akustycznie odizolowany od pozostałych.

Gdy przetworniki głowicy PA wzbudzone są jednocześnie formowana jest wiązka ultradźwiękowa zbliżona do wiązki pochodzącej z klasycznej głowicy jednoprzetwornikowej. Natomiast, gdy poszczególne przetworniki wzbudzone są z ustalonymi opóźnieniami czasowymi generowana wiązka jest wypadkową wszystkich fal kulistych generowanych przez poszczególne przetworniki.

Formułowanie opóźnień czasowych dla nadajnika

i odbiornika głowic wieloprzetwornikowych umożliwia ogniskowanie wiązki na wybranej głębokości oraz sterowania jej kątem.

Dzięki możliwości generowania wielu wiązek ultradźwiękowych i sterowaniu nimi możemy generować różnego typu zobrazowania, tj. S-scan, B-scan, C-scan oraz ich pochodne. Graficzna prezentacja wyników znacząco ułatwia ich interpretację, co często przekłada się na możliwość określenia rodzaju nieciągłości [4].

Technika Time of Flight Diffraction

Technika TOFD polega na wprowadzeniu do badanego obiektu szerokiej wiązki fal ultradźwiękowych, mogących wzbudzić fale dyfrakcyjne (rejestrowane podczas badania) powstające na wierzchołkach nieciągłości. Sygnały dyfrakcyjne mają niższą amplitudę niż fale odbite, ale rozchodzą się w szerokim zakresie kątowym.

W badaniu TOFD wykorzystuje się dwie głowice kątowe fal podłużnych (nadawczą i odbiorczą) ustawione naprzeciw siebie po dwóch stronach badanego obszaru, np. spoiny. Z jednej głowicy wysyłane są fale ultradźwiękowe, które docierają do drugiej głowicy po różnych drogach. Część z nich dochodzi jako fala podpowierzchniowa (LW- Lateral Wave), bezpośrednio do głowicy odbiorczej. Ze względu na najkrótszą drogę impuls ten dociera jako pierwszy bez zmiany fazy fali. Część wiązki docierająca do odbiornika dopiero po odbiciu od przeciwległej powierzchni ze zmienioną fazą (BW - BackWall). Sygnały LW i BW stanowią linie odniesienia, między którymi potencjalnie mogą pojawiać się sygnały powstające wskutek oddziaływania fal z ewentualnymi nieciągłościami materiału. [5]

W przypadku gdy fala ultradźwiękowa pada na nieciągłość, ulega odbiciu od jej powierzchni oraz dyfrakcyjnemu ugięciu i rozproszeniu na jej krawędziach. Dyfrakcja powoduje propagację fali rozproszonej we wszystkich kierunkach od krawędzi wady. Należy też zauważyć, że impulsy ulegające dyfrakcji na dolnej krawędzi wady nie zmieniają swojej fazy, natomiast impulsy pochodzące z dyfrakcji na górnej krawędzi zmieniają fazę o 180°.

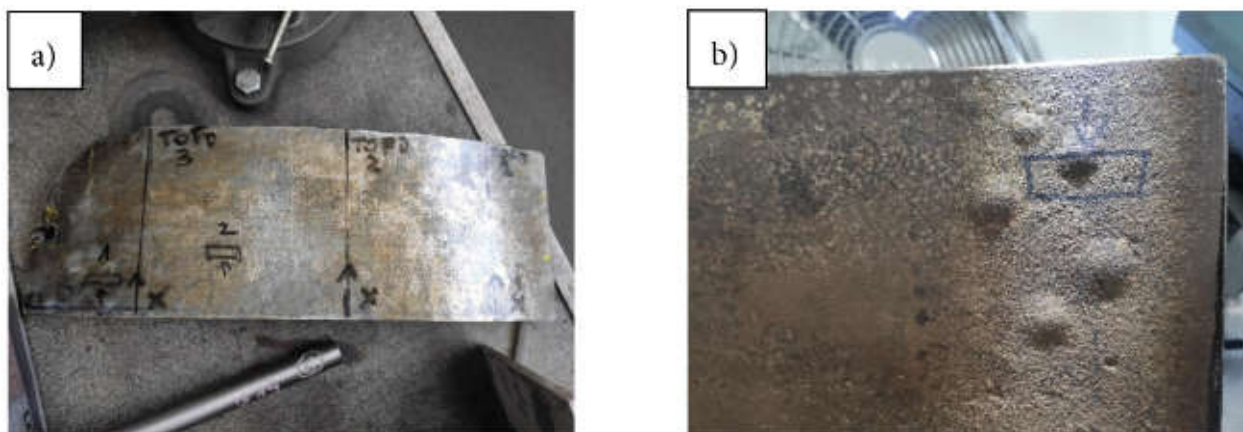
Technika TULA

W założeniu przeznaczeniem techniki TULA jest wykonywanie badań materiału rodzimego jako badania głowicą prostą fal podłużnych. Nominalna częstotliwość główna to 10 MHz, a szerokość pasma częstotliwości, w ujęciu 6dB spadku, jest charakterystyczna dla techniki TOFD. Szerokie pasmo częstotliwości przekłada się na wąski i krótki impuls, co wiąże się z poprawą rozdzielczości przestrzennej. Należy dodać, iż głowica w tej technice jest głowicą podwójną (nadawczo-odbiorczą), posiadającą 2 kryształy o kącie dachowym, różnym w zależności od typu głowicy. W ten sposób istnieje możliwość penetracji obszaru na różnych głębokościach, z różnym ogniskowaniem wiązki. Ze względu na dobrą rozdzielczość technika TULA dedykowana jest do wykrywania m.in. mechanizmu degradacji HTHA – High Temperature Hydrogen Attack. Jednak głowice można stosować do wykrywania każdego rodzaju nieciągłości [6].

Tab. 1. Skład chemiczny materiału użytego do budowy absorbera.

Tab. 1. Chemical composition of the material used in the construction of the absorber

Pierwiastek	Al	C	Cr	Cu	Mn	Ni	P	S	Si	Fe
Zawartość (wag.) [%]	≥ 0,02	0,14 – 0,22	≤ 0,30	≤ 0,30	≥ 0,55	≤ 0,30	≤ 0,045	≤ 0,045	0,15 – 0,35	reszta



Rys. 2. Zdjęcia przedstawiające wycinek płaszcza absorbera pobrany do dalszych badań; a – strona zewnętrzna, b – strona wewnętrzna aparatu.

Fig. 2. Photographs showing a section of the absorber shell taken for further study; a - outer side, b - inner side of the apparatus



Rys. 3. Schemat badania wycinka z zaznaczonym układem odniesienia

Fig. 3. Scheme of the sample examination with the reference system marked

3. Materiał do badań

Materiałem wykorzystanym w niniejszej pracy był wycinek płaszcza absorbera wodoru instalacji rafineryjnej, w którym prowadzony był proces oczyszczania gazów zasiarczonych. Rewizja wewnętrzna aparatu wykazała obecność pęcherzy wodorowych na powierzchni jednej z blach płaszcza. Ciśnienie robocze medium wynosiło 1,7MPa, natomiast temperatura 60°C. Urządzenie było wykonane ze stali St44K wg PN-H-84024: 1975. Skład chemiczny materiału przedstawiono w Tabeli 1.

Szczegółowym badaniom ultradźwiękowym poddano pobrany wycinek (~420x135x12mm) blachy płaszcza absorbera przedstawiony na Rys. 2. Po wewnętrznej stronie widoczne są pęcherze wodorowe.

4. Badania techniką Phased Array

Badanie techniką PA wykonano na zewnętrznej powierzchni wycinka blachy absorbera (X x Y – 420 x 135

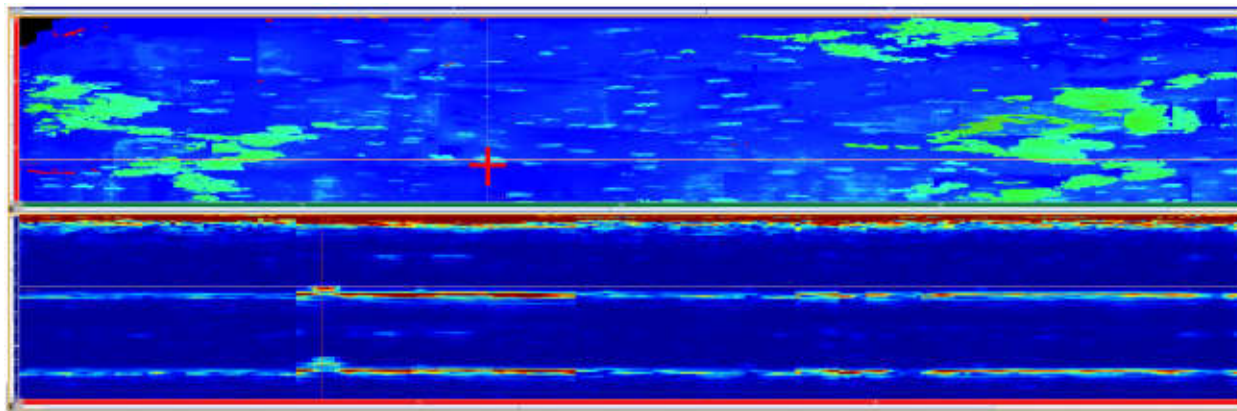
mm) wg schematu przedstawionego na rysunku 3. Rozdzielczość skanowania wynosiła X x Y – 1,0 x 0,6 mm. Zastosowano głowicę o 64 elementach o częstotliwości 10 MHz bez zastosowania klina opóźniającego. W celu poprawy rozdzielczości zastosowano ogniskowanie wiązki w drodze na głębokości 11 mm. Bramkę pomiarową ustawiono tak, aby wykrywane było pierwsze pojawiające się w niej echo.

5. Wyniki badań PA

Obszar występowania pęcherzy wodorowych (widocznych na rysunku 2) zaznaczono na rysunku 3. Wyniki badań PA ujawniły wskazania pochodzące od rozwarstwień pod pęcherzami widocznymi od strony wewnętrznej. Dodatkowo wykazały istnienie obszarów nieciągłości materiałowych o podobnych rozmiarach, gdzie pęcherze na powierzchni wewnętrznej nie były widoczne. Ich podobny charakter sugerował, że były to rozwarstwienia pod pęcherzami we wczesnym stadium powstawania. Dodatkowo można było

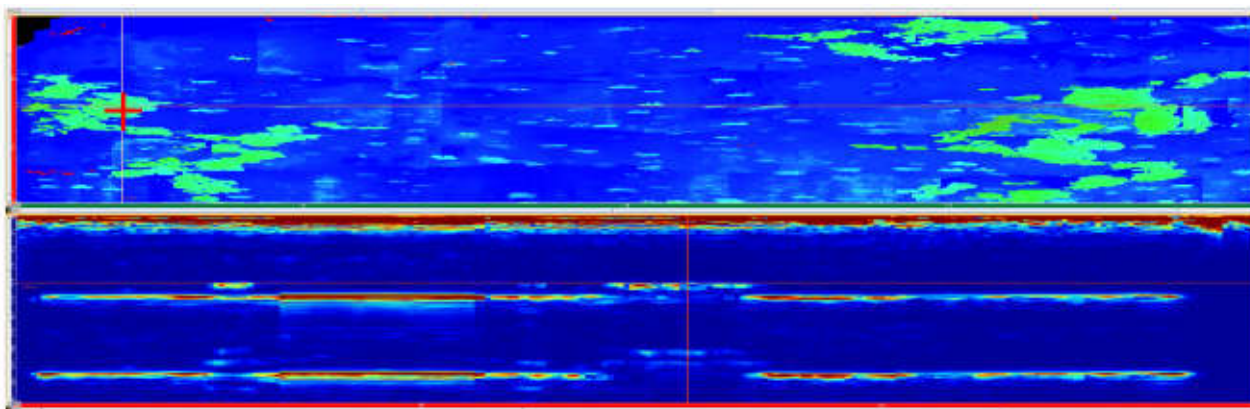
zaobserwować znaczną ilość dużo drobniejszych wskazań pochodzących od wad płaskich o znacznie mniejszych wymiarach, które można interpretować jako wady o charakterze produkcyjnym. Większość nieciągłości układała się równoległe do powierzchni skanowania, przyjmowało

kształt okrągły/owalny, co doskonale oddało zobrazowanie typu C (C-skan). Głębokość zalegania wszystkich nieciągłości wynosiła od ~9 do ~11 mm. Na rysunkach 4 - 6, przedstawiono uzyskane wyniki badań.



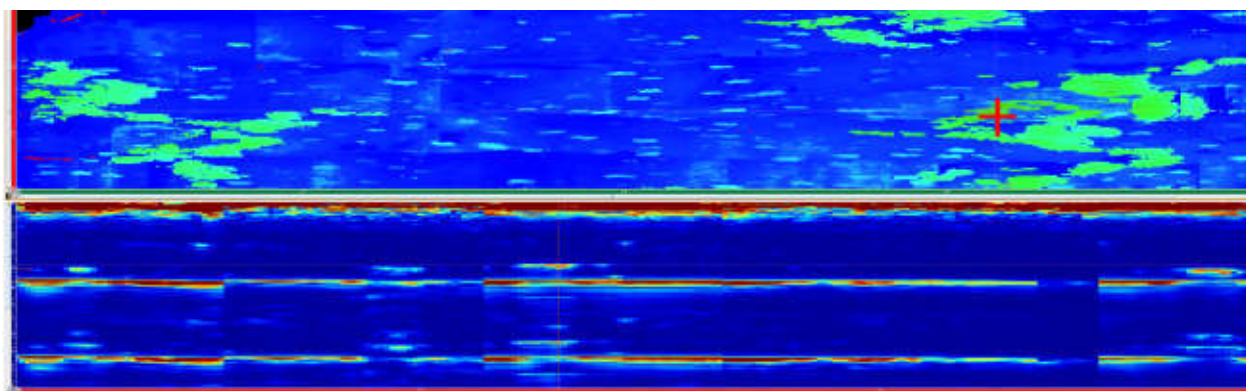
Rys. 4. Zobrazowania C-Skan, B-Skan, (w kolejności od góry) oraz widoczne wskazanie (zaznaczone czerwonym krzyżykiem) nakładające się na echo dna. X157;Y40;Z10,8 (mm)

Fig. 4. C-Scan, B-Scan, (in order from the top) and visible indication (marked with a red cross) superimposed on the bottom echo. X157;Y40;Z10.8 (mm)



Rys. 5. Zobrazowania C-Skan, B-Skan, (w kolejności od góry) oraz widoczne wskazanie (zaznaczone czerwonym krzyżykiem) nakładające się na echo dna. X43; Y73; Z10,1 (mm)

Fig. 5. C-Scan, B-Scan, (in order from the top) and visible indication (marked with a red cross) superimposed on the bottom echo. X43; Y73; Z10.1 (mm)



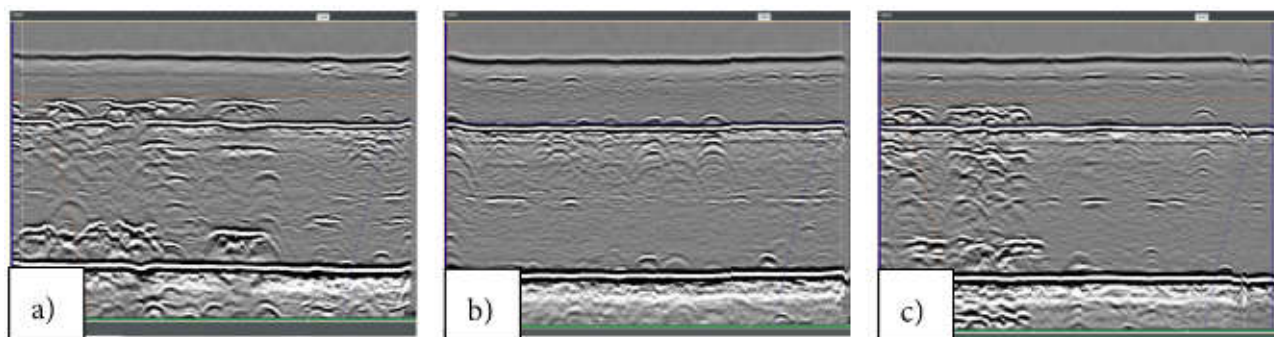
Rys. 6. Zobrazowania A-Skan, C-Skan, B-Skan, (w kolejności od góry) oraz widoczne wskazania, na głębokości 9,4 mm (zaznaczone czerwonym krzyżykiem) X314;Y64,7;Z9,4 (mm)

Fig. 6. Images of A-Skan, C-Skan, B-Skan, (in order from top) and visible indications, at a depth of 9.4 mm (marked with a red cross) X314;Y64.7;Z9.4 (mm)

Nr wskazania	Oznaczenie skanu	Położenie wskazania [mm]					Typ wskazania
		Początek	Długość	Głębokość		Wysokość	
		x	lx	z ₁	z ₂	h	
1	TOFD1	0	90	9,0	11,7	2,7	B
2	TOFD1	100	33	4,5	6,5	2	C
3	TOFD2	0	5	10	11,7	1,7	B
4	TOFD2	35	56	10,3	11,7	1,4	B
5	TOFD2	6	20	6	7	≤0,9	C
6	TOFD2	90	40	5,7	6,8	≤0,9	C
7	TOFD3	12	7	5,8	6,4	≤0,9	C
8	TOFD3	40	58	5,9	6,5	≤0,9	C
9	TOFD3	0	47	9,4	11,7	2,3	B
10	TOFD3	65	18	10,6	11,7	1,1	B

TYPY WSKAZAŃ: A – wskazanie wychodzące na powierzchnię skanowania, B – wskazanie wychodzące na powierzchnię przeciwną do powierzchni skanowania, C – wskazanie wewnętrzne

W badanym materiale na wszystkich skanowanych odcinkach występują dodatkowo wskazania punktowe



Rys. 8. Zobrazowania typu B uzyskane w liniach a - TOFD1; b - TOFD2; c - TOFD3

Fig. 8. Type B images obtained in lines a - TOFD1; b - TOFD2; c - TOFD3

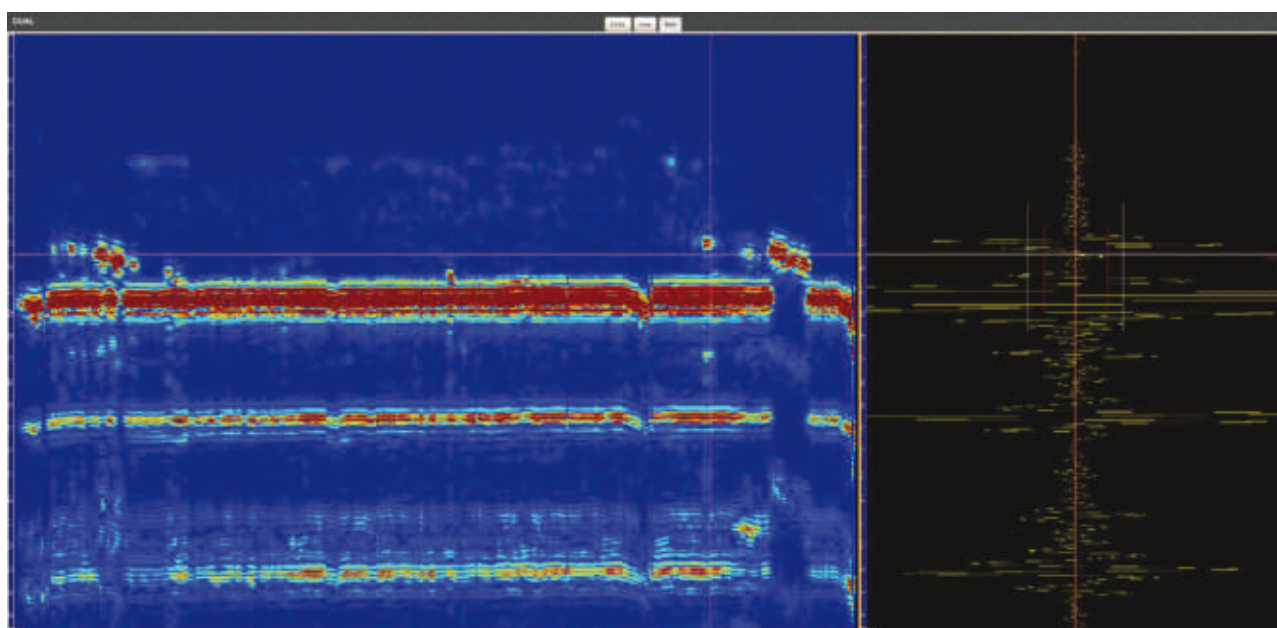
8. Badania techniką TOFD Ultra Low Angle (TULA)

Badanie zostało wykonane głowicą podwójną „TULA-B” o kącie wprowadzenia wiązki $0^\circ - 5^\circ$ i częstotliwości 10 MHz. Kąt pomiędzy przetwornikami, określony przez producenta, został dobrany tak, aby wiązka była ogniskowana na głębokości 10mm. Zastosowano ten sam schemat skanowania oraz ten sam układ współrzędnych co w przypadku techniki PA (patrz Rysunek 3). Bramkę pomiarową ustawiono na detekcję ze szczytu piksu maksymalnej amplitudy echa (max peak), co pozwoliło na określenie głębokości zalegania nieciągłości w danym miejscu.

9. Wyniki badań TULA

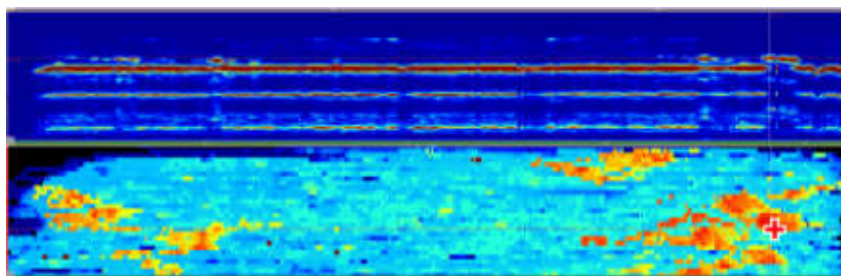
Podobnie jak w badaniu PA, w tym przypadku również ujawniono szereg ech o dużym zagęszczeniu pochodzących od nieciągłości materiałowych zorientowanych równolegle

do powierzchni skanowania, co dobrze jest widoczne na zobrażowaniu C-skan. Największe z nich zalegają pod widocznymi pęcherzami oraz z drugiej strony próbki, gdzie nieciągłości mają najprawdopodobniej charakter rozwarstwień (wczesne etapy powstawania pęcherzy). Tak jak w badaniu PA, na różnych głębokościach obserwuje się również echa o mniejszej amplitudzie, pochodzące najprawdopodobniej od nieciągłości materiałowych pochodzących z etapu produkcji blachy. Jednakże w przypadku tych badań należy zauważyć, że dużo łatwiejsze jest odróżnienie stadiów zaawansowania rozwoju pęcherzy wodorowych. W miejscach, gdzie pęcherze są już widoczne nieuzbrojonym okiem następuje całkowite przesłonięcie echa dna echem pochodzącym od nieciągłości. Natomiast w miejscach, gdzie badania ultradźwiękowe wykazują istnienie rozległych nieciągłości, a pęcherze nie są widoczne, echo dna nie jest całkowicie zasłonięte (patrz rysunki 9 - 12).



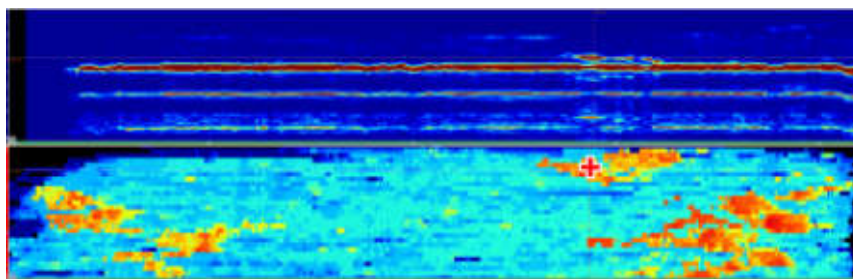
Rys. 9. B-Skan (przekrój w OY) str. lewa. A-Skan – zobrażowanie pojedynczej wiązki str. prawa. (X347;Y65)

Fig. 9. B-Skan (cross-section in OY) left side, A-Skan - single beam imaging right side. (X347;Y65)



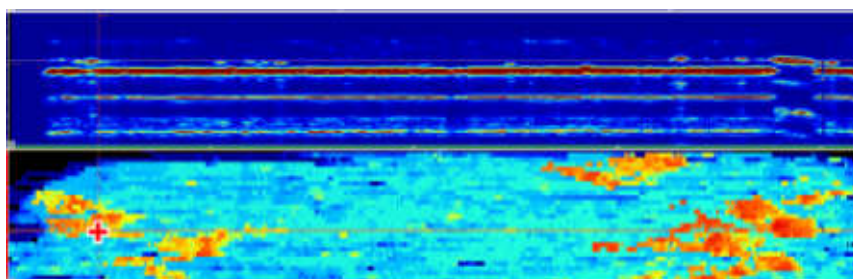
Rys. 10. Zobrazowanie B-skan i C-skan (od góry) – głębokość zalegania wady oznaczona kursorami 9,2 mm (X381;Y50)

Fig. 10. B-scan and C-scan imaging (from the top) - depth of the defect marked by the cursors 9.2 mm (X381;Y50)



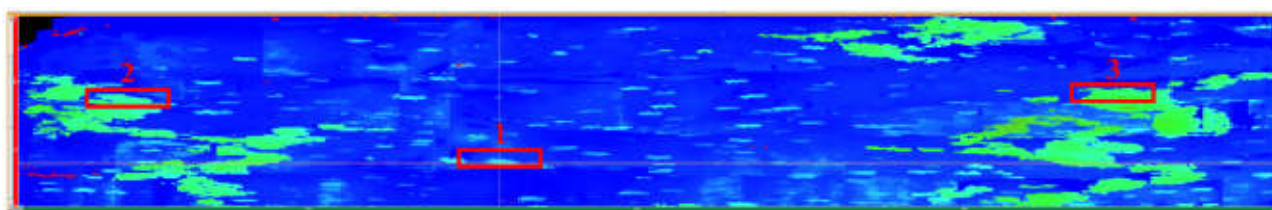
Rys. 11. Zobrazowanie B-skan i C-skan (od góry) głębokość zalegania wady oznaczone kursorami 9,4 mm (X288;Y115)

Fig. 11. B-scan and C-scan imaging (from top) depth of defect marked with 9.4 mm cursors (X288;Y115)



Rys. 12. Zobrazowanie B-Skan i C-Skan (od góry). Nieciągłość widoczna na zobrazowaniu B-Skan, pomiędzy kursorami głębokość zalegania 9,4 mm (X44;Y55)

Fig. 12. B-Skan and C-Skan imaging (from top). Discontinuity seen on B-Skan imaging, between cursors depth of 9.4 mm (X44;Y55)



Rys. 13. Obszary wybrane do badań mikroskopowych

Fig. 13. Areas selected for microscopic examination

10. Badania mikroskopowe

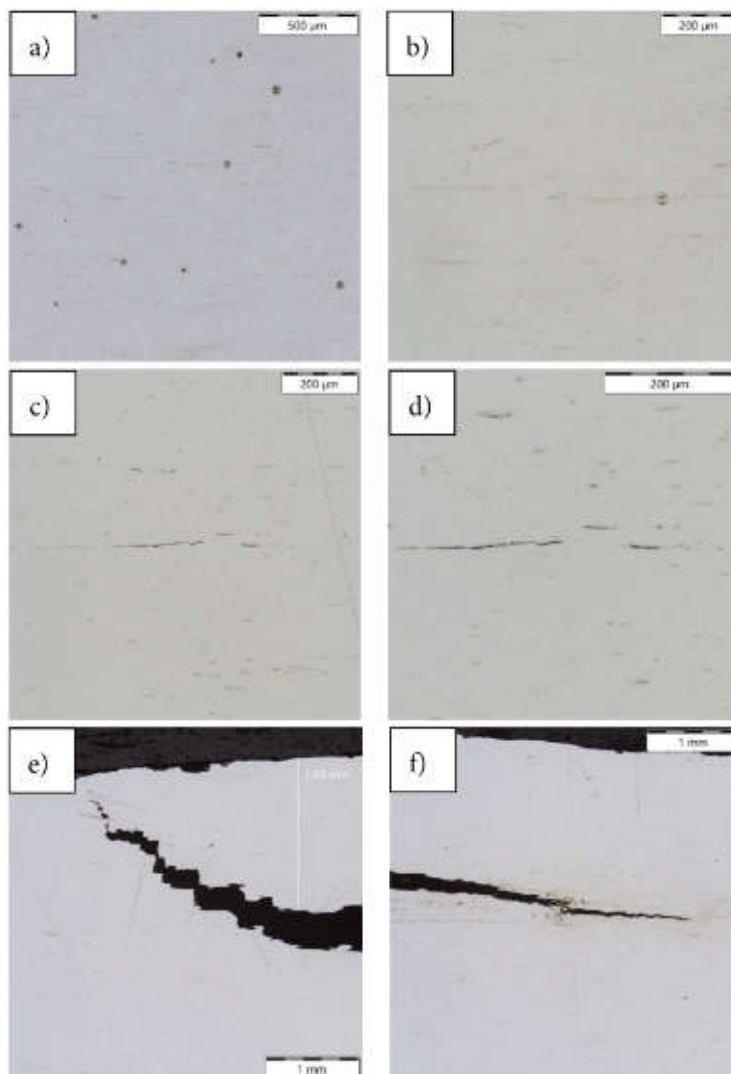
W celu weryfikacji wyników badań ultradźwiękowych w wytypowanych obszarach pobrano próbki i wykonano badania metalograficzne na ich przekroju. Wytypowane miejsca zaznaczono na poniższym rysunku.

11. Wyniki badań metalograficznych

Obserwacje przeprowadzone na próbce nr 1, w miejscu, gdzie badania ultradźwiękowe wykazywały dużą ilość drobnych wskazań, wykazały obecność znacznej ilości wtrąceń niemetalicznych różnych rozmiarów, niekiedy

tworzących skupiska, układających się wzdłuż kierunku walcowania blachy (równoległe do powierzchni). Zatem słuszną była interpretacja tych wskazań jako wad produkcyjnych.

Na zgładzie próbki nr 2 zaobserwowano liczne wtrącenia niemetaliczne oraz pęknięcia przebiegające wzdłuż wtrąceń, łączące się ze sobą i tworzące rozwarstwienia materiału. Prawdopodobnie są to pierwsze stadia tworzenia się pęcherzy wodorowych, w których ciśnienie gazu nie wzrosło jeszcze do poziomu powodującego odkształcenie plastyczne materiału i powstanie charakterystycznego wybrzuszenia.



Rys. 14. Wyniki badań metalograficznych wykonanych na przekroju próbki nr 1 (a, b), nr 2 (c, d), nr 3 (e, f); zglądy nietrawione
Fig. 14. Results of metallographic tests performed on the cross-section of sample No. 1 (a, b), No. 2 (c, d), No. 3 (e, f); non-etched specimens

W próbce nr 3 wyraźne jest już odkształcenie plastyczne materiału (wybrzuszenie pęcherza) oraz charakterystyczne schodkowe pęknięcie typowe dla wodorowych mechanizmów niszczenia metali. W pobliżu pęknięcia również obecne są skupiska wtrąceń niemetalicznych ułożonych równolegle do powierzchni blachy.

12. Podsumowanie i wyniki

Wszystkie przeprowadzone w tej pracy badania ultradźwiękowe wykazały występowanie wskazań pochodzących od nieciągłości materiałowych różnej wielkości i lokalizacji. Zastosowane techniki, dzięki zastosowaniu różnych form obrazowania graficznego i większej rozdzielczości, pozwoliły na znacznie łatwiejszą interpretację wyników niż miałyby to miejsce w przypadku zastosowania klasycznych badań ultradźwiękowych, z głowicą o pojedynczym przetworniku, opartych na analizie poszczególnych impulsów (zobrazowań typu A). Zastosowane różne rodzaje obrazowania pozwoliły nawet na określenie rodzaju i pochodzenia nieciągłości. Odróżniono nieciągłości pochodzące z procesu produkcyjnego od

nieciągłości powstałych w trakcie eksploatacji urządzenia, a nawet określono stadium powstawania uszkodzeń w formie pęcherzy.

Badania metalograficzne przeprowadzone na przekrojach poprzecznych blachy z różnego rodzaju nieciągłościami potwierdziły interpretację wyników badań ultradźwiękowych.

13. Bibliografia

- [1] M. Śmiałowski, Wodór w stali, WNT, 1961.
- [2] Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry, ANSI/API RP 571, 3rd edition, 2020.
- [3] [Online]. Available: <https://faculty.kfupm.edu.sa/me/hussaini/corrosion%20engineering/04.07.03.htm>. [Data uzyskania dostępu: 27 sierpień 2023].
- [4] Phased Array Testing: Basic Theory for Industrial Applications, Olympus, Third Edition, 2014.
- [5] Badania ultradźwiękowe techniką czasu przejścia wiązki dyfrakcyjnej, Materiały szkoleniowe UT2-TOFD, Instytut Spawalnictwa, 2018.
- [6] TULA technique. Innovation to solution, Lavender International NDT USA, LCC, 2018.

Karol Kaczmarek

Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, Ośrodek Szkolenia NDT.

Wymagania normy PN-EN ISO 9712 dla egzaminu praktycznego w sektorach przemysłowych

Requirements of the PN-EN ISO 9712 standard for practical examination in industrial sectors

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono interpretację wzbudzających dyskusje zapisów normy PN-EN ISO 9712:2022-09 w zakresie wymagań formalnych stawianych certyfikacji w sektorach przemysłowych. Analizie poddano zapisy definiujące sektor, sektor wyrobu i sektor przemysłowy oraz wymagania związane z ich tworzeniem. Autor stawia tezę o daleko idącej spójności wymagań PN-EN ISO 9712:2022 w porównaniu z poprzednim wydaniem normy PN-EN ISO 9712:2012 w zakresie wymagań dla praktycznej części egzaminu dla sektorów przemysłowych. Zdaniem autora, wbrew niektórym interpretacjom, norma nie zaostrzyła wymagań dotyczących liczby próbek wymaganej podczas egzaminowania, a nawet je nieznacznie zliberalizowała.

Słowa kluczowe: Badania Nieniszczące, NDT, certyfikacja personelu, ISO 9712

ABSTRACT

The article presents an interpretation of the controversial provisions of the PN-EN ISO 9712:2022-09 standard regarding formal requirements for certification in industrial sectors. The provisions defining the sector, product sector and industrial sector as well as the requirements related to their creation has been analysed. Author puts forward a thesis about the far-reaching consistency of the requirements of PN-EN ISO 9712:2022 compared to the previous edition of the PN-EN ISO 9712:2012 standard in terms of requirements for the practical part of the exam for industrial sectors. According to the author, contrary to some interpretations, the standard did not tighten the requirements regarding the number of samples required to be tested during examination, and even liberalized them slightly

Keywords: Non-destructive testing, NDT, certification of persons, ISO 9712

1. Wprowadzenie

Od momentu wprowadzenia normy PN-EN ISO 9712:2022-09 (ISO 9712:2021) prowadzona jest w Polsce dyskusja na temat interpretacji zapisów normy. Zagadnienie dotyczy w szczególności formalnych wymogów dotyczących liczby próbek egzaminacyjnych w przypadku certyfikacji w sektorze przemysłowym. Zagadnienie to powiązane jest bezpośrednio z interpretacją definicji sektora przemysłowego oraz jego formalnego i merytorycznego powiązania z sektorami wyrobu. Innym, równie ważnym zagadnieniem są wymagania normy PN-EN ISO/IEC 17024 stawiane jednostkom certyfikującym. Dopiero kompleksowa analiza ww. dokumentów, w kontekście wytycznych merytorycznych dla szkolenia personelu NDT podanych w ISO/TS 25107 oraz wytycznych dla próbek egzaminacyjnych podanych w ISO/TS 22809 pozwala na pełne zrozumienie przewidzianego przez ISO 9712 mechanizmu zapewniania kompetencji merytorycznych certyfikowanego personelu badań nieniszczących.

2. Czym jest sektor?

Norma PN-EN ISO 9712:2022-09 (ISO 9712:2021), podobnie do poprzedniego wydania PN-EN ISO 9712:2012,

definiuje pojęcie sektora jako:

„3.37 Sektor

Section of industry or technology where specialised NDT practices are used, requiring specific product-related knowledge, skills, equipment or training

Note 1 to entry: A sector can be interpreted to mean a product (welded products, castings) or an industry (aerospace, in service testing).”

Zgodnie z definicją sektor to określona gałąź przemysłu lub dział techniki, gdzie stosowane są wyspecjalizowane praktyki NDT wymagające określonych umiejętności, wiedzy związanej z wyrobem, wiedzy związanej z aparaturą lub specjalistycznego szkolenia. Dodatkowo norma precyzuje, że sektor może być rozumiany jako wyrób (np. złącza spawane, odlewy) lub gałąź przemysłu (np. lotnictwo i kosmonautyka, badania eksploatacyjne). W zdaniu zastosowano spójnik rozłączny „lub” (ang. „or”) – formalnie więc sektor powinien oznaczać sektor wyrobu lub sektor przemysłowy. Norma nie przewiduje na poziomie formalnym jakiegokolwiek sposobu łączenia ww. konstruktów. Powyższe stwierdzenie ma kluczowe znaczenie dla dalszych rozważań. W dalszej części artykułu przeanalizowane zostaną przykłady bezpośrednich różnic w wymaganiach formalnych dla obydwu typów sektorów.

Warto zwrócić uwagę, że pojęcie sektora jest zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 9712 powiązane z procesem

*Autor korespondencyjny.

E-mail:

certyfikacji, ale nie szkoleniem, które w myśl normy stanowi niezależny proces. W żadnym z dokumentów ISO nie ma wymogu stosowania podziału sektorowego w procesie szkolenia. Wręcz przeciwnie, norma mówi o szkoleniu w metodzie i stopniu (7.2.1). Sylabusy zawarte w ISO/TS 25107 również obejmują szeroki, związany z różnymi sektorami zakres wiedzy i z nim powiązane są zawarte w PN-EN ISO 9712 wymagania dotyczące minimalnego czasu szkolenia.

Norma PN-EN ISO 9712 pozwala na ograniczenie czasu szkolenia w przypadku działalności w ograniczonych zakresach (7.2.5 b) akceptując w takich przypadkach zmniejszenie czasu szkolenia o maks. 50%. Można argumentować, że ograniczenie zakresu sektorowego szkolenia (np. szkolenie ograniczone do jednego sektora wyrobu), stanowi podstawę do ograniczenia czasu szkolenia w oparciu o wspomnianą zasadę. W takim przypadku jednak powinna zostać przeprowadzona analiza wymagań merytorycznych i ograniczenie czasu szkolenia powinno być spójne z ograniczeniem zakresu merytorycznego, które z kolei powinno być zadeklarowane na zaświadczeniu o ukończeniu szkolenia (zarówno dokładny zakres merytoryczny jak i wymagany czas szkolenia podano w ISO/TS 25107).

3. Sektory wyrobu

W punkcie A.2. ISO 9712:2022 norma przedstawia listę zalecanych do użycia sektorów obejmującą między innymi: odlewy (c), odkuwki (f), złącza spawane (w), rury różnych średnic (t) i wyroby przerabiane plastycznie (wp). W normie wyszczególnione są również sektory obejmujące materiały kompozytowe, które nie będą szerzej analizowane w niniejszym artykule. Norma umożliwia ponadto tworzenie przez jednostkę certyfikującą sektorów dodatkowych (ISO 9712 A.1). Jednym z przykładów może być np. certyfikacja w obszarze badań eksploatacyjnych lin stalowych.

Z sektorami wyrobu powiązane są zalecenia dotyczące próbek egzaminacyjnych opisane w specyfikacji technicznej ISO/TS 22809:2007 (patrz ISO 9712 8.2.3.3). Raport jest kluczowy dla zrozumienia przyjętego w PN-EN ISO 9712 znaczenia pojęcia sektora wyrobu oraz pojęcia nieciągłości. W dokumencie przedstawiono opisy poszczególnych rodzajów wyrobów, w szczególności ich kształtu oraz dodatkowe informacje istotne w kontekście badania.

Sektor wyrobu jest stosowany w znaczeniu obiektu o specyficznych cechach (kształt, materiał) oraz specyficznym dla jego wytwarzania rodzaju spodziewanych nieciągłości. Nieciągłości eksploatacyjne są w dokumencie wydzielone jako niezależna grupa (załącznik f). Dla przykładu zapisy ISO/TS 22809:2007 p. 5.2 stanowią, że zbiór próbek sektora odlewy może zawierać: przekroje okrągłe, kołnierze, zmiany przekrojów i trójniki. Jako nieciągłości typowe dla sektora odlewy specyfikacja uznaje zarówno nieciągłości specyficzne dla technologii odlewniczych jak również te typowe dla napraw spawalniczych odlewów. Podsumowując, w ramach sektora wyrobu mieszczą się wyłącznie nieciągłości powstające na etapie wytwarzania. Nieciągłości eksploatacyjne tworzą niezależną grupę (załącznik f).

Dokument dzieli odlewy na grupy: odlewy z materiałów

ferrytycznych i odlewy ze stopów nieżelaznych oraz stali austenitycznych, co jest związane z możliwością badania metodą magnetyczną wyłącznie tych pierwszych. W dalszej części dokument wyróżnia ograniczoną listę nieciągłości, z podziałem na płaskie i przestrzenne oraz możliwe do wykrycia metodami powierzchniowymi i objętościowymi. Warto zwrócić uwagę, że dokument stosuje bardzo szerokie pojęcie „nieciągłości”. Nie wszystkie z wymienionych „nieciągłości” są w istocie nieciągłościami, gdyż na liście w przypadku odlewów znajduje się np. skurcz (podobnie w przypadku złączy spawanych „nieciągłościami” określane są niezgodności kształtu - gr. 5 wg ISO 6520-1). Specyfikacja ISO/TS 22809:2007 podaje również zalecenia dotyczące parametrów nieciągłości występujących w próbkach.

Dokument jest istotny z punktu widzenia certyfikacji personelu NDT między innymi z tego powodu, że umożliwia głębsze zrozumienie stosowanego w PN-EN ISO 9712 pojęcia sektorów wyrobu. Wskazuje ponadto na zakresy kompetencji badawczych, które powinny być związane z poszczególnymi sektorami wyrobu. Każdy rodzaj wyrobu posiada swoją specyfikę pod względem materiału, kształtu i spodziewanych nieciągłości. W wielu przypadkach stosowane są różne dokumenty normatywne zarówno związane z metodą badania jak również technikami ewaluacji i kryteriami akceptacji dla danego wyrobu.

Oczywiście specyfikacja ISO/TS 22809 nie narzuca formalnie ww. wymagań. Przeciwnie, powinna być raczej traktowana jako wyidealizowane zalecenia dotyczące próbek. Niemniej jednak, zdaniem autora, brak znajomości tego dokumentu uniemożliwia głębsze zrozumienie znaczenia stosowanego w PN-EN ISO 9712 pojęcia sektorów wyrobu. Warto zauważyć, że w normie PN-EN ISO 9712 znajdują się zapisy znacząco liberalizujące i „uprzątniające” zapisy ISO/TS 22809 omawiane w poprzednim akapicie. Norma ISO 9712 dopuszcza stosowanie, poza naturalnymi również nieciągłości sztucznych, jak i plików danych do oceny, radiogramów, filmów i zdjęć.

W przypadku certyfikacji w sektorach wyrobu norma wymaga, aby liczba badanych próbek była odpowiednia dla danego sektora oraz, żeby próbki były reprezentatywne dla jednego lub większej liczby sektorów symulując geometrię obszarów i zawierały nieciągłości reprezentatywne dla tych, które powstają w czasie wytwarzania lub eksploatacji (PN-EN ISO 9712 8.2.3.3). Warto zauważyć tu bezpośrednie odniesienie do zagadnień merytorycznych będących przedmiotem ISO/TS 22809, na który to dokument norma się powołuje. Warto również zwrócić uwagę, że w wielu przypadkach jedna próbka może symulować geometrię i rodzaj nieciągłości związanych z kilkoma typami wyrobów. Można argumentować, pomijając same zasady ewaluacji, że z punktu widzenia badania penetracyjnego odlew wykazuje w znacznym stopniu kształt i nieciągłości typowe również dla odkuwek (wykazuje również inne, które w odkuwkach nie występują). Podobnie, z punktu widzenia badania ultradźwiękowego złącza spawanego, dla którego wykonywane jest badanie wstępne na rozwarstwienia, wymagane umiejętności są zbliżone do tych wymaganych podczas badania blach na rozwarstwienie. W tych

przypadkach można argumentować, że nie zawarcie w zbiorach egzaminacyjnych próbek (odpowiednio odkuwki i blachy na rozwarstwienie) nie wpłynie negatywnie na jakość egzaminowania, gdyż kluczowe umiejętności niezbędne do przeprowadzenia badania są weryfikowane w badaniu innych wyrobów, a wiedza związana z badaniami może zostać zadowalająco sprawdzona poprzez inne części egzaminu (zawarcie w zbiorze próbek wszystkich typów wyrobów wg PN-EN ISO 9712:2022 nie jest formalnie wymagane).

4. Sektory przemysłowe

PN-EN ISO 9712 w p. A.3 definiuje i określa zasady stosowania sektora przemysłowego:

“Industrial sector

Sector combining number of product sectors including all or some products or specified materials (...).

When creating an industrial sector the certification body shall precisely specify in the published documentation the scope of the new sector concerned in terms of products, objects or item.

An individual certified in industrial sector shall be regarded also as holding certification in each sector from which industrial sector is composed”

Norma definiuje sektor przemysłowy jako sektor łączący kilka sektorów wyrobu, obejmujący wszystkie lub wybrane wyroby lub określone materiały. Norma podaje cztery standardowe sektory przemysłowe: wytwarzanie (m), badania przed i eksploatacyjne w tym wytwarzanie (s), utrzymanie ruchu kolei (r), lotnictwo (a). Nie wyklucza to możliwości tworzenia innych sektorów przemysłowych, poza wymienionymi w przypadku gdy stwierdzona zostanie taka potrzeba (patrz A.1).

Jak już wspomniano we wcześniejszej części artykułu, norma PN-EN ISO 9712:2022 wskazuje wyraźnie na dwie alternatywne interpretacje, zgodnie z którymi powinno być stosowane pojęcie sektor: sektor wyrobu lub sektor przemysłowy (PN-EN ISO 9712 p. 3.37). Zapisy normy wskazują, że sektor przemysłowy stanowi „połączenie” sektorów wyrobu (PN-EN ISO 9712 A.3). Ponadto jest on „tworzony” i jest „nowym” sektorem (PN-EN ISO 9712 A.1, A.3). Warto zwrócić uwagę, że norma wymaga, by osoba certyfikowana w sektorze przemysłowym była traktowana jako certyfikowana w każdym z sektorów wyrobu, z których składa się sektor przemysłowy (PN-EN ISO 9712 A.3). Gdyby sektor przemysłowy był jedynie grupą sektorów wyrobu i w każdym przypadku miały być stosowane wymagania formalne dla sektorów wyrobu, powyższe zapisy byłyby pozbawione jakiegokolwiek uzasadnienia. Wskazują więc one, że intencją zapisów normy jest by interpretować sektor wyrobu i sektor przemysłowy jako niezależne konstrukty formalne umożliwiające certyfikację dla określonych (węższych lub szerszych) zakresów obiektów badań. Mówiąc prościej, sektor przemysłowy jest konstruktem formalnym mającym uprościć sposób uzyskiwania certyfikacji w szerokim zakresie obiektów/wyrobów korzystając z wysokiego stopnia podobieństwa wymaganych kompetencji dla badań tych obiektów.

Certyfikacja w sektorze przemysłowym jest więc z formalnego punktu widzenia możliwością alternatywną w stosunku do certyfikacji w grupie sektorów wyrobu, z której utworzony został dany sektor przemysłowy. Z punktu widzenia posiadacza certyfikacji ta jest równoważna. Jednak pierwsza (udzielenie certyfikacji w sektorze przemysłowym) jak i druga możliwość (udzielenie certyfikacji w grupie sektorów wyrobu) różni się w zakresie wymagań formalnych stawianych jednostce certyfikującej (wymóg publikacji definicji sektora przemysłowego) jak i zasad egzaminowania kandydata (różna ilość wymaganych do zbadania próbek/obszarów podczas egzaminu).

Pojedynczy sektor wyrobu nie spełnia definicji sektora przemysłowego. Pojęcie sektora przemysłowego jest z definicji zarezerwowane wyłącznie dla przypadku, w którym jest on utworzony z większej liczby (kilku) sektorów wyrobu, w związku z czym przy pojedynczych sektorach wyrobu nie powinno być stosowane (PN-EN ISO 9712 A.3). Dla przykładu, określenie sektora „wytwarzanie - odlewy” nie posiada uzasadnienia. Przewidziany przez normę sektor „odlewy”, jako „sektor wyrobu” z definicji obejmuje wyłącznie badania wyrobów tzn. badania w celu wykrycia wad powstałych na etapie wytwarzania i nie trzeba tego dodatkowo podkreślać (patrz. ISO/TS 22809). Certyfikacja w sektorze odlewy (c) jest przy tym przykładem certyfikacji w sektorze wyrobu i powinna spełniać wszystkie przewidziane dla niej wymagania. Z drugiej strony „wytwarzanie” (m) to odrębny sektor (sektor przemysłowy, dla którego obowiązują inne wymagania formalne), obejmujący badanie wybranych próbek i określonego przez jednostkę certyfikującą, szerokiego zakresu wyrobów. Łączenie określeń „odlewy – wytwarzanie” wprowadza więc zupełnie nieuzasadnione zamieszanie i może prowadzić do błędów w rozumieniu zakresu wydanego certyfikatu.

Sektor „wytwarzanie” ogranicza się do badań w celu wykrycia wad powstałych na etapie wytwarzania. Dla odmiany sektor „badania przed i eksploatacyjne wraz z wytwarzaniem” (s) obejmuje zarówno badania na etapie wytwarzania jak i eksploatacji, z wyłączeniem badań eksploatacyjnych dla kolejnictwa oraz badań dla lotnictwa, które z powodu swojej specyfiki objęte są odrębnymi, przewidzianymi przez normę sektorami (odpowiednio (r) i (a)). Dla każdego, wprowadzonego przez jednostkę certyfikującą sektora przemysłowego wymagana jest publikacja zakresu objętego certyfikacją. Jako dobrą praktykę należy uznać informację o obiektach wyłączonych spod certyfikacji, w szczególności te wyłączenia, które wprost wynikają z regulacji zawartych w PN-EN ISO 9712 (załącznik A i F).

Podobne podejście jak dla ww. przypadków sektorów powinno zostać zastosowane również dla technik badawczych, które mają swoje specyficzne wymagania. W szczególności dotyczy to technik ultradźwiękowych PAUT i TOFD oraz różnych technik radiograficznych (RT-FD, RT-F, RT-D, RT-CT, RT-S, RT-FI, RT-DI, RT-FDI) dla których norma przewiduje specyficzne wymagania certyfikacyjne (PN-EN ISO 9712:2022 załącznik F).

Warto zwrócić uwagę na fakt, że proponowane przez normę

sektory przemysłowe wykazują wysoki poziom merytorycznej spójności. Norma nie przewiduje sektora łączącego np. badania rur na etapie wytwarzania z badaniami żelbetonu i pojazdów kolejowych podczas eksploatacji. Taki sektor byłby w oczywisty sposób merytorycznie niespójny, a wymagane kompetencje dla wymienionych podobszarów różniłyby się drastycznie. W ramach przewidzianych przez normę sektorów przemysłowych występuje wysoki poziom podobieństwa między poszczególnymi typami wyrobów, materiałów, warunków badań, stosowanych praktyk i dokumentów odniesienia. Powoduje to zbliżone wymagania kompetencyjne dla różnych typów wyrobów, co z kolei stawia pod znakiem zapytania konieczność praktycznego egzaminowania niezależnie w każdym rodzaju wyrobu. Dla przykładu, badania penetracyjne złącza spawanego, odkuwki i odlewu prowadzone przy pomocy tego samego rodzaju preparatów i techniki obserwacji są prowadzone w niemal identyczny sposób (np. penetrant zmywalny rozpuszczalnikiem, technika barwna). Z drugiej strony znaczące różnice występują w zależności od wybranej techniki badania. Wspomniane powyżej badania różnych typów wyrobów będą wymagały znacznie bardziej zbliżonych kompetencji niż ww. badania określonego typu wyrobu w porównaniu do badań tego samego wyrobu penetrantem później emulgowanym, wywoływaczem suchym proszkowym techniką fluorescencyjną. Różnica w wymaganych umiejętnościach praktycznych leży więc w tym konkretnym przypadku przede wszystkim w wybranej technice badania, a nie sensu stricto wyrobie.

5. Odpowiedzialność jednostki certyfikującej

Dla zrozumienia wymagań normatywnych stawianych jednostce certyfikującej, związanych z określaniem sposobu egzaminowania niezbędna jest analiza wymagań PN-EN ISO/IEC 17024:2012, stanowiącej normę akredytacyjną dla jednostek certyfikujących osoby. Jednostka certyfikująca ma obowiązek opracowania dla każdej kategorii certyfikacji programu certyfikacji i jednoznaczного określenia w nim następujących informacji:

- zakresu certyfikacji,
- opisu pracy i praktyk,
- wymaganych kompetencji,
- umiejętności w tym zdolności fizycznych (jeśli ma zastosowanie),
- warunków wstępnych (jeśli ma zastosowanie),
- kodeksu postępowania (jeśli ma zastosowanie).

Wiele z tych zagadnień zostało przynajmniej częściowo określone w PN-EN ISO 9712. Nie zdejmuje to jednak z jednostki certyfikującej obowiązku opracowania programu certyfikacji. Niektóre z ww. wymagań mogą być takie same dla poszczególnych stopni, metod i sektorów (np. kodeks postępowania). Inne natomiast zdecydowanie się różnią (np. wymagane kompetencje i umiejętności). Niemniej jednak powinny one zostać precyzyjnie określone w programie certyfikacji. Warto zwrócić uwagę na fakt, że wymagania kompetencyjne dla poszczególnych stopni w treści normy PN EN ISO 9712: 2022 określone zostały w sposób bardzo

ogólny (p.6). Norma odwołuje się do specyfikacji ISO/TS 25107, która precyzyjnie określa wymagania merytoryczne w zakresie szkolenia (powinny one stanowić również wymagania kompetencyjne dla egzaminowania, uwzględniając ograniczenia sektorowe).

Dla zapewnienia odpowiedniej jakości certyfikacji norma nakłada na jednostkę certyfikacyjną dodatkowe wymagania dotyczące tworzenia programu certyfikacji. Norma PN-EN ISO/IEC 17024 wymaga określenia:

- kryteriów certyfikacji początkowej i ponownej,
- metody oceny podczas certyfikacji początkowej i ponownej,
- metody i kryterium nadzoru (jeśli ma zastosowanie),
- kryteriów zawieszania i cofania certyfikacji,
- kryteriów zmiany zakresu lub poziomu certyfikacji (jeśli ma zastosowanie).

Warto zwrócić uwagę, że duża część z wymienionych kwestii jest ustalona w PN-EN ISO 9712. Norma nie określa jednak w pełni kryteriów certyfikacji i metod oceny a jedynie podaje minimalne wymagania w tym zakresie. Zobowiązuje przy tym jednostkę certyfikującą do zapewnienia, by liczba badanych podczas egzaminu próbek była odpowiednia dla stopnia, metody i sektora (PN-EN ISO 9712 p. 8.2.3.4), co powinno być rozumiane nie tylko jako spełnienie minimalnych wymagań podanych w załączniku B, ale szerzej, jako spełnienie wymagań PN-EN ISO/IEC 17024 dotyczących zapewnienia kompetencji certyfikowanej osoby.

PN-EN ISO/IEC 17024 wymaga od jednostki certyfikującej (8.4):

- udokumentowanego udziału w opracowywaniu programu certyfikacji odpowiednich ekspertów,
- identyfikacji warunków wstępnych, do wymagań kompetencyjnych,
- identyfikacji i dostosowania mechanizmów oceny,
- analizy pracy i praktyk,
- potwierdzenia mechanizmu oceny i zawartości egzaminu.

Warto zwrócić tutaj uwagę na duży nacisk normy na zapewnienie właściwego poziomu merytorycznego programu certyfikacji. W kontekście certyfikacji personelu NDT, gdzie wiele wymagań szczegółowych dotyczących programu certyfikacji podane jest wprost przez PN-EN ISO 9712, jedno z podstawowych zagadnień do określenia w ramach prac nad programem certyfikacji jest poprawne, bazujące na przesłankach merytorycznych zdefiniowanie sektorów (określenie zakresu oraz specyficznych, wymaganych w praktyce kompetencji i metod ich oceny), w szczególności poprzez właściwą konstrukcję egzaminu, dobór próbek i właściwe wymagania egzaminacyjne. Warto zwrócić uwagę na mechanizmy i struktury stosowane w zagranicznych jednostkach certyfikujących, mające na celu wypracowanie właściwego sposobu i wymagań egzaminacyjnych [2].

6. Wymagania PN-EN ISO 9712:2022 dotyczące próbek egzaminacyjnych

Wymagania formalne dotyczące liczby próbek egzaminacyjnych podano w PN-EN ISO 9712:2022 załączniku B.

„d) For the product sector related practical examination elements:

Candidates shall be required to test minimum two specimens and for multiple product sectors a minimum of one from each product sector.

e) For the industrial sector related practical examination elements:

Candidates shall be required to test at least two specimens, representative of products typically tested in the industrial sector.”

We wcześniejszym wydaniu PN-EN ISO 9712:2012 analogiczne zapisy podane były w formie tabeli (tablica B.1). Tabela podawała konkretne minimalne liczby próbek dla przewidzianych normatywnie sektorów, rozróżniając sektory wyrobu i sektory przemysłowe. W przypadku sektora „badania przed i eksploatacyjne” norma wymagała zbadania co najmniej trzech próbek oraz w przypadku większości metod podawała konkretne rodzaje wyrobów przemysłowych przewidzianych do zbadania podczas egzaminu. Rodzaj wymaganych przez normę próbek dla sektora badania przed i eksploatacyjne (tablica B.1) wskazuje, że podstawowym kryterium wyboru próbek była powszechność prowadzonych badań w przemyśle. Norma wymagała dodatkowo, aby w przypadku badania większej liczby próbek każda kolejna była różna od poprzednio zbadanych oraz, żeby w przypadku sektorów zawierających badania więcej niż jednego wyrobu, badane próbki były reprezentatywne dla wszystkich wyrobów lub były wybierane losowo przez egzaminatora z zakresu składającego się na sektor (tablica B.1).

Porównując wydania normy warto zwrócić uwagę, że sposób podania informacji zmienił się zupełnie (zmiana tabeli na zapisy tekstowe). Różnice wymagań nie są jednak zbyt duże i dotyczą dwóch zagadnień: zmniejszenia minimalnej liczby wymaganych próbek z 3 do 2 dla sektora „badania przed i eksploatacyjne” i sektora „lotnictwo” (UT, ET) oraz braku wprost podanych wymagań dla oceny wyników wcześniej przeprowadzonych badań, np. radiogramów (RT, AT). Wymagania dotyczące innych egzaminów pozostają zasadniczo bez zmian.

Należy zwrócić uwagę, że zapisy normy PN-EN ISO 9712:2022, podobnie do poprzedniego wydania, jednoznacznie rozróżniają egzaminy związane z sektorem wyrobu i egzaminy związane z sektorem przemysłowym, stawiając pomiędzy nimi wyraźną alternatywę. Dodatkowo norma określa kryterium selekcji próbek na potrzeby egzaminu w sektorze przemysłowym mówiąc o „dwóch próbkach reprezentatywnych dla wyrobów typowo badanych w sektorze przemysłowym” (załącznik B, e). Wskazuje to jednoznacznie na brak wymogu badania próbek reprezentatywnych dla wszystkich rodzajów wyrobów związanych z sektorem przemysłowym. Potwierdza to, że sektor wyrobu oraz sektor przemysłowy stanowią niezależne konstrukty formalne, poprzez które prowadzona może być

certyfikacja. Oznacza to jednocześnie, że zapisy podpunktu „d” mają zastosowanie wyłącznie w przypadku certyfikacji prowadzonej dla sektora wyrobu, a zapisy podpunktu „e” dla certyfikacji w sektorze przemysłowym.

Gdyby przyjąć, że sektory przemysłowe i sektory wyrobu nie stanowią alternatywnych konstruktów formalnych i w przypadku certyfikacji w oparciu o sektory przemysłowe zapisy podpunktu „d” mają być stosowane równocześnie z wymaganiami podpunktu „e”, zapisy podpunktu „e” były by zupełnie pozbawione znaczenia. Wynika to z prostego spostrzeżenia, że zapisy podpunktu „e” są przy takim podejściu dla każdej sytuacji łagodniejsze lub takie same jak wymagania podpunktu „d”. Usunięcie podpunktu „e” nie wpływałoby więc zupełnie na wymagania normy. Przy takim podejściu istnienie punktu „e” jest pozbawione jakiegokolwiek uzasadnienia. Zdaniem autora, stanowi to dodatkowy argument, że norma przewiduje dwie alternatywne ścieżki certyfikacji w sektorze wyrobu (wymagania „d”) lub sektorze przemysłowym (wymagania „e”). Tym samym norma nie przewiduje rodzaju sektora, dla którego wymagania „d” i „e” miałyby być stosowane jednocześnie.

W przypadku certyfikacji prowadzonej w sektorach wyrobu, jeśli zostanie pominięty fakt istnienia w wielu metodach NDT równoległe stosowanych technik badawczych, relatywnie łatwo można wykazać adekwatność weryfikacji całego zakresu kompetencji dla poszczególnych typów wyrobów poprzez wymóg zbadania podczas egzaminu każdego rodzaju wyrobu (PN-EN ISO 9712 załącznik B, d). Wytyczne dotyczące próbek i spodziewanych nieciągłości są dla tego przypadku dosyć precyzyjnie określone w ISO/TS 22809.

Pojawia się pytanie, czy zakres wymaganych podczas egzaminu technik badawczych jest w każdym przypadku adekwatny dla zapewnienia kompetencji wymaganych dla określonego zakresu certyfikacji. Zdaniem autora temu zagadnieniu w ISO 9712 nie poświęcono wystarczającej uwagi, nie formułując żadnych szczegółowych wymagań formalnych w tym zakresie. Nie zawsze bowiem stosowane w przemyśle techniki badawcze są przypisane do konkretnych rodzajów obiektów badań lub wyrobów, a często są stosowane alternatywnie. Prowadzi to do sytuacji, w której egzamin może zostać skonstruowany wadliwie w taki sposób, że wymaga w praktyce stosowania jednej, określonej techniki badania dla wszystkich badanych próbek, ograniczając zakres weryfikacji kompetencji do tej konkretnej techniki, podczas gdy do zdobycia pełnego, wymaganego w przemyśle zakresu kompetencji, niezbędna jest umiejętność posługiwania się szerszym zakresem technik badawczych w ramach metody. Oczywiście, prawidłowo przeprowadzona analiza kompetencji, która powinna być częścią programu certyfikacji i która obwarowana jest licznymi warunkami formalnymi z założenia powinna zapewnić adekwatny zakres ich weryfikacji podczas egzaminu kwalifikującego (wg EN ISO/IEC 17024:2012, w szczególności p.8.2 c, 8.4 d). Z tego właśnie powodu wymagania dotyczące programu certyfikacji, włączając wymagania dotyczące warunków jego tworzenia mają kluczowe znaczenie dla wiarygodności certyfikacji personelu NDT, tym bardziej obecnie, gdy coraz większą

odpowiedzialność w zakresie określania liczby i rodzaju próbek norma przekazuje jednostkom certyfikującym.

Dla przykładu, wymagania certyfikacyjne ASNT (The American Society For Nondestructive Testing) kładą na aspekt znajomości całego zakresu technik stosowanych w danej metodzie znacznie większy nacisk niż normy ISO. W badaniach penetracyjnych PN-EN ISO 9712, poprzez wymóg certyfikacji w sektorach, kładzie nacisk na różne rodzaje wyrobów/obiektów badań, nie formułując wymagań dla technik badawczych. ASNT wymaga natomiast wykonania podczas egzaminu badania różnymi technikami (penetrantami zmywalnymi rozpuszczalnikami, zmywalnymi wodą/samo emulgującymi i później emulgowanymi) [1].

W przypadku certyfikacji prowadzonej w sektorach przemysłowych, przyjmując zgodnie z podpunktem „e” (PN-EN ISO 9712, załącznik B), że od kandydata wymaga się zbadania co najmniej 2 próbek, adekwatność oceny kompetencji kandydata podczas egzaminu dla szerokich merytorycznie sektorów (sektorów przemysłowych) nie jest oczywista. Przypadkowo wybrane rodzaje próbek egzaminacyjnych i technik badania, a tym bardziej wybrane w oparciu o kryterium „wygody” nie zapewniają automatycznie adekwatnego poziomu weryfikacji kompetencji kandydata.

W załączniku B (PN-EN ISO 9712) wymagana jest minimalna liczba dwóch próbek dla sektora przemysłowego. Biorąc pod uwagę całokształt opisanych wymagań, ostateczna liczba próbek egzaminacyjnych powinna zostać określona przez jednostkę certyfikującą przy zachowaniu wszystkich wymagań PN-EN ISO 9712 i PN-EN ISO/IEC 17024.

Należy zwrócić uwagę na zmianę podejścia do sposobu selekcji próbek egzaminacyjnych. Norma PN-EN ISO 9712:2012 wymagała próbek reprezentatywnych dla całego spektrum wyrobów objętych sektorem przemysłowym w zbiorze próbek egzaminacyjnych i wykonania podczas egzaminu badań na wszystkich lub wybranych losowo próbkach (tabela B). Podejście PN-EN ISO 9712:2022 wymaga badania podczas egzaminu próbek reprezentatywnych dla wyrobów zazwyczaj badanych w danym sektorze (załącznik B, e). Oznacza więc brak wymogu posiadania w zbiorze próbek egzaminacyjnych próbek reprezentatywnych dla wszystkich wyrobów.

Kluczowy jednak pozostaje zapis PN-EN ISO 9712 zobowiązujący jednostkę certyfikującą do zapewnienia, aby liczba próbek była adekwatna dla poziomu, metody i sektora (p. 8.2.3.4). Podstawowe zagadnienie w tym przypadku stanowi zapewnienie nie tylko wymaganej formalnie liczby próbek (załącznik B), ale adekwatnego poziomu oceny kompetencji kandydata, zapewnienie którego należy do podstawowych obowiązków jednostki certyfikującej związanych z certyfikacją osób wg PN-EN ISO/IEC 17024. W szczególności ostatnie zagadnienie wymaga głębokiego, merytorycznego wglądu w zadania i wymagania kompetencyjne stawiane personelowi NDT w badaniach różnych wyrobów i/lub obiektów eksploatowanych, które powinno stanowić jedno z kluczowych zagadnień analizowanych podczas opracowywania programu

certyfikacji i wymaga udziału w pracach nad programem certyfikacji ekspertów, którzy posiadają głęboką znajomość merytorycznych aspektów badań nieniszczących (udział ekspertów, podobnie jak dostosowanie metod oceny do wymagań kompetencyjnych wymagany jest formalnie przez PN-EN ISO/IEC 17024 p. 8. 4). Poprzez zdefiniowanie zakresu certyfikacji, analizę zadań personelu NDT, wyodrębnienie wymaganych kompetencji, w tym umiejętności praktycznych i właściwy dobór zadań i próbek egzaminacyjnych możliwe jest zagwarantowanie odpowiedniego poziomu weryfikacji kompetencji, w tym wszystkich kluczowych umiejętności kandydata, przy jednoczesnym ograniczeniu liczby wymaganych do zbadania próbek egzaminacyjnych przez PN-EN ISO/IEC 17024 p. 8.1-8.4). W praktyce podejście takie oznacza konieczność przeprowadzenia wnikliwej analizy wymagań kompetencyjnych, określenia umiejętności, które powinny zostać zweryfikowane podczas części praktycznej egzaminu oraz innych kompetencji, które mogą zostać zweryfikowane w inny sposób (np. podczas opracowywania instrukcji lub w części specjalistycznej egzaminu).

Możliwe są różne podejścia spełniające wymagania analizowanych dokumentów. W oparciu o wyniki przeprowadzonej jak opisano powyżej analizy (zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO/IEC 17024) możliwe jest na przykład takie określenie zakresu i treści egzaminu, w tym taki dobór liczby i rodzaju próbek egzaminacyjnych, żeby wszystkie kluczowe umiejętności praktyczne sprawdzone zostały na ograniczonej liczbie próbek. Pozostałe kwalifikacje, w tym wiedza o wymaganiach i prawidłowym przebiegu badania szerszego spektrum wyrobów sprawdzona może zostać w części teoretycznej egzaminu. Innym sposobem ograniczenia liczby badanych przez kandydata próbek jest losowe przydzielanie próbek ze zbioru zawierającego wszystkie rodzaje wyrobów, które w PN-EN ISO 9712:2012 było jedną z przewidzianych przez normę możliwości (tablica B.2). PN-EN ISO 9712:2022 nie zawiera analogicznego zapisu, jednak nie zabrania również takiej możliwości. Odpowiedzialność za decyzję dotyczącą dostosowania metod oceny do wymagań kompetencyjnych leży po stronie jednostki certyfikacyjnej i powinna zostać określona w programie certyfikacji (PN-EN ISO/IEC 17024 p. 8.1-8.4).

Przykładowo, w ramach pracy nad programem certyfikacji można rozważyć, czy umiejętność badania penetracyjnego odkuwki może zostać zadowalająco potwierdzona poprzez zbadanie odlewu. Badania te wykazują dużo podobieństw a ewaluacja i ocena dla odkuwki jest zasadniczo łatwiejsza niż dla odlewu. Oczywiście, występują pewne różnice, w szczególności dotyczące metod ewaluacji i kryteriów oceny. Ich znajomość może jednak zostać sprawdzona nie tylko praktycznie, ale również poprzez pytania w części specjalistycznej (testowej) egzaminu. Jednocześnie złącze spawane nie powinno zostać wyeliminowane z egzaminu w sektorach przemysłowych (m) i (s), gdyż po pierwsze stanowi najbardziej powszechnie badany rodzaj wyrobu, po drugie wykazuje znaczące różnice w stosunku do badań zarówno odlewów jak i odkuwek.

Kierując się opisanym powyżej podejściem, w oparciu o

analizę zadań personelu UT2, jako kluczowe umiejętności praktyczne¹⁾ dla stopnia 2 w metodzie ultradźwiękowej (wyłączając zaawansowane techniki TOFD, PAUT, FMC/TFM, AUT, dla których dostępna jest niezależna certyfikacja), w sektorze „wytwarzanie” (m) można np. argumentować, że wymagane jest sprawdzenie umiejętności stosowania w praktyce ultradźwiękowych głowic prostych i kątowych, funkcji współczesnych defektoskopów (np. wykorzystywania bramek pomiarowych, obliczeń geometrycznych, tworzenia krzywych porównawczych), przeprowadzania skalowania, nastawy czułości DAC i DGS, prowadzenia oceny w oparciu o wysokość amplitudy, wymiary wskazania (długość, powierzchnię) oraz zanik echa dna.

W przypadku przyjęcia zdefiniowanych powyżej kluczowych umiejętności praktycznych badanie złącza spawanego oraz badanie odlewu mogłoby potencjalnie zostać uznane za wystarczające dla sektora wytwarzanie (m), gdyż weryfikuje całe spektrum zidentyfikowanych, kluczowych umiejętności (spełnia więc wymaganie PN-EN ISO/IEC 17024 w szczególności podpunkt 8.4 d) i jednocześnie bazuje na wyrobach powszechnie badanych w rozważanym sektorze oraz spełnia podstawowy warunek formalny – zbadania co najmniej dwóch próbek (PN-EN ISO 9712 załącznik B; e). Ponadto można argumentować, że konkretna wiedza dotycząca specyfiki i techniki badania innych rodzajów wyrobów (np. odkuwek, blach na rozwarstwienia itp.) wymaga tych samych kluczowych umiejętności. Jednocześnie wiedza, która dotyczy badań innych rodzajów wyrobów może zostać sprawdzona teoretycznie w części specjalistycznej egzaminu (pytania dotyczące dokumentów, techniki i kryteriów akceptacji dla szerszego zakresu badań) oraz częściowo podczas opracowywania instrukcji badania. Ostatecznie połączenie wszystkich umiejętności i wiedzy zweryfikowanej podczas całości egzaminu daje podstawy do prowadzenia wszystkich powszechnie spotykanych w ramach rozważanego sektora przemysłowego badań po ewentualnym, krótkim doszkoleniu.

Z drugiej strony, gdyby zaliczyć do umiejętności kluczowych (wymaganych do praktycznego sprawdzenia) umiejętność przeprowadzania nastaw i wykonania pomiarów grubości techniką ech wielokrotnych, co miałoby uzasadnienie w sektorze badania przed i eksploatacyjne (s), z racji częstego stosowania tej techniki w badaniach eksploatacyjnych, to mogłoby okazać się niezbędne zwiększenie liczby próbek do trzech.

Techniki bardzo niszowe, takie jak badanie rur podczas wytwarzania, badanie wyrobów przerabianych plastycznie innymi niż odkuwki przeprowadzane przez niewielki personel i które zazwyczaj wymagają dodatkowego przeszkolenia stanowiskowego w ramach specyficznych norm, innych przepisów i wyposażenia (np. stosowania systemów automatycznych), podobnie do innych niszowych technik badawczych (np. badań zanurzeniowych itp.) nie muszą być uwzględniane w części praktycznej egzaminu, nie stanowią obiektów „zazwyczaj badanych” w przemyśle (PN-EN ISO 9712 załącznik B; e).

W kontekście badań ultradźwiękowych warto zwrócić uwagę na techniki TOFD i PAUT. Norma PN-EN ISO

9712:2022 przewiduje ich wyłączenie jako oddzielnych kategorii certyfikacji, z tego powodu powinny one zostać jednoznacznie wyłączone spod zakresu certyfikatów w metodzie ultradźwiękowej (UT). Podobnie, w przypadku innych zaawansowanych technik ultradźwiękowych (AUT, FMC/TFM) jednostka powinna zdecydować czy są przedmiotem certyfikacji i co za tym idzie czy są w jakiś sposób objęte zakresem egzaminu, czy też są spod certyfikacji wyłączone. Niezależnie, która z opcji zostanie wybrana, dobrą praktyką jest precyzyjne określenie zakresu przyznawanej certyfikacji, również w kontekście technik.

Warto zwrócić uwagę na istotne zalety obecnie przyjętych zapisów wymagających stosowania podczas egzaminu próbek reprezentatywnych dla obiektów najczęściej badanych w przemyśle i przenoszących odpowiedzialność za ich dobór na jednostki certyfikujące. Na przykład, w przypadku techniki TOFD, która w praktyce stosowana jest głównie do badania złączy spawanych nowych jak i eksploatowanych (wykrywania uszkodzeń eksploatacyjnych, głównie w rurociągach, zbiornikach) oraz, która może być również stosowana do precyzyjnego wymiarowania pęknięć eksploatacyjnych system certyfikacji powinien zostać rozwinięty, w myśl obecnie wprowadzanej normy, o te właśnie najpowszechniejsze zastosowania, zamiast stosowania np. wymagań przewidzianych przez poprzednią normę dla konwencjonalnych technik ultradźwiękowych „c/f, w”, (tablica B.1).

Analogiczne podejście powinno zostać zastosowane w przypadku prostszych metod badawczych. Dla przykładu, w przypadku metody penetracyjnej kluczowym zagadnieniem jest mnogość i specyfika poszczególnych technik badawczych oraz ich ograniczenia. Kluczowe znaczenie ma kształt, wielkość i stan powierzchni badanych wyrobów, a nie konkretny rodzaj (odlew, odkuwka itp.), które to parametry wpływają bezpośrednio na wybór techniki i trudności występujące podczas badania. Rodzaj wyrobu sam w sobie wpływa głównie na sposób i kryteria oceny, a samo badanie, w przypadku stosowania dla różnych wyrobów tej samej techniki badania, właściwie się nie różni.

6. Różnice między PN-EN ISO 9712:2012 i PN-EN ISO 9712:2022 w praktyce

Przyjmując, jak wykazano wcześniej, że sektor wyrobu i sektor przemysłowy są niezależnymi konstruktami formalnymi, dla których stosuje się inne wymagania formalne, wymagania obecnie wprowadzanej normy PN-EN ISO 9712:2022 i poprzedniego wydania PN-EN ISO 9712:2012 w zakresie przeprowadzania egzaminu praktycznego są w większości przypadków zbliżone, w pozostałych zliberalizowane. Norma PN-EN ISO 9712:2012 (tablica B.1), analogicznie do PN-EN ISO 9712:2022 (załącznik B: d, e), podawała niezależnie wymagania dla certyfikacji w sektorach wyrobu i certyfikacji w sektorach przemysłowych. W PN-EN ISO 9712:2012 wymagania te zostały podane w postaci tabeli. W PN-EN ISO 9712:2022 analogiczne wymagania zostały podane w postaci zapisów tekstowych. Widać tutaj jednoznacznie kontynuację myśli pomiędzy normami. Główną różnicą pomiędzy wydaniem normy związaną z tematem niniejszego artykułu jest więc

sposób określenia wymagań dotyczących minimalnej liczby i rodzaju próbek. Poniżej, na przykładach, porównane zostaną wymagania obydwu dokumentów.

W tabeli PN-EN ISO 9712:2012 dla sektora wyrobu (np. złącza spawane w metodzie wizualnej VT). podano wymaganą liczbę 2 próbek. Porównując niniejsze wymaganie z zapisami PN-EN ISO 9712:2022 należy wziąć pod uwagę analogiczne zapisy załącznika B, podpunktu d, wymagające zbadania w analogicznej sytuacji co najmniej 2 próbek. Wymagana, minimalna liczba próbek jest więc dla tego przypadku identyczna.

Nieco inaczej wyglądałaby sytuacja w przypadku egzaminu obejmującego certyfikację w 2 różnych sektorach wyrobu. Zgodnie z ISO 9712:2012 wymagane byłyby 2 próbki dla każdego sektora wyrobu (sumarycznie 4 próbki). Zgodnie z zapisami PN-EN ISO 9712:2022 wymagana byłaby co najmniej 1 próbka dla każdego sektora (2 próbki). Podobnie dla 5 sektorów wyrobu odpowiednio 10 i 5 próbek. Jasne jest, że wymagania PN-EN ISO 9712:2022 w przypadku egzaminowania w zakresie kilku sektorów wyrobu są bardziej liberalne w porównaniu do wymagań PN-EN ISO 9712:2012. Podobna sytuacja występuje w przypadku sektorów przemysłowych, dla których w poprzednim wydaniu normy wymagane były dwie lub trzy próbki oraz określona liczba radiogramów lub danych AT (PN-EN ISO 9712:2012 tabela B.1). Zgodnie z obecną normą formalne wymaganie zredukowane zostało w każdym przypadku do dwóch próbek (PN-EN ISO 9712:2022 B, e). Wymagania więc zostały zliberalizowane.

W przypadku metody radiograficznej wg PN-EN ISO 9712:2012 dla pojedynczego sektora wyrobu wymagane są 2 próbki i 12 radiogramów. W przypadku zdawania egzaminu np. w 5 sektorach kandydat powinien wykonać więc 10 prześwietleń i ocenić 50 radiogramów – zadanie dosyć karkołomne w przypadku jednego egzaminu. Stanowi to argument za wprowadzeniem sektorów przemysłowych, które upraszczają proces uzyskania certyfikacji dla szerszej grupy wyrobów/ obiektów wymagających zbliżonych kompetencji.

Warto zwrócić uwagę, że w praktyce stosowano dla ISO 9712:2012 interpretację, że sektor przemysłowy utworzony z sektorów wyrobu wymaga stosowania wyłącznie zasad przewidzianych dla sektorów przemysłowych. Nie przypisywano tym samym zawartym w sektorze przemysłowym rodzajom wyrobów formalnej rangi sektora wyrobu. Jest to spójne z zapisami ISO 9712, która mówi o „tworzeniu” lub „rozwijaniu” sektorów ściśle w kontekście działań jednostki certyfikującej. Praktyka stosowania normy ISO 9712:2012 w Polsce i za granicą wskazuje więc na traktowanie sektorów przemysłowych i sektorów wyrobu jako konstruktyw formalnych rozwijanych ściśle na potrzeby certyfikacji. Odwrotnością tego podejścia było by traktowanie rodzaju wyrobu (np. odlewu) automatycznie jako sektora wyrobu i co za tym idzie konieczność stosowania w każdym przypadku zasad przewidzianych dla sektora wyrobu (tzn. np. dla RT2 badania przed i eksploatacyjne wraz z wytwarzaniem, tzw. multisector/general, konieczność wykonania 10 prześwietleń i oceny 50 radiogramów, gdyż

sektor ten został utworzony z 5 sektorów wyrobu).

Na powyższych przykładach można łatwo zauważyć, że zarówno w poprzednim wydaniu normy, jak i obecnym występują inne wymagania formalne dla certyfikacji prowadzonej w sektorach wyrobu i sektorach przemysłowych. Występuje w tym zakresie jednoznaczna kontynuacja.

Podsumowując niniejszą interpretację zapisów ISO 9712 warto podkreślić, że kluczowe, jest wzięcie pod uwagę wszystkich dokumentów powołanych jak i również innych dokumentów związanych ze stroną merytoryczną certyfikacji, oraz praktyk przemysłowych związanych z poszczególnymi rodzajami wyrobów. Dokumenty te budują kontekst, wyjaśniają znaczenie pojęć i zawierają wytyczne, które w efekcie budują spójny system wymagań.

Norma PN-EN ISO 9712:2022 umożliwia stosowanie różnych modeli certyfikacji. Możliwe jest rozwinięcie systemu certyfikacji z zastosowaniem wyłącznie sektorów wyrobu. Taki system może bez wątpienia zagwarantować wysoką jakość certyfikacji, może jednak okazać się skrajnie niepraktyczny i kosztowny, wprowadzając ok. 100 elementarnych zakresów certyfikacji personelu NDT (metoda/stopień/sektor wyrobu) i wymagając bardzo długich (niejednokrotnie wielodniowych) egzaminów.

Z tego powodu norma ISO 9712 daje jednostkom certyfikującym równoległe narzędzie w postaci sektorów przemysłowych, upraszczające proces certyfikacji dla szerszego zakresu wyrobów/obiektów, gdy wymagane są dla nich zbliżone wymagania kompetencyjne, co upraszcza proces zarówno od strony formalnej (mniejsza liczba możliwych zakresów certyfikacji i ich kombinacji) jak i praktycznej (krótszy czas egzaminowania, mniejsze niezbędne zasoby ośrodka egzaminacyjnego). Jednocześnie normy, w szczególności PN-EN ISO/IEC 17024 nakładają na jednostki certyfikujące wiele wymagań, które mają za zadanie zapewnienie wysokiej jakości świadczonych usług certyfikacyjnych, pomimo elastyczności określonego w rozważanych normach systemu wymagań. Zwiększa to jednak znaczenie zapisów PN-EN ISO/IEC 17024 określających wymagania proceduralne i formalne dla opracowania programu certyfikacji, który nabiera znacznie większego znaczenia dla wiarygodności udzielanej certyfikacji zgodnie z PN-EN ISO 9712 2022 w porównaniu z wcześniejszym wydaniem normy.

7. Wnioski

Z przedstawionych w artykule rozważań można wysnuć następujące wnioski:

1. Norma PN-EN ISO 9712:2022 zakłada możliwość prowadzenia certyfikacji w oparciu o dwa różne konstrukty formalne: sektor przemysłowy oraz sektor wyrobu, nakładając inne dla każdego z nich wymagania, w szczególności związane z minimalną liczbą próbek wymaganych do zbadania podczas egzaminu. Analogiczne podejście było zawarte we wcześniejszym wydaniu normy PN-EN ISO 9712:2012.

2. Sektory rozwijane są na potrzeby certyfikacji i z definicji związane są z określonymi wymaganiami kompetencyjnymi personelu NDT. Nie należy więc sektorów

automatycznie utożsamiać z grupami wyrobów od których pochodzą, a raczej z trybem uzyskiwania certyfikacji.

3. Znaczne ograniczenie liczby próbek w przypadku sektora przemysłowego w stosunku do liczby próbek wymaganych dla równoważnego zakresu sektorów wyrobu uzasadniony jest podobieństwem wymagań kompetencyjnych niezbędnych do prowadzenia badań NDT różnych wyrobów/obiektów objętych sektorem przemysłowym, które warunkuje uproszczenie procesu weryfikacji wymaganych kompetencji.

4. Pomiędzy PN-EN ISO 9712:2012 i PN-EN ISO 9712:2022 występuje znacząca różnica w formie zapisu wymagań dotyczących liczby próbek egzaminacyjnych (zamieniono tabelę na zapisy tekstowe). Wprowadzone zmiany zapisów PN-EN ISO 9712:2022 w zależności od przypadku prowadzi do utrzymania lub liberalizacji wymagań formalnych w zakresie liczby i rodzaju próbek egzaminacyjnych.

5. Liberalizacja zapisów normy PN-EN ISO 9712 związana z przeniesieniem dodatkowej odpowiedzialności za liczbę i rodzaj próbek na jednostkę certyfikującą wymaga zwrócenia większej uwagi na wymagania PN-EN ISO/IEC 17024 w odniesieniu do procedury tworzenia i wymagań formalnych dotyczących programów certyfikacji personelu NDT.

6. W celu zmniejszenia liczby próbek dla egzaminów prowadzonych dla sektorów przemysłowych, w stosunku do egzaminów prowadzonych w równoważnym zakresie sektorów wyrobu, z zapewnieniem właściwego poziomu weryfikacji kompetencji, może być stosowane między innymi eliminowanie próbek, w przypadku których niezbędne kompetencje są potwierdzane na innych próbkach i częściach egzaminu, eliminowanie próbek reprezentatywnych dla wyrobów rzadko badanych w przemyśle oraz losowy wybór próbek z szerszego zbioru próbek egzaminacyjnych.

8. Literatura

- [1] https://certification.asnt.org/Get_Certified/ACCP_Level_II/Examinations.aspx?
- [2] <https://www.bindt.org/>

9. Dokumenty normatywne

- PN-EN ISO/IEC 17024 Ocena zgodności; Ogólne wymagania dotyczące jednostek certyfikujących osoby,
- PN-EN ISO 9712:2012 Badania nieniszczące; Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących (wersja polska).
- PN-EN ISO 9712:2022-09 Badania nieniszczące; Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących (wersja angielska)
- ISO/TS 25107 Non-destructive testing – NDT training syllabuses
- ISO TS 25108 Non-destructive testing – NDT personnel training organisations
- ISO/TS 22809 Non-destructive testing – Discontinuities in specimens for use in qualification examination

Przypisy końcowe:

- 1) Jako kluczowe umiejętności w artykule rozumie się umiejętności, które wymagają sprawdzenia praktycznego podczas egzaminu. W tym sensie np. skalowane defektoskopu, wykreślanie krzywej DAC, podobnie jak wykorzystywanie obliczeń trygonometrycznych przy pomocy bramki pomiarowej dla głowicy kątowej można uznać za kluczowe umiejętności praktyczne. Z drugiej strony nastawianie czułości na reflektorze płaskodennym, ręczne wyznaczanie położenia krzywej DGS (OWR) i korzystanie z korekcji TCG można uznać za kompetencje, które praktycznego sprawdzania nie wymagają i wystarczające jest ich sprawdzenie poprzez pytania teoretyczne

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

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

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

ABSTRACT

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

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

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

1. Wstęp

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

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

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 przewodnicami do automatyzacji procesu skanowania spoin.

2.1 Symulacje wiązek ultradźwiękowych

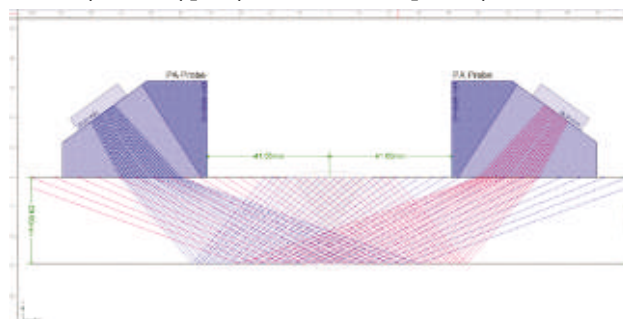
Korzystając z dedykowanego oprogramowania BeamTool v9 do symulacji wiązek ultradźwiękowych w badaniach nieniszczących, przeprowadzono badania mające na celu określenie pokrycia badania spoiny za pomocą typowych głowic Phased-Array z klinem o kącie 55° .

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

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

Obecnie, metodą state-of-the-art do skanowania spoin jest tryb „Compound”, który realizuje jednoczesne przesuwanie apertury nadawczej oraz odchyłanie 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 czola głowicy od osi spawu). W zależności od grubości blachy należy dobrać optymalną odległość głowicy od osi spoiny, co jak wykazano w symulacjach, było wystarczające do osiągnięcia pokrycia (Rys. 1).

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



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

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

2.2 Opracowanie procedury badań UTPA

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

Przed opracowaniem procedury wykonano następujące prace przygotowawcze:

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

Poziomy akceptacji.

- ISO-23279 — Badania ultradźwiękowe. Charakterystyka nieciągłości w spoinach.
- ISO-19285 — Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe techniką głowicy mozaikowej (PAUT). Kryteria akceptacji.
- ISO-17640 — Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe. Techniki, poziomy badania i ocena.
- ISO-11666 — Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe. Poziomy akceptacji.

- Opracowano wstępne wersje procedur sprawdzenia sprzętu oraz badań wyrobów metodą UTPA.
- Opracowano procedury badań wybranych wyrobów wież wiatrowych – tzw. scan-plany.

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

2.3 Walidacja na bazie próbek spoin

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

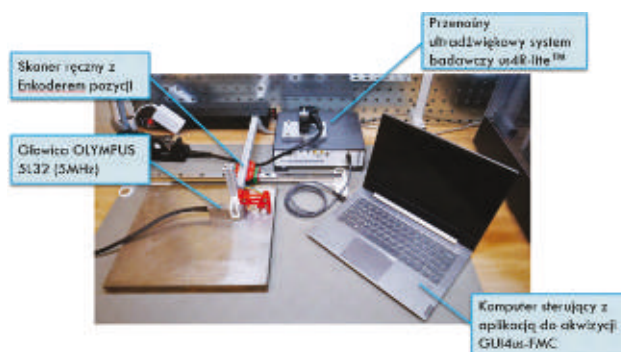
- 1) pęknięcia,
- 2) pustki,
- 3) wtrącenia stałe,
- 4) braki przetopu, przyklejenia,
- 5) niezgodności odchylenia kształtu,
- 6) pozostałe niezgodności spawalnicze.

W każdej z sześciu grup wad/niezgodności znalazło się od 28 do 30 modelowych próbek. Przy tworzeniu grup uwzględniono: 3 grupy asortymentowe 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 typoszeręgu 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



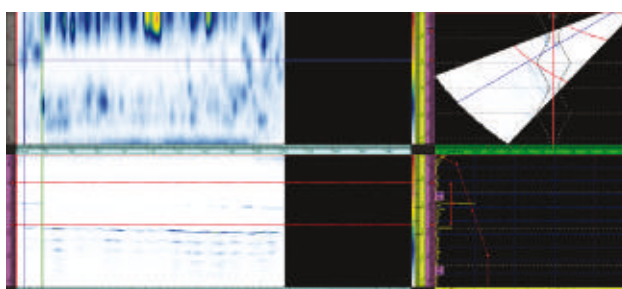
Rys. 2. Laboracyjny skaner badawczy us4R-lite do badań próbek spoin spawanych dla sekcji płaskich metodą UTPA-FMC.

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.

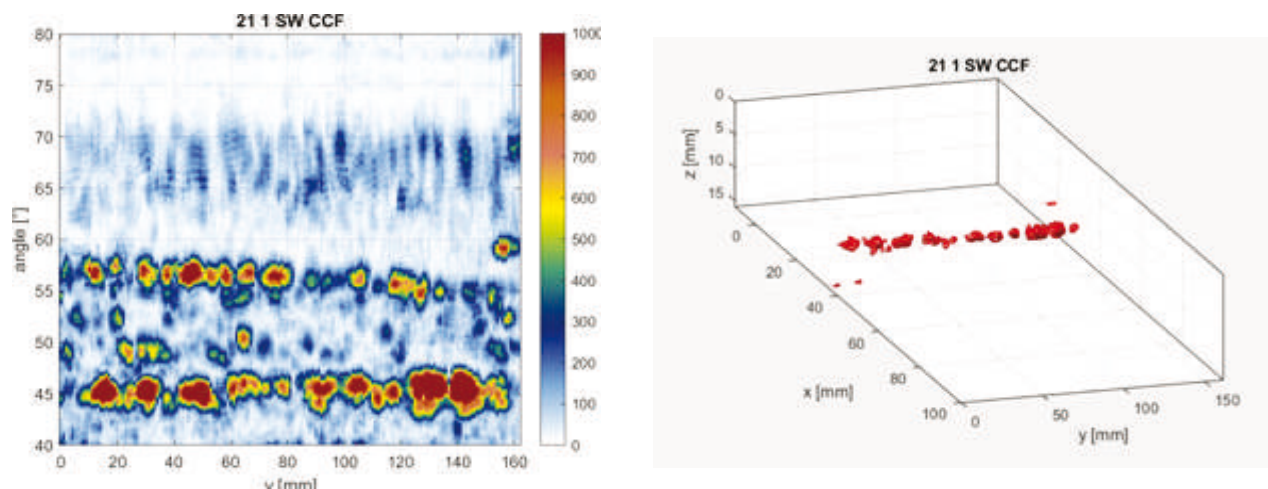
Stanowisko laboratoryjne posłużyło do zebrania zestawu danych FMC dla próbek spawów wykonanych i dostarczonych przez BO. Łącznie zebrano 134 zapisy (67 próbek zapisy dwustronne) o łącznej objętości ok. 350 GB danych surowych. Dane te były wejściem do algorytmów przetwarzania i analizy danych.

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

4. Podsumowanie

Na dzisiaj osiągnięto już w projekcie zakładane cele dotyczące wdrażania klasycznej metody UTPA do badań spoin spawanych sekcji wież wiatrowych. Obecnie trwają prace związane z montażem prototypowego stanowiska badawczego UTPA wraz z 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 Spytek¹, Kajetan Dziedzic¹, Łukasz Ambroziński¹, Łukasz Pieczonka^{1*}¹Akademia 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

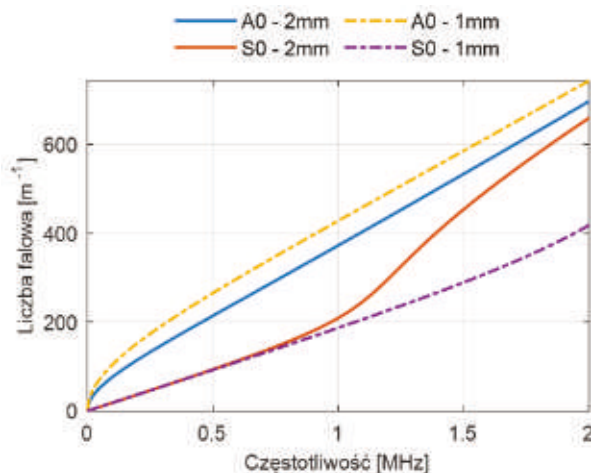
*Autor korespondencyjny.

E-mail: lukasz.pieczonka@agh.edu.pl

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.

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.

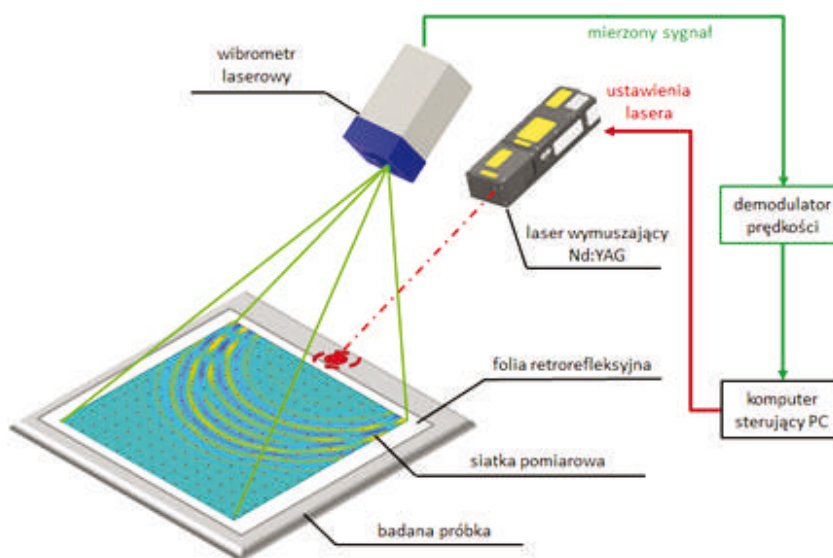


Rys. 1. Krzywe dyspersji płyty aluminiowej o grubości 2 mm i grubości 1 mm

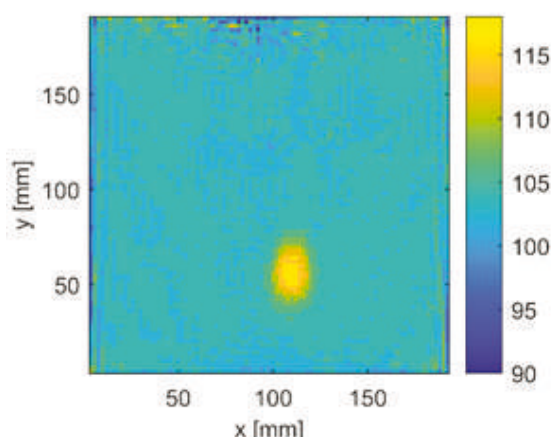
Zestaw pomiarowy wraz z opracowanym algorytmem estymacji lokalnej liczby falowej wykorzystano do detekcji uszkodzeń w dwóch strukturach płytowych: w jednorodnej płycie aluminiowej i w schodkowym demonstratorze wykonanym z laminatu kompozytowego CFRP (z ang. *Carbon Fiber Reinforced Polymer*).

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.

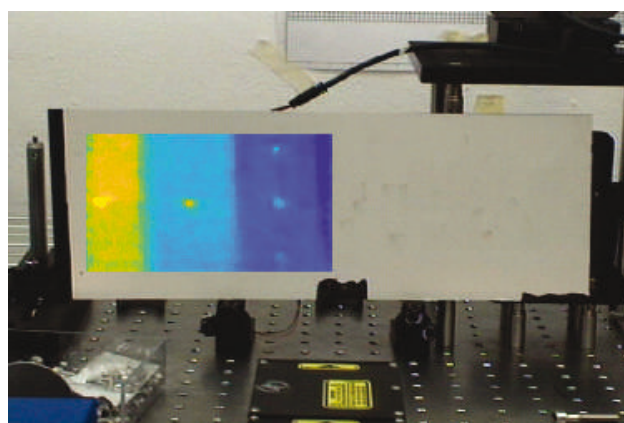
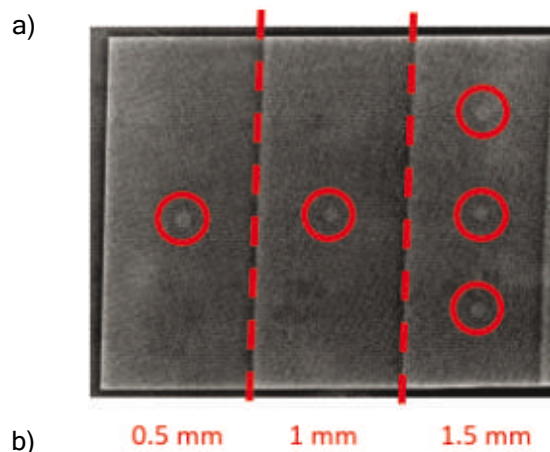
Demonstrator kompozytowy

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. Pomiedzy 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 mogą 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., Radziński, 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, Ł. Pieczonka, and Ł. 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, Ł. Ambrozinski, and Ł. 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

50. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących

Kołobrzeg, 17-20 października 2023

1. Advancing Non-Destructive Testing on a Global Scale: A Comprehensive Literature Review and Roadmap towards NDE 4.0 Integration

Autor: Babu, Sajeesh Kumar

Abstract: This paper presents a comprehensive exploration of the evolving landscape of advanced Non-Destructive Testing (NDT) methodologies on a global scale. Through an in-depth literature review, this study examines the trajectory of NDT techniques, highlighting key developments and emerging trends. In particular, the paper delves into the paradigm shift towards NDE 4.0, where traditional NDT methods seamlessly integrate with cutting-edge technologies and data-driven approaches. The abstract underscores the importance of harmonizing these advancements to optimize inspection processes, enhance defect detection capabilities, and ultimately contribute to safer and more efficient operations across industries. By synthesizing existing knowledge and identifying gaps, this paper charts a forward-looking path towards the seamless incorporation of NDE 4.0 principles, thereby paving the way for a new era of Non-Destructive Testing practices.

2. The future of NDT and the role of the EFNDT

Autor: Fermin Gómez Fraile

Abstract: Since its foundation, the EFNDT (European Federation for Non-Destructive Testing) is an organization that promotes the development and harmonization of non-destructive testing (NDT) techniques in Europe. The future of non-destructive testing (NDT) is promising, as these methods and techniques continue to be fundamental in the inspection and maintenance of critical infrastructures, products and components. As technology advances, adding new materials, new developments and new applications we are likely to see improvements in the efficiency, accuracy and scope of NDT techniques. AI, digitization, automation and data integration can play a very important role in the evolution of NDTs. EFNDT will continue to play an important role in facilitating cooperation, research and development in the field of non-destructive testing in Europe. The EFNDT will create and develop new working groups and new forums to develop these technologies and promote their standardisation and implementation in European industry.

3. The EFNDT since 1998 until 2023

Autor: Emilio Romero Ros

Abstract: A short description of the EFNDT creation, the presidents and the conferences held along these years followed by a presentation of the present EFNDT.

4. Czytanie oraz interpretacja normy ISO 17636-2 odnośnie cyfrowych badań radiograficznych DR z wykorzystaniem sztywnego panelu. Określanie odległości SDO, SDD, sprawdzanie panelu na podstawie wzorca IQI, określanie SNR, SRB (ang. Reading and interpretation of the ISO 17636-2 standard regarding digital radiographic DR examinations using a rigid panel. Determining SDO, SDD distances, checking the panel on the basis of the IQI pattern, determining SNR, SRB).

Autor: Lauri Westling,

CEO of PexrayTech, Finland

Streszczenie: Celem wykładu jest zrozumienie oraz właściwe czytanie normy dotyczącej badań RT z wykorzystaniem sztywnych, cyfrowych panelów detekcyjnych. Znalezienie różnic oraz poznanie zalet stosowania radiografii DR nad radiografią tradycyjną.

5. Context of modern image processing and digital radiography

Autor: Michal Kubinyi

Abstract: Modern digital radiography for casting or weld inspection can be traced nearly 20 years in the past. This is one generation in hardware but also in software development. The article aims to present development and results of time line from advanced 2D image processing thru 3D model processing up to the latest achievement in artificial intelligence used for real-time weld inspection. The article presents all necessary steps to fulfil requirement for industry 4.0 and further development of NDT processes into NDE solutions.

6. Dozymetria neutronowa (ang. Neutron dosimetry).

Autor: Maciej Budzanowski

*Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie,
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków
www.ifj.edu.pl*

Streszczenie: Promieniowanie neutronowe występuje w wielu dziedzinach a wytwarzane w aparaturze, w reaktorach jądrowych, termojądrowych oraz podczas wybuchów jądrowych, termojądrowych czy w bombach neutronowych. Strumienie neutronów wykorzystuje się w biologii, w medycynie w terapii boronowo-wchwytywowej BNCT, inżynierii materiałowej, w geologii i geofizyce, w przemyśle, nauce oraz szeroko do produkcji radioizotopów przemysłowych i medycznych. W nauce i technice wykorzystuje się szereg źródeł izotopowych ^{238}Pu -Be, ^{239}Pu -Be, ^{226}Ra -Be, ^{241}Am -Be, ^{227}Ac -Be czy rozszczepieniowe ^{252}Cf . Kolejne źródła neutronów to generatory neutronów z reakcjami d-t ($E_n=14$ MeV) czy d-d ($E_n=3$ MeV) oraz reaktory jądrowe energetyczne i naukowe. Neutrony są również produkowane w różnego rodzaju akceleratorach gdzie wykorzystuje się albo reakcje jądrowe np. α -n czy d-n oraz źródła spalacyjne gdzie przyspiesza się najczęściej protony do energii kilku megaelektronów i w wyniku reakcji z tarczami np. z ciężkiego metalu w otoczeniu uranu. Przykładem jest tutaj projekt European Spallation Source (ESS) gdzie jest zainstalowany akcelerator przyspieszający protony do energii 2 GeV a tarczą jest wolfram i dzięki temu otrzymano impulsowe źródło neutronów o największej na świecie świetlności. Detekcja neutronów nie jest standardowa ponieważ neutrony nie mogą wytwarzać pierwotnych jonów w komorze jonizacyjnej, liczniku proporcjonalnym czy liczniku Geigera-Mullera. Dotyczy to również detektorów półprzewodnikowych. Natomiast neutrony mogą przedostać się do zasięgu sił jądrowych i wywołać reakcję. Dlatego też detekcji neutronów dokonujemy poprzez różnego rodzaju reakcje jądrowe w wyniku których emitowane są cząstki alfa, protony, deuterony czy promieniowanie gamma. W przypadku detektorów gazowych używa się jako elementu mieszanki ^3He lub BF_3 wzbogacony w ^{10}B lub detektory gdzie elektroda pokryta jest materiałem rozszczepialnym i jonizacja następuje poprzez produkty rozszczepienia. Detektory scyntylacyjne do detekcji neutronów mają dodane do szkła lub plastiku izotopy ^{10}B lub ^6Li . Kolejne to pasywne metody aktywacyjne, z kliszą dozymetryczną a także detektory śladowe Cr-39, detektory termoluminescencyjne (TLD), fotoluminescencyjne (OSL) oraz wyjątkowe w swoim rodzaju detektory bąbelkowe. W pracy zostaną przedstawione także różne rozwiązania konstrukcyjne w dozymetrii neutronowej.

Abstract: Neutron radiation occurs in many fields and is produced in apparatus, in nuclear and thermonuclear reactors and during nuclear and thermonuclear explosions or in neutron bombs. Neutron fluxes are used in biology, medicine, boron-capture therapy (BNCT), materials engineering, geology and geophysics, in industry, science, and widely in the production of industrial and medical radioisotopes. In science and technology, a number of isotopic sources are used: ^{238}Pu -Be, ^{239}Pu -Be, ^{226}Ra -Be, ^{241}Am -Be, ^{227}Ac -Be or fission ^{252}Cf . Other sources of neutrons are neutron generators with d-t ($E_n=14$ MeV) or d-d ($E_n=3$ MeV) reactions, as well as power and scientific nuclear reactors. Neutrons

are also produced in various types of accelerators where either nuclear reactions, e.g. α -n or d-n, and spallation sources are used, where protons are usually accelerated to the energy of several megaelectrons and as a result of reaction with targets, e.g. made of heavy metal surrounded by uranium. An example here is the European Spallation Source in Sweden (ESS) project, where an accelerator accelerating protons to 2 GeV energy is installed and the shield is tungsten, thanks to which a pulsed neutron source with the world's highest luminosity was obtained. Neutron detection is not standard because neutrons can't produce primary ions in an ionization chamber, proportional counter or Geiger-Muller counter. This also applies to semiconductor detectors. On the other hand, neutrons can get into the range of nuclear forces and cause a reaction. Therefore, we detect neutrons through various types of nuclear reactions that emit alpha particles, protons, deuterons or gamma radiation. In the case of gas detectors, ^3He or BF_3 enriched in ^{10}B are used as an element of the mixture, or detectors where the electrode is covered with fissile material and ionization occurs through fission products. Scintillation detectors for neutron detection have ^{10}B or ^6Li isotopes added to glass or plastic. The next ones are passive activation methods, with dosimetric film as well as Cr-39 trace detectors, thermoluminescent (TLD), photoluminescent (OSL) detectors and unique bubble detectors (BD). The work will also present various design solutions in neutron dosimetry.

7. Poziomy dawek w przemyśle na podstawie pomiarów Laboratorium Dozymetrii Indywidualnej i Środowiskowej (ang. Dose levels in Industry based on measurements of the Individual and Environmental Dosimetry Laboratory).

Autorzy: Izabela Milcewicz-Mika, Anna Sas-Bieniarz, Ewelina Pyszka
AGH

Streszczenie: Rozwój nowoczesnych technik pomiarowych, konstrukcyjnych, wydobywczych i budowlanych sprawia, że zastosowanie promieniowania jonizującego w branży przemysłowej bardzo szybko rośnie. Zwiększa się też liczba osób narażonych na promieniowanie jonizujące, a co za tym idzie obowiązek prowadzenia ciągłego monitoringu narażenia zawodowego personelu ze względu na szkodliwy wpływ na zdrowie człowieka. W Laboratorium Dozymetrii Indywidualnej i Środowiskowej IFJ PAN (LADIS) prowadzone są pomiary dawek promieniowania jonizującego dla osób narażonych zawodowo przy pomocy nowoczesnych dawkomierzy TLD. LADIS wykonuje pomiary indywidualnego równoważnika dawki na całe ciało Hp(10), indywidualnego równoważnika dawki na dłoń Hp(0,07) oraz soczewki oczu Hp(3). Rocznie laboratorium wykonuje pomiary dla ponad 12 500 instytucji z całego kraju wliczając w to przemysł, medycynę, weterynarię a także wojsko. W przypadku dozymetrii całego ciała wykorzystywane są dawkomierze typu DI-02 pozwalające wyznaczyć indywidualny równoważnik dawki Hp(10) na głębokości d=10 mm informujący o narażeniu narządów wewnętrznych na promieniowanie jonizujące. Laboratorium LADIS stosuje w tym celu termoluminescencyjne detektory (TL) typu

MTS-N (LiF: Mg, Ti). W referacie przedstawione zostaną wyniki pomiarów indywidualnego równoważnika dawki na całe ciało Hp(10) przeprowadzone przez laboratorium LADIS w placówkach przemysłowych. Pomiary, dla których zostaną przedstawione dane dokonywane były w systemie kwartalnym. Na szczególną uwagę zasługują znaczne przekroczenia dopuszczalnych poziomów dawek.

Abstract: Development of modern measurement, construction and mining techniques causes that the use of ionizing radiation in the industrial sector is growing very quickly. The number of people exposed to ionizing radiation is also increasing, and thus the obligation to conduct continuous monitoring of occupational exposure of personnel due to the harmful effect on human health is increasing. The Laboratory of Individual and Environmental Dosimetry of the IFJ PAN (LADIS) conducts measurements of ionizing radiation doses for occupationally exposed persons with the use of modern TLD dosimeters. LADIS measures whole body individual dose equivalent Hp(10), individual dose equivalent for the skin Hp(0.07) and individual dose equivalent for the eye lens Hp(3). Every year, the laboratory performs measurements for over 12,500 institutions from all over the country, including industry, medicine, veterinary medicine and the army. In the case of whole body dosimetry, DI-02 type dosimeters are used to determine the individual dose equivalent Hp(10) at a depth of $d=10$ mm, informing about the exposure of internal organs to ionizing radiation. For this purpose, the LADIS laboratory uses thermoluminescent (TL) detectors of the MTS-N type (LiF: Mg, Ti). The paper will present the results of measurements of the individual dose equivalent for the whole body Hp(10) carried out by the LADIS laboratory in industrial facilities. The measurements for which the data will be presented were made on a quarterly basis. Significant excesses of acceptable dose levels deserve special attention.

8. Zaawansowane badania nieniszczące do oceny materiałów, w tym badania powierzchni i złożonych laminatów .

Autor: Jan Podgórski

"Shim-Pol A.M. Borzymowski", E. Borzymowska-Reszka, A. Reszka Spółka Jawna, 05-080 Izabelin, ul. Lubomirskiego 5

Streszczenie: Tradycyjne materiały, takie jak metale i tworzywa sztuczne, a także bardziej zaawansowane elementy, takie jak kompozyty, wymagają odpowiedniego badania w celu uzyskania lepszych właściwości materiału. Surowce muszą być weryfikowane pod kątem odpowiedniego składu. Gotowe produkty wymagają starannego testowania bez niszczenia, aby zminimalizować koszty i czas produkcji. Zaawansowane materiały mają bardzo specyficzne wymagania produkcyjne, których nieprzestrzeganie może powodować błędy i wady w produkcie końcowym. Techniki badań nieniszczących ewoluowały wraz z zaawansowanym oprogramowaniem do analizy danych, aby spełnić te wymagania. Techniki, które zostaną zaprezentowane, obejmują rozwiązania fluoroskopowe, tomograficzne i ultradźwiękowe. Techniki te wraz z wydajnym przetwarzaniem danych mogą łatwo zidentyfikować problemy jakościowe, takie jak wykrywanie pustek, pęknięć i rozwarstwień, które mogą wystąpić podczas procesów

produkcyjnych. Właściwa identyfikacja tych nieprawidłowości może poprawić jakość materiałów, obniżyć koszty, zapewnić bezpieczeństwo i wydłużyć trwałość gotowych produktów.

9. Wieloźródłowa inspekcja materiałów kompozytowych (ang. Multisource Inspection of Composite Materials).

Autorzy: Tomasz Chady, Ryszard Łukaszuk, Marek Żwir, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Streszczenie: Kompozyty powstają z połączenia przynajmniej dwóch materiałów różniących się od siebie właściwościami fizykochemicznymi. Posiadają one niezwykle korzystne właściwości, takie jak np. możliwość łatwego dopasowania do stawianych wymagań projektowych, odporność na korozję, wibracje, zmęczenia, niewielka masa, duża wartość wytrzymałości w stosunku do grubości oraz niewielki współczynnik rozszerzalności temperaturowej. Kompozyty znalazły zastosowanie w sektorze obronnym (korpusy rakiet), motoryzacyjnym (zderzaki, zbiorniki paliwowe), energetycznym (rurociągi, łopaty turbin wiatrowych), budowlanym (zbrojenia, instalacje hydrauliczne), stoczniowym (pokłady, śruby napędowe) czy lotniczym (stateczniki, zbiorniki paliwowe). Kompozyty, podobnie jak rozpowszechniona od wielu lat stal konstrukcyjna, narażone są na niekorzystne czynniki zewnętrzne, mogące pojawić się na etapie produkcji, eksploatacji a nawet prac konserwacyjnych. Z tego powodu konieczne jest wykonywanie regularnej oceny stanu kompozytów za pomocą badań nieniszczących. Ze względu na specyfikę właściwości kompozytów (anizotropia, niejednorodność, mniejsza przewodność w porównaniu ze stalą), brak jest jednej uniwersalnej metody badawczej. Odpowiedzią na ten problem są badania wieloźródłowe. Referat przedstawia krótką charakterystykę metod: termograficznej, terahercowej i radiograficznej cyfrowej, wyniki badań kompozytów wzmacnianych włóknami szklanymi za pomocą wspomnianych metod, porównanie uzyskanych wyników badań oraz ocenę przydatności wieloźródłowego podejścia do inspekcji kompozytów.

10. Badania ultradźwiękowe Phased Array zaczepów choinkowych stopek łopat stopni L-0 po stronie turbiny i generatora w elektrowni jądrowej w Szwecji (ang. Ultrasonic Phased Array inspection of fir-tree blade roots on L-O stages, both turbine and generator sides in nuclear power plant in Sweden).

Autorzy: Mateusz Cybulski, Marek Lipnicki, Krzysztof Mroczek, Rafał Obląkowski

Koli Sp. z o.o.

Streszczenie: W referacie autorzy przedstawiają prace badawczo-rozwojowe zmierzające do opracowania systemu ze skanerem i głowicą PA, procesu walidacji, procedury badawczej oraz wykonanie badań zaczepów choinkowych, łukowych stopek łopat zamontowanych na wirnikach NP turbiny podczas postępu remontowego w elektrowni jądrowej w Szwecji

11. Analiza stanu jakości oraz naprężeń wewnętrznych wykrojów ze stali w gatunku CP/DP1000 dla motoryzacji (*ang. Analysis of the quality and residual stresses of CP/DP1000 steel sheets for the automotive industry*).

Autorzy: Liwia Sozańska – Jędrasik¹, Zofia Kania – Pifczyk¹, Krzysztof Radwański¹, Roman Kuźniak¹, Janusz Kliś², Rafał Nawrat², Jakub Olbrych², Michał Węgrzyniak², Damian Szydło², Grzegorz Toczek²

1) Sieć Badawcza Łukasiewicz - Górnośląski Instytut Technologiczny

2) ArcelorMitt Distribution Solution Poland Sp. z o.o.

Streszczenie: Znajomość wielkości stanu naprężenia w materiałach do dalszego przerobu jest zagadnieniem bardzo istotnym z punktu widzenia technicznego. Wartość naprężenia szczątkowego jakie występuje w półwyrobach stalowych determinuje możliwości ich dalszego zastosowania w procesach produkcyjnych. Wielkość naprężenia a zwłaszcza różnica naprężenia pomiędzy górną i dolną powierzchnią blachy jaki występuje w materiale wpływa na jego własności, zwłaszcza na płaskość wyrobu. Celem pracy była analiza stanu jakości oraz naprężeń wewnętrznych wykrojów blach ze stali w gatunku CP/DP1000 przeznaczonych dla przemysłu motoryzacyjnego. Analiza objęła: badanie różnicy naprężenia pomiędzy górną i dolną powierzchnią wykroju, składu chemicznego, własności mechanicznych, struktury oraz płaskości. Badania naprężeń szczątkowych wykonano dwoma metodami: $\cos(\alpha)$ oraz z wykorzystaniem zjawiska Barkhausena. Przeprowadzono ocenę porównawczą wyników uzyskanych podczas pomiarów naprężeń dwoma metodami $\cos(\alpha)$ oraz z wykorzystaniem zjawiska Barkhausena, która potwierdziła zgodność obu metod dla stali w gatunku CP/DP1000 oraz potwierdziła możliwość zastąpienia metody $\cos(\alpha)$ metodą z wykorzystaniem zjawiska Barkhausena dla tego gatunku stali.

12. Porównanie wybranych technik mapowania korozyjnego (*ang. Comparison of selected corrosion mapping techniques*).

Autor: Andrzej Wójtowicz

Streszczenie: Prezentacja ma na celu przybliżenie problematyki związanej z diagnostyką za pomocą badań nieniszczących zniszczeń korozyjnych elementów eksploatacyjnych. Tematem przewodnim jest porównanie metody mapowania korozyjnego metodą UT PA z metodą RT techniką cyfrową w oparciu o konkretne wyniki badań.

Abstract: The presentation is aimed at introducing the problems related to diagnostics by means of non-destructive testing of corrosion damage of operating elements. The topic guiding theme is the comparison of corrosion mapping method by UT PA method with RT method by digital technique based on specific test results.

13. Analiza dynamiki przebiegu procesu magnesowania na potrzeby oceny właściwości powierzchniowych wybranych stali ferromagnetycznych (*ang. Analysis of the magnetization process dynamics for the need of evaluating the surface properties of selected ferromagnetic steels*).

Autorzy: Grzegorz Psuj, Michał Maciusowicz

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Centrum Inżynierii Pól Elektromagnetycznych i Technik Wysokich Częstotliwości Al. Piastów 17, 70-310 Szczecin

Streszczenie: Ferromagnetyk składa się z mikroobszarów spontanicznego, jednorodnego namagnesowania, zwanych domenami magnetycznymi. W trakcie magnesowania ferromagnetyka układ domen zmienia się, a na przebieg tego procesu wpływ ma wiele czynników. Najistotniejszym z nich jest stan struktury krystalicznej materiału. Niejednorodności struktury krystalicznej powodują, że proces zachodzi skokowo, a efekt ten nazywany jest zjawiskiem Barkhausena. W celu kształtowania wymaganych właściwości (mechanicznych lub magnetycznych) stali, w zależności od obszaru jej zastosowania, sieć krystaliczną można poddać modyfikacji. Jednym ze sposobów jest zmiana właściwości powierzchniowych materiału z zastosowaniem metod inżynierii, np. walcowania, laserowania czy azotowania. Działania te w efekcie wpływają na przebieg reorganizacji struktury domenowej. Narzędziem pomocnym w badaniu tego procesu jest obserwacja zjawiska Barkhausena. Analiza jego dynamiki umożliwić może ocenę właściwości stali ferromagnetycznych.

W pracy tej przedstawione zostaną wyniki badań dynamiki przebiegu zjawiska Barkhausena przeprowadzone na potrzeby oceny właściwości powierzchniowych stali ferromagnetycznych kształtowanych z zastosowaniem wybranych metod inżynierii powierzchni. W celu obserwacji przebiegu zachodzących zmian wykorzystano analizę czasowo-częstotliwościową TF do badania sygnału magnetycznego szumu Barkhausena. Zaproponowano nowe algorytmy i procedury przetwarzania tego sygnału, w tym także ekstrakcji cech TF. Zaproponowane podejście umożliwia jednoczesną obserwację przebiegu zarówno w czasie jak i w częstotliwości, co pozwala na pełniejsze zobrazowanie zmian zachodzących w trakcie procesu magnesowania.

14. Systemy jakości w procesie wytwarzania konstrukcji spawanych, a wymagania dotyczące kontroli i badań – wybrane aspekty (*ang. Quality systems in the manufacturing process of welded structures, and the requirements for inspection and testing - selected aspects*).

Autorzy: Jerzy Kozłowski¹, Jakub Kozłowski²

1) SLV-GSI Polska Sp. z o.o.

2) Sekcja Spawalnicza SIMP - Częstochowa

Streszczenie: W zakładach, gdzie wytwarzane są spawane konstrukcje metalowe, funkcjonują systemy jakości wdrożone w oparciu o zapisy różnych norm. Są to systemy, których wdrożenie i certyfikowanie jest dobrowolne tak jak np. EN ISO 9001; EN ISO

3834 lub takie, których wdrożenie jest wymagane przez przepisy prawa jak np. EN 1090. Certyfikacja zakładowej kontroli produkcji wg normy EN 1090-1, jest konieczna by wytwórca mógł dla produkowanej konstrukcji budowlanej wystawić deklarację właściwości użytkowych oraz oznakować konstrukcję znakiem CE. W zapisach norm znajdują się odniesienia do konieczności przeprowadzania kontroli w celu zapewnienia, że wytworzony wyrób spełnia oczekiwane wymagania. W referacie przedstawiono sposoby określania rodzaju i zakresu badań w oparciu o zapisy w poszczególnych normach systemowych. Zwrócono uwagę na konieczność dokładnego doprecyzowania w specyfikacjach wyrobu, wymagań w doniesieniu do badań. Przywołanie w wymaganiach specyfikacji tylko numeru normy, według której wykonana ma być konstrukcja np. EN 1090, EN ISO 12944 nie wskazuje jednoznacznie na rodzaj wymaganych badań oraz na zakres tych badań. Pozostawienie w zapisach kontraktu tak niedookreślonych wymagań może prowadzić do sporów w zakresie ich interpretacji. W referacie odniesiono się do wymagań w zakresie badań nieniszczących zawartych w normach i przepisach funkcjonujących w obszarze wytwarzania konstrukcji metalowych: EN-ISO 9001:2015; EN 1090-1+A1:2012; EN 1090-2:2018; EN ISO 3834-2:2021; EN 15085-5; EN ISO 12944-4; Norsok M501; Frosio-Guid-CP.

Abstract: In workshops where welded metal constructions are manufactured, there are quality systems implemented based on the provisions of various standards. These are systems whose implementation and certification is voluntary, such as EN ISO 9001; EN ISO 3834, or those that are required by law, such as EN 1090. Certification of factory production control according to EN 1090-1, is necessary for the manufacturer to be able to issue a declaration of performance for the manufactured building structure and to mark the structure with the CE mark. In the provisions of the standards there are references to the need to carry out inspections to ensure that the manufactured product meets the expected requirements. The paper presents ways to determine the type and scope of testing based on the provisions in the various system standards. Attention was drawn to the necessity of precise clarification in the product specifications, the requirements in the test report. Recalling in the specification requirements only the number of the standard according to which the construction is to be made, e.g. EN 1090, EN ISO 12944, does not clearly indicate the type of tests required and the scope of these tests. Leaving such vague requirements in the contract provisions can lead to disputes over their interpretation. The paper refers to nondestructive testing requirements contained in standards and regulations operating in the area of metal structure manufacturing: EN-ISO 9001:2015; EN 1090-1+A1:2012; EN 1090-2:2018; EN ISO 3834-2:2021; EN 15085-5; EN ISO 12944-4; Norsok M501; Frosio-Guid-CP.

15. Diagnostowanie potencjału eksploatacyjnego zespołu maszyn (ang. Diagnosing the wear margin of the machine sets)

Autor: Piotr Bielawski

Streszczenie: Zespoły maszyn są częścią technicznych systemów produkcyjnych, ulegają zużyciu podczas użytkowania a ich potencjał eksploatacyjny może zostać przywrócony podczas obsługi.

Efektywność i skuteczność obsługi uzależniona jest w dużym stopniu od informacji o potencjale eksploatacyjnym zespołu maszyn. Aktualną, rzeczywistą wartość potencjału eksploatacyjnego można uzyskać poprzez diagnozowanie zespołu maszyn. W artykule wykazano, że jakość informacji o potencjale eksploatacyjnym można podwyższyć dzieląc zespół maszyn na zespoły funkcjonalne, które mogą być obsługiwane oddzielnie. Wskazano na konieczność budowania modeli zespołów funkcjonalnych, z których może zbudować model dowolnego zespołu maszyn. Zaproponowano budowę następujących zespołów funkcjonalnych: rurociąg – maszyna, wirnik zespołu maszyn podparty w łożyskach tocznych, wirnik zespołu maszyn podparty w łożyskach ślizgowych, oscylator bez wymuszenia zewnętrznego, oscylator z wymuszeniem zewnętrznym, przekładnie z poślizgiem, przekładnie bez poślizgu, łożyska toczne. Dla każdego z wymienionych zespołów funkcjonalnych wskazano miary sygnałów diagnostycznych.

16. Przetwarzanie i analiza danych w tomografii komputerowej dla celów diagnostyki technicznej (ang. Data processing and analysis in computed tomography for the purposes of technical diagnostics).

Autorka: Anna Zawada-Tomkiewicz

Politechnika Koszalińska

Streszczenie: Artykuł poświęcony jest zagadnieniom zastosowania odpowiednich sekwencji przetwarzania danych dla wyodrębnienia parametrów ilościowych z obrazów 3D, na podstawie których przeprowadzane jest wnioskowanie i diagnostyka. Poziom szarości w rekonstrukcji jest proporcjonalny do lokalnego poziomu tłumienia odpowiadającego odpowiedniej fazie. Przetwarzanie danych ma w celu ich „ulepszenie”, podczas gdy segmentacja transformuje dane do przestrzeni mikroobjętości poszczególnych faz. Słaby kontrast między fazami w warunkach ograniczonej rozdzielczości wymaga stosowania bardzo wyrafinowanych metod tak, aby miary składowe faz i ich geometria były przydatne w opisie rzeczywistych obiektów diagnostycznych.

17. Strukturalne badania nieniszczące w ocenie trwałości urządzeń pracujących w podwyższonej temperaturze .

Autorzy: Hanna Purzyńska, Adam Zieliński

18. Problemy napotymane w diagnostyce materiałowej eksploatowanych elementów instalacji przemysłowych (ang. Problems encountered in material diagnostics of exploited elements of industrial installations).

Autorzy: Dariusz Mężyk¹, Bogdan Zajac²

1) Pracownia Diagnostyki Technicznej i Modernizacji Urządzeń Energetycznych, Instytut Energetyki - Instytut Badawczy

2) Laboratorium Badań Materiałowych, Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Streszczenie: Podczas długotrwałej eksploatacji bloków energetycznych 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 pogorszenie ich własności mechanicznych. Jedną z metod rozpoznania aktualnego stanu materiału są badania diagnostyczne, zarówno nieniszczące, jak i niszczące. W referacie omówiono niektóre aspekty badań kilku elementów długo eksploatowanego kotła energetycznego i problemy związane z oceną ich aktualnego stanu technicznego.

Abstract: During long-term operation of power units, construction materials used in the power industry work in conditions of changing stress fields and changing temperatures. These materials are exposed to the effects of gases and liquids and to mechanical loads. These factors cause deterioration of their mechanical properties. One of the methods of recognizing the current state of the material are diagnostic tests, both non-destructive and destructive. The paper discusses some aspects of testing several elements of a long-operated power boiler and problems related to the assessment of their current technical condition.

19. Fitness For Service dla urządzeń ciśnieniowych – doświadczenia UDT (ang. Fitness For Service engineering assessment for pressure equipment - experience of the Office of Technical Inspection).

Autorzy: Mateusz Wróbel, Maciej Szwed

Streszczenie: Urządzenia techniczne podczas eksploatacji narażone są na działanie różnorodnych procesów, które powodują pogorszenie ich stanu technicznego, prowadząc do powstawania wielu typów uszkodzeń. Uszkodzenia występujące w urządzeniach stanowią wyzwanie dla inspektorów Urzędu Dozoru Technicznego podczas wykonywania czynności dozorowych. Często w takich sytuacjach podjęcie decyzji o dopuszczeniu urządzenia do dalszej eksploatacji i czasie jego bezpiecznej pracy jest utrudnione. Właściwa ocena stanu technicznego wymaga dużego doświadczenia i interdyscyplinarnej wiedzy z zakresu: inżynierii materiałowej, badań materiałowych, inżynierii procesu czy budowy konstrukcji. Sposób podejścia do tego typu zagadnień został opisany w dokumencie API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service. W prezentowanym materiale scharakteryzowano główne założenia dotyczące metodologii Fitness For Service. Omówiono przykłady ocen Fitness For Service zrealizowanych przez Urząd Dozoru Technicznego związane z różnymi rodzajami uszkodzeń tj. ubytki korozyjne o charakterze ogólnym, ubytki korozyjne o charakterze lokalnym, zmiany powstające w wyniku pracy w warunkach pełzania. Szczególną uwagę przywiązano do kwestii związanych z doбором metod badawczych, ustalaniem zakresu badań, a także wymiarowaniem wykrytych uszkodzeń.

20. Wykorzystanie robotyki do nieinwazyjnych badań infrastruktury krytycznej na przykładzie badań grubości ścianek rur parownika kotłów energetycznych.

Autor: Andrzej Cieślik

SIEMENS ENERGY Sp. z o.o.

Streszczenie: Urządzenia ciśnieniowe i magazynujące są niezwykle niebezpieczne, a ich awarie mogą być katastrofalne w skutkach. Wewnętrzne inspekcje wizualne są branżowym standardem oceny tych aktywów. Alternatywnie, nieinwazyjne inspekcje wykorzystują wiele technologii inspekcji z zewnątrz, podczas pracy, w celu oceny integralności strukturalnej. Wiele firm na całym świecie wykorzystuje nieinwazyjne inspekcje jako inicjatywę w zakresie bezpieczeństwa, ochrony środowiska i finansów. W miarę jak firmy wykorzystują to podejście, istnieje szereg technologii optymalizujących wartość tych programów. Najnowsze technologie robotyczne automatyzują nieinwazyjne inspekcje w celu spełnienia wymagań kontroli zewnętrznej. Rapid Ultrasonic Gridding (RUG) to ultradźwiękowa metoda testowania, która skutecznie skanuje w poszukiwaniu mechanizmów uszkodzeń ścian z wysoką rozdzielczością.

Zrobotyzowane rozwiązania do kontroli rur kotłowych. Po kilkudziesięciu latach funkcjonowania instalacji, jedną z najczęstszych przyczyn nieplanowanych przestojów są awarie rur kotła spowodowane różnymi mechanizmami uszkodzeń opartych na korozji i erozji. Biorąc pod uwagę rozmiar większości kotłów, tradycyjne metody NDT mogą przeoczyć identyfikację obszarów budzących obawy w ścianach wodnych i poziomych zespołach rur. Najnowsze osiągnięcia w technikach NDT opartych na robotyce zapewniają wydajną, bezpieczną i niedrogą alternatywę dla pełnego pokrycia inspekcji rur kotłowych. Za pomocą metody testowania Rapid Ultrasonic Gridding (RUG) zostają utworzone mapy korozji w celu identyfikacji ubytków ścian na najwcześniejszych etapach. Uzyskane dane są wyświetlane w postaci kolorowych map grubości, ujawniających trendy i wzorce erozji/korozji. Informacje te pomagają operatorom zidentyfikować obszary wymagające natychmiastowej naprawy, zaplanować konserwację zapobiegawczą i złagodzić awarie rur kotła.

21. Potencjał użytkowy lin stalowych na podstawie badań nieniszczących i niszczących (ang. Usable potential of steel ropes based on non-destructive and destructive tests).

Autorzy: Maciej Matuszewski, Małgorzata Słomion, Eugeniusz Mańka, Michał Styp-Rekowski

Streszczenie: Badania diagnostyczne mają na celu określenie aktualnego stanu badanego obiektu, a ich wyniki porównuje się z wartościami granicznymi. Stan ten rozpatruje się zatem w układzie dwuwartościowym: zdatny – niezdatny. W pracy przeprowadzono analizę stosowania badań diagnostycznych stanu technicznego liny nośnej wyciągu górniczego. W przypadku tych lin bardzo istotna jest znajomość aktualnego stanu technicznego dla bezpieczeństwa ich pracy. Pod wpływem wymuszeń eksploatacyjnych, następuje zużywanie tribologiczne co w konsekwencji powoduje stopniowy ubytek potencjału użytkowego (osłabienie liny). W artykule przedstawiono analizę porównawczą rezultatów badań

nieniszczących i niszczących lin, mających na celu określenie stanu technicznego. Badania nieniszczące były badaniami magnetycznymi oraz organoleptycznymi, natomiast badania nieniszczące polegały na badaniach wytrzymałościowych – rozciąganie, zginanie i skręcanie. Do badań przyjęto odcinek liny o długości 60 m, który podczas eksploatacji był przede wszystkim rozciągany. Najpierw przeprowadzono badania magnetyczne i na tej podstawie wybrano trzy miejsca do badań niszczących – wykazujące najmniejsze zużycie, największe oraz pośrednie. Na podstawie analizy porównawczej rezultatów badań: magnetycznych, organoleptycznych i wytrzymałościowych można stwierdzić, że badania magnetyczne pozwalają wystarczająco dokładnie wskazać miejsce największego osłabienia liny, jednak stopień tego osłabienia określony jest niedokładnie. W kategoriach ilościowych najdokładniejsze są badania wytrzymałościowe, jednak ze względu na charakter niszczący nie zawsze istnieją możliwości ich prowadzenia. Na podstawie przeprowadzonych badań analitycznych można stwierdzić, że między wielkościami przyjętymi w badaniach diagnostycznych jako symptomy stanu istnieją powtarzalne relacje. Określenie szczegółowych zależności, które te relacje opisują wymaga dalszych badań. Określając relacje między parametrami determinującymi stan techniczny lin, uzyskanymi z badań nieniszczących i niszczących, będzie można wnioskować o bieżącym stanie na podstawie nieinwazyjnych badań nieniszczących, a więc nie wymagających przerwania eksploatacji. Zidentyfikowanie istnienia zależności oraz znajomość ich postaci może spowodować ograniczenie zakresu niezbędnych badań diagnostycznych, nie pogarszając przy tym ich informatywności i wiarygodności. Należy więc dążyć do opracowania modeli predykcyjnych opisujących stan techniczny parametrów wytrzymałościowych, uwzględniających relacje pomiędzy rezultatami badań nieniszczących i niszczących.

Abstract: Diagnostic tests aim to determine the current condition of the tested object, and their results are compared with the limit values. This state is therefore considered in a two-valued system: suitable - unsuitable. The study analyzes the use of diagnostic tests of the technical condition of the mining hoist lifting rope. In the case of these ropes, it is very important to know the current technical condition for their safe operation. Under the influence of operational forces, tribological wear occurs, which in turn causes a gradual loss of usable potential (weakening of the rope). The article presents a comparative analysis of the results of non-destructive and destructive testing of ropes aimed at determining the technical condition. Non-destructive tests included magnetic and organoleptic tests, while non-destructive tests consisted of strength tests - stretching, bending and torsion. The test involved a 60 m long rope section, which was mainly stretched during operation. First, magnetic tests were carried out, and on this basis, three places were selected for destructive tests - those showing the least, the greatest and intermediate wear. Based on a comparative analysis of the results of magnetic, organoleptic and strength tests, it can be concluded that magnetic tests allow to indicate with sufficient precision the place of the greatest weakening of the rope, but the degree of this weakening is imprecisely determined. In quantitative terms, strength tests are the most accurate, but due to their destructive nature, they are not always possible to conduct. Based on the analytical research carried out, it can be concluded

that there are repeatable relationships between the quantities accepted in diagnostic tests as symptoms of the condition. Determining the detailed dependencies that these relationships describe requires further research. By determining the relationships between the parameters determining the technical condition of the ropes, obtained from non-destructive and destructive tests, it will be possible to draw conclusions about the current condition on the basis of non-invasive, non-destructive tests, which do not require interruption of operation. Identifying the existence of dependencies and knowing their form may limit the scope of necessary diagnostic tests without impairing their informativeness and reliability. Therefore, efforts should be made to develop predictive models describing the technical condition of strength parameters, taking into account the relationships between the results of non-destructive and destructive testing.

22. Badania nieniszczące z wykorzystaniem systemów zautomatyzowanych.

Autorzy: Piotr Synaszkowski*, Michał Siniarski, Krzysztof Dragan, Jakub Kotowski, *Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, *piotr.synaszkowski@itwl.pl*

Streszczenie: Rozwój systemów nadzorujących cykl życia produktu obejmuje coraz szersze spektrum danych. To z kolei sprzyja wprowadzaniu tzw. bliźniaków cyfrowych czyli modeli pozwalających na stosunkowo łatwy dostęp do gromadzonych danych a także wykorzystywanie ich do predykcji trwałości. Modele te zazwyczaj wykonywane są w formie dokładnych odwzorowań geometrii pozwalając na szybkie intuicyjne obrazowanie zebranych danych w tym danych z badań nieniszczących. Wprowadzanie takich systemów stawia coraz wyższe wymagania dla postaci danych zapisywanych z badań. To sprzyja rozwojowi automatyzacji w kierunku uzyskiwania map obrazowych badanych powierzchni. Autorzy w referacie przedstawiają wyniki prac związanych z własnymi systemami skanującymi oraz z inspekcji z wykorzystaniem latających platform.

Abstract: The development of life cycle tracking systems covers an increasingly broad spectrum of data. This, in turn, is fostering the introduction of so-called digital twins-models that allow relatively easy access to the collected data and also use it for durability prediction. These models are usually made in the form of accurate representations of geometry allowing for quick intuitive imaging of collected data including nondestructive testing data. The introduction of such systems places increasing demands on the form of data recorded from tests. This encourages the development of automation toward obtaining image maps of the surfaces under test. In the paper, the authors present the results of work related to their own scanning systems and inspections using flying platforms

23. Przykłady badań nieniszczących wykonywanych w reaktorze badawczym MARIA (ang. Non-destructive testing of components used in MARIA research reactor).

Autorzy: Marcin Kowal

Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Streszczenie: Niniejsza praca ma na celu przedstawienie przykładów badań nieniszczących przeprowadzonych w reaktorze badawczym MARIA, wyraźnie koncentrując się na badaniach ultradźwiękowych (UT) i badaniach prądów wirowych (ET). W przypadku reaktora MARIA metoda UT jest wykorzystywana do wykrywania i oceny uszkodzeń okładzin reaktora. Drugą techniką są badania ET, ta nieniszcząca metoda pozwala na ocenę grubości powłok reaktora i rozwiniętych z powodu korozji warstw tlenków. Dodatkowo zostaną przedstawione przykłady badań w projektach naukowych oraz dla przemysłu.

24. Korelacje badań NDT w zakresie detekcji korozji (ang. Correlation of NDT tests in the field of corrosion detection).

Autorzy: Patryk Ciężak, Piotr Synaszko, Krzysztof Dragan, Andrzej Leski

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

Streszczenie: Poszukiwania uszkodzeń, a w szczególności korozji w strukturze statków powietrznych jest dość problematyczne w przypadku, kiedy nie można zidentyfikować uszkodzenia korozji metodą wizualną. W ramach wykonywania sprawdzenia struktury pod kątem wykrywania korozji wykorzystuje się wiele różnych metod badań nieniszczących takich jak ET, UT, TT, PT, MT oraz ST w ograniczonym zakresie. W artykule opisano przekrojowo wyniki badań różnych metod NDT dopasowując je do wykrywania różnych rodzajów korozji występującej w strukturze konstrukcji samolotu. Autorzy w referacie przedstawiają wyniki prac opisujące, w jaki sposób różne metody NDT pomagają znaleźć i zidentyfikować korozję oraz jakie są ich ograniczenia.

25. Metody nieniszczące w ocenie rozwoju uszkodzenia materiałów konstrukcyjnych w warunkach obciążeń eksploatacyjnych (ang. Non-destructive methods for assessing the development of damage to construction materials under operational loads).

Autor: Dominik Kukla

IPPT PAN, Łukasiewicz WIT

Streszczenie: Praca dotyczy wykorzystania metody prądów wirowych oraz innych metod nieniszczących do identyfikacji lokalnych zmian w strukturze materiału związanych z rozwojem uszkodzenia w warunkach obciążenia zmęczeniowego. Dla wybranych, metalicznych materiałów konstrukcyjnych poddanych cyklicznym obciążeniom zmiennym opracowano ilościowe charakterystyki rozwoju uszkodzenia na podstawie wyznaczonych zmian składowych odkształcenia w kolejnych cyklach obciążenia. Jednocześnie z próbami zmęczeniowymi przetestowano szereg

diagnostycznych metod nieniszczących w celu oceny możliwości lokalizacji procesu inicjacji uszkodzenia zmęczeniowego w materiale próbek. Opracowane procedury badawcze z zastosowaniem metody prądów wirowych, wspierane technikami optycznymi (lub innymi technikami NDT) pozwoliły nie tylko na identyfikację obszarów uszkodzenia zmęczeniowego we wczesnym etapie rozwoju, związanego ze zmianami strukturalnymi, ale także na monitorowanie procesu degradacji próbek, aż do ich zerwania. Badania przeprowadzono na stopach konstrukcyjnych, dobranych z uwagi na właściwości elektromagnetyczne, ale przede wszystkim mechanizmy rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego.

26. Wykorzystanie metod uczenia maszynowego w ocenie dużych zbiorów danych z badań nieniszczących (ang. Non-destructive testing using automated systems).

Autorzy: Krzysztof Dragan, Piotr Synaszko

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

Streszczenie: Obrazowanie struktur z wykorzystaniem metod badań nieniszczących coraz częściej oparte jest o wykorzystanie zautomatyzowanych metod badań nieniszczących. Automatyzacja metod pozwala na rejestrowanie zbiorów danych zawierających dane obrazowe. Analiza takich zbiorów w szczególności dla struktur podlegających eksploatacji wymusza stosowanie metod komparatywnych tzn. wykorzystujących dane historyczne. Badanie takie jest czasochłonne a konieczność określania obszarów uszkodzenia wydłuża znacząco czas oceny. W artykule przedstawione zostanie podejście do automatyzacji klas uszkodzeń wykorzystaniem metod detekcji i opisu pewnych klas uszkodzeń wraz oceną możliwości automatyzacji ich detekcji w oparciu o algorytmy uczenia maszynowego.

27. Nieniszczące, wizualne metody badań wykorzystujące wirtualną rzeczywistość w budownictwie – stan wiedzy.

Autorzy: Mateusz Napiórkowski¹, Mariusz Szóstak², Krzysztof Schabowicz²

1) Politechnika Wrocławska Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Katedra Budownictwa Ogólnego Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

2) Politechnika Wrocławska Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Katedra Budownictwa Ogólnego Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Streszczenie: W pracy przedstawiono możliwości zastosowania wirtualnej rzeczywistości i innowacyjnych technologii (m.in. zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych, skaningu laserowego) do nieniszczących, wizualnych badań w budownictwie. Zastosowanie wirtualnej rzeczywistości umożliwia przeprowadzenie zdalnej i bezpiecznej inspekcji budowlanej, bez konieczności „fizycznego” wejścia i przebywania na niepewnej konstrukcji lub w obiekcie budowlanym będącym w złym stanie technicznym. Wizualne badania stanu technicznego, uszkodzeń,

można wykonać w wirtualnym świecie, za pomocą gogli VR. Wirtualna rzeczywistość to technologia, która pozwala na stworzenie trójwymiarowego wirtualnego świata w którym użytkownik ma możliwość swobodnej eksploracji. Środowisko cyfrowe zostaje stworzone w oparciu o dane pozyskane w sposób bezpieczny (zdalny) przy pomocy skanerów laserowych i dronów. Zapewnia to dokładne odwzorowanie obiektu w środowisku cyfrowym oraz zapewnia możliwość wykonania precyzyjnej inspekcji. VR może również stanowić platformę do koordynacji międzybranżowej dla obiektów wymagających planów naprawczych przy braku możliwości wizji lokalnej. W artykule przedstawiono obecny stan wiedzy oraz zaproponowano kolejne kierunki badań.

Abstract: The paper presents the possibilities of using virtual reality and innovative technologies (including the use of drones, laser scanning) for non-destructive, visual inspections in construction. The use of virtual reality makes it possible to carry out a remote and safe construction inspection, without the need to "physically" enter and stay on a precarious structure or in a construction object that is in poor condition. Visual inspections of technical condition, damage, can be performed in a virtual world, using VR goggles. Virtual reality is a technology that allows the creation of a three-dimensional virtual world in which the user is free to explore. The digital environment is created based on data acquired securely (remotely) using laser scanners and drones. This provides an accurate representation of the object in the digital environment and ensures that precise inspections can be performed. VR can also provide a platform for interprofessional coordination for facilities requiring remediation plans in the absence of on-site inspection. The article presents the current state of knowledge and proposes future research directions.

28. Badania wideoskopowe – ważny element profilaktyki w trakcie modernizacji i remontów bloków energetycznych (ang. Videoscopic examinations - an important element of prevention during modernization and overhaul of power units).

Autorzy: Piotr Kuśmierski, Zbigniew Jaguszewski
Wydział Kontroli Technicznej PGE GiEK S.A. Oddział Elektrownia Bełchatów

Streszczenie: Grupa Kapitałowa PGE jest największym w Polsce przedsiębiorstwem sektora energetycznego. Referat przedstawia obecnie stosowane zestawy wideoskopowych używanych w Laboratorium Badań Materiałowych Oddział Elektrownia Bełchatów oraz możliwości ich wykorzystania w celu określenia stanu technicznego wybranych elementów bloku energetycznego. Wystąpienie prezentuje sposoby diagnozowania powyższą metodą oraz wyniki badań wybranych elementów podczas modernizacji i remontów urządzeń energetycznych.

29. Zaawansowane techniki pomiarowe we współczesnych wideoendoskopach przemysłowych (ang. Advanced 3D measurement techniques in modern industrial video-borescopes).

Autorzy: Paweł Stasiak, Cezary Urban (EVEREST POLSKA SP. Z O.O.), Krzysztof Brunné, Daniel Pieńkosz (Przedsiębiorstwo Usług Naukowo-Technicznych „Pro Novum” Sp. z o.o.), Krzysztof Szaboń, Adam Szczepiek (TAURON Wytwarzanie S.A.), Krzysztof Walukiewicz, (PGE GiEK S.A. Oddział Elektrownia Opole)

Streszczenie: Wprowadzenie do technik pomiarowych w Zdalnych Badaniach Wizualnych - RVI dostępnych we współczesnych wideoboroskopach przemysłowych. Współczesne wideoboroskopy to wysoce zaawansowane urządzenia pomiarowo analityczne oferujące możliwość precyzyjnego wymiarowania wykrytych nieciągłości. Obecnie dominujące są 2 techniki pomiarowe: metoda Stereo 3D oraz Pomiar fazowy 3D. Obie, w oparciu o zaawansowaną analizę obrazu znajdującego się w polu widzenia kamery, generują 3 wymiarowy model obserwowanej powierzchni, a następnie umożliwią wymiarowanie i analizę elementów na obrazie i modelu. Pozwalają na precyzyjny i powtarzalny pomiar wykrytych nieciągłości; w zależności od modelu i producenta oferują wiele typów pomiarów dostosowanych do najczęściej występujących w praktyce RVI potrzeb takich jak: pomiar odległości, punkt do linii, głębokość, profil głębokości wzdłuż linii oraz na całej powierzchni, pomiar luzów wierzchołkowych łopatek w turbinach gazowych, w tym silnikach lotniczych i wiele innych. Integralną częścią technik pomiarowych jest analiza błędów pomiarowych, który trzeba przyjąć w relacji do uzyskiwanych wyników, oraz realne ograniczenia stosowalności powyższych narzędzi. Wszystkie powyższe kwestie zostaną omówione w tym wprowadzeniu, tak aby zaprezentować realne możliwości współczesnych przyrządów do zdalnych badań wizualnych.

30. Certyfikacja personelu badań nieniszczących wg normy PN-EN ISO 9712 Badania nieniszczące. Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących wydanie z 2022 r (ang. Certification of non-destructive testing personnel according to EN ISO 9712 Non-destructive testing. Qualification and certification of NDT personnel 2022 edition).

Autorzy: Magdalena Maj-Sobczak, Krzysztof Rudnicki
Streszczenie: Norma PN-EN ISO 9712 Badania nieniszczące. Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących jest zbiorem zasad kwalifikacji i certyfikacji personelu wykonującego badania NDT. Niniejszy referat stanowi przypomnienie zasad certyfikacji oraz porównanie wymagań jakie stawia ww. norma wydanie z 2012 r. wydanie z 2022 r.

31. Spójność pomiarowa w badaniach w kontekście wymagań normy PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 i WUDT-LAB (ang. Measurement traceability in tests in according to the requirements of PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 and WUDT-LAB standards).

Autor: Robert Krajewski

Streszczenie: Norma PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 „Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących” oraz WUDT-LAB „Uznawanie Laboratoriów. Ocena kompetencji laboratoriów badawczych” określają wymagania dotyczące zapewnienia spójności pomiarowej przez laboratoria. Niniejszy referat omawia cechy charakteryzujące spójność pomiarową oraz przybliża sposoby realizacji tych wymagań przez laboratoria badawcze.

32. Przegląd nowoczesnych metod nieniszczących wykorzystywanych do badania płyt włóknisto-cementowych (ang. Review of modern non-destructive methods used to test fiber-cement boards)

Autorzy: Tomasz Gorzelańczyk, Krzysztof Schabowicz
Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Streszczenie: W artykule przedstawiono i omówiono wybrane nowoczesne metody nieniszczące wykorzystywane do badania materiałów kompozytowych jakim są płyty włóknisto-cementowe. Omówiono metodę ultradźwiękową, w tym również z wykorzystaniem fal Lamba, metodę emisji akustycznej, metodę terahercową i metodę optyczną z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego SEM. Wszystkie te metody zostały z powodzeniem wykorzystane w badaniach, w tym również w badaniach własnych autorów, co jednoznacznie potwierdza ich przydatność w badaniu płyt włóknisto-cementowych. .

Abstract: The article presents and discusses selected modern non-destructive methods used to test composite materials such as fiber-cement boards. The ultrasonic method, including the Lamb wave method, the acoustic emission method, the terahertz method and the optical method using the scanning electron microscope (SEM) are discussed. All these methods have been successfully used in research, including the authors' own research, which clearly confirms their usefulness in the study of fiber-cement boards.

33. Badania nieniszczące materiałów kompozytowych metodą termografii laserowej (ang. Non-destructive testing of the composite materials with use of Laser Thermography)

Autorzy: Bartosz Hyla, Michał Sobczak, Jakub Roemer
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Streszczenie: Termografia jest jedną z metod badań nieniszczących, która wykorzystuje termowizję do wnioskowania o stanie

technicznym materiału. Termografia laserowa jest rodzajem termografii aktywnej w której źródłem wymuszenia jest promieniowanie laserowe. Metoda ta pozwala na bardzo precyzyjne kontrolowanie ilości energii dostarczanej do próbki. Istotną zaletą w badaniach laserowych jest możliwość wykrywania zarówno delaminacji jak i pęknięć będącymi głównymi rodzajami uszkodzeń strukturach kompozytowych. W pracy przedstawione zostanie stanowisko do badań, którego prototyp jest opracowywany na AGH oraz wyniki skanowania na przykładzie próbki z włókna węglowego w osnowie polimerowej.

Abstract: Thermography is a non-destructive testing method that utilizes infrared camera to infer the technical condition of a material. Laser thermography is a type of active thermography in which laser radiation serves as the excitation source. This method allows for highly precise control of the amount of energy delivered to the sample. An important advantage of laser testing is the capability to detect both delamination and cracks, which are the main types of damage in composite structures. This paper presents a test setup developed at AGH University of Krakow and the results of scanning a sample made of carbon fiber reinforced polymer.

34. Badania terahercowe struktury kompozytowej z włókna szklanego poddanej statycznemu zginaniu (ang. Terahertz inspection of glass-fiber composite structure subjected to static bending).

Autorzy: Przemysław Łopato, Michał Herbko, Ireneusz Spychalski

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Centrum Inżynierii Pól Elektromagnetycznych i Techniki Wysokich Częstotliwości Al. Piastów 17, 70-310 Szczecin

Streszczenie: Materiały kompozytowe ze względu na swoje cenne właściwości (mimo złożoności procesu ich wytwarzania) znajdują coraz szersze zastosowanie we współczesnym przemyśle i transporcie. Jednakże materiały te mogą utracić pożądane właściwości mechaniczne z powodu zewnętrznych wymuszeń mechanicznych, promieniowania ultrafioletowego, przenikania wilgoci lub innych czynników. Dlatego niezbędny jest skuteczny sposób oceny stanu materiałów. W artykule przedstawiono badania nieniszczące kompozytu wzmocnionego włóknem szklanym poddanego stopniowemu zginaniu statycznemu. W tym celu zastosowano obrazowanie terahercowe i zaproponowano schemat przetwarzania/eksploracji danych. W zaproponowanym podejściu wykorzystano wydajny algorytm rejestracji danych (w celu eliminacji wpływu chropowatości i nierówności powierzchni) oraz schemat parametryzacji sygnałów. Uzyskane w ramach analizy parametry pozwalają na całościowy opis ocenianego stanu materiału i przewidywanie uszkodzeń nawet we wczesnych stadiach zniszczenia.

35. Wykrywanie defektów w kompozytowych wzmocnieniach konstrukcji betonowych przy użyciu metody termografii mikrofalowej (ang. Detection of defects in composite reinforcements of concrete structures using the microwave thermography method).

Autorzy: Barbara Szymanik (Grochowalska), Sam Ang Keo, Franck Brachelet, Didier Defer

Centrum Inżynierii Pól Elektromagnetycznych i Technik Wysokich Częstotliwości, Wydział Elektryczny, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin

Streszczenie: W artykule przedstawione zostanie zastosowanie techniki aktywnej termografii podczerwonej z wymuszeniem mikrofalowym (Microwave InfraRed Thermography - MIRT) do wykrywania uszkodzeń kompozytowego (węglowego – Carbon Fiber Reinforced Polymer - CFRP) wzmocnienia próbek betonu. W pierwszym etapie stworzony został model numeryczny, który składał się z szerokopasmowej anteny piramidalnej oraz badanej próbki. Modelowany był system o mocy 360 W pracujący na częstotliwości 2.4 GHz, w dwóch różnych trybach pracy: ciągłym i modulowanym. Modelowano próbkę w postaci płyty betonowej pokrytej warstwą kleju, na którą następnie nałożono warstwę CFRP. W warstwie kleju, na styku betonu z CFRP, zlokalizowana została wada w postaci szczeliny powietrznej. W badaniu przeanalizowano: próbkę bez wad, próbkę z wadą umieszczoną centralnie oraz próbkę z wadą umieszczoną poza centrum próbki. Kolejnym etapem badań była eksperymentalna weryfikacja wyników modelowania numerycznego. Doświadczenie polegało na wykorzystaniu dwóch próbek betonu wzmocnianego CFRP, jednej bez wad i drugiej z wadą zlokalizowaną centralnie. Na szczególną uwagę zasługują obserwacje prowadzone w fazie nagrzewania, różniące się od wcześniejszych badań, w których obserwowano jedynie próbkę po fazie nagrzewania. Wyniki pokazują, że MIRT ma potencjał do wykorzystania jako metoda identyfikacji defektów w konstrukcjach betonowych wzmocnianych CFRP.

36. Metody PAUT i FMC/TFM — podobieństwa, różnice, niespodzianki (ang. PAUT and FMC/TFM methods — similarities, differences, surprises).

Autorzy: Marcin Lewandowski^{1,2}, Hanna Smach¹, Piotr Jarosik^{1,2}, Piotr Karwat^{1,2}, 1 Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, 2 us4us sp. z o.o.

Streszczenie: Technika PAUT (Phased-Array Ultrasonic Testing) jest od lat powszechnie stosowana w badaniach nieniszczących. Elektroniczne sterowanie wiązkami ultradźwiękowymi daje wiele możliwości pokrycia badanych obiektów, ale wymaga wiedzy i doświadczenia, a często także symulacji. Metoda FMC/TFM nie stosuje formowania wiązek, zamiast tego proces ogniskowania odbywa się w algorytmie numerycznym, co powoduje, że nasze przyzwyczajenia z PAUT nie znajdują zastosowania. Należy jednak podkreślić, że obie metody opierają się na tych samych prawach fizyki fal ultradźwiękowych, które każdy technik poznaje na kursie UT1. Celem prezentacji będzie pokazanie niektórych ograniczeń metody PAUT i porównanie ich z wynikami uzyskanymi metodą

FMC/TFM. Pokażemy, jak świadomie sterować ustawieniami, aby nie doprowadzić do fałszywych wyników czy artefaktów. Na przykładach zobaczymy wpływ parametrów badania (m.in. rozmiar aktywnej apertury, kąty skanowania, ogniskowanie wiązki) na otrzymywane rezultaty. Zwrócimy także uwagę na aspekty budowy sprzętu i toru przetwarzania sygnałów. Korzystając z programowalnej ultradźwiękowej platformy badawczej, będziemy w stanie porównać obrazy wad uzyskane różnymi technikami i dla różnych parametrów z jednego przyłożenia głowicy. Prezentacja ma mieć przede wszystkim walor edukacyjny. Niezrozumienie podstaw fizycznych PAUT i/lub nieodpowiednie nastawy mogą prowadzić do błędnych interpretacji, fałszywych detekcji albo pominięcia niezgodności. Dlatego celem referatu jest zwrócenie uwagi na te problemy, a nie krytyka metody.

Abstract: The PAUT technique (Phased-Array Ultrasonic Testing) has been used for years in non-destructive testing. Electronic steering of the ultrasound beams enables to cover studied objects, but it requires knowledge, experience and often also simulations. The FMC/TFM method does not exploit beam forming. Instead of this, a focusing process is implemented by a numerical algorithm, what makes our routines from the PAUT unsuitable and impractical. It is worth pointing out that both techniques are based on the very same physical laws of acoustic waves, which are taught to every technician on the UT1 courses. The aim of this presentation will be to demonstrate some limitations of PAUT and compare them with the results derived from the FMC/TFM method. We will show how to control configuration to avoid artefacts or incorrect outcomes. We will explain in a few examples the impact of testing parameters (i.e. active aperture size, scanning angles, beam focusing) on collected results. We will also draw attention to the aspects of devices internals and signal processing pipeline. By using a programmable ultrasound research platform, we can compare defect images obtained by both methods setting various parameters at the same single probe position. The presentation has primarily educational value. Misunderstanding of physical principles in PAUT and inappropriate configurations may lead to misinterpretation, false detection, or even missing flaws. Therefore, our main objective is addressing those issues, not to critique the PAUT method.

37. Nowy system do ultradźwiękowej kontroli prętów stalowych ECHOGRAPH HRPS-PAUT (ang. New system for the ultrasonic inspection of steel bars ECHOGRAPH HRPS-PAUT).

Autorzy: T. Sayfullaev¹, P. Schulte¹, J. Bolten¹, W. Deutsch¹, R. Zeman²

1) Karl Deutsch Prüf- und Messgerätebau GmbH + Co KG, Wuppertal

2) SoluPi CND SRL

Streszczenie: System ECHOGRAPH HRPS PAUT wykorzystuje technikę Phased Array, aby zapewnić szybką i powtarzalną kontrolę prętów. W zależności od wielkości wady i średnicy pręta można osiągnąć prędkość badania do 2,0 m/s. Specjalnie zaprojektowana komora testowa jest wyposażona w wymienne kasety z sondami, w których znajdują się stacjonarnie zainstalowane sondy Phased Array. Wszystkie sondy są rozmieszczone centralnie wokół osi pręta ze stałą odległością (ścieżką dźwiękową) od linii środkowej prętów. 100% pokrycie przekroju poprzecznego pręta jest

zapewnione dzięki nakładaniu się wiązek dźwięku na obwodzie pręta. Sprzężenie ultradźwiękowe jest przeprowadzane w technice zanurzeniowej bez dotykania powierzchni pręta. Kasety sondy są dostępne w różnych rozmiarach w zależności od zakresu średnic prętów, które mają być testowane. Transport prętów odbywa się za pomocą liniowego przenośnika rolkowego, który zapewnia płynny transport i prowadzenie prętów. Mechanizm testowy jest zamontowany na stole o regulowanej wysokości z funkcją przesuwania między pozycją testową a pozycją kalibracyjną. Kalibracja jest wykonywana za pomocą krótkich prętów kalibracyjnych zawierających FBH i SDH do kalibracji ręcznej. Test funkcjonalny zostanie przeprowadzony zgodnie z poniższymi tabelami prędkości testowych. Do kalibracji można użyć FBH lub SDH.

Abstract: The ECHOGRAPH HRPS PAUT system uses the Phased Array technique to ensure fast and repeatable inspection of bars. Test speeds up to 2.0m/s can be achieved depending on flaw size and bar diameter. A specially designed test chamber is equipped with exchangeable probe cases carrying the stationary installed phased array probes. All probes are centrally arranged around the bar axis with a fixed distance (sound path) to the center line of the bars. 100% coverage of the bar cross-section is ensured due to overlapping sound beams around the circumference of the bar. The ultrasonic coupling is carried out in immersion technique without touching the bar surface. The probe cases are available in various sizes depending on the respective bar diameter range to be tested. The transport of the bars is performed in a linear roller conveyor, which provides smooth transport and guiding of the bars. The test mechanism is mounted on a height-adjustable table with a sliding function between test position and calibrating position. Calibration is executed with short calibration bars containing FBH and SDH for manual calibration. The functional test will be performed according to the test speed tables below. For calibration either a FBH or SDH can be used.

38. Praktyczna ocena możliwości wykrywania ubytków korozyjnych na rurociągach metodą dalekozasięgowej defektoskopii ultradźwiękowej z osiową propagacją fali (ang. Practical evaluation of corrosion damage detection capabilities on pipelines using guided wave testing with axial propagation).

Autorzy: Łukasz Sarniak*, Jan Płowiec1, Andrzej Wolanin1
Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej
*lukasz.sarniak@pw.edu.pl

Streszczenie: Metoda dalekozasięgowej defektoskopii ultradźwiękowej (guided waves) umożliwia skanowanie całej ścianki rury na przestrzeni kilkudziesięciu metrów, z jednego położenia inspekcyjnego, pod kątem detekcji i lokalizacji nieciągłości w postaci ubytków grubości ścianki i efektów korozyjnych na rurociągach. Metoda wykorzystuje kierowane fale ultradźwiękowe rozchodzące się w kierunku osiowym rury, wzbudzone przez pierścienie przetwornika składające się z połączonych modułów piezoelektrycznych. Otrzymywany sygnał, w postaci zobrażenia amplitudowo-czasowego (A-Scan), dostarcza informacji o

lokalnych zmianach powierzchni przekroju poprzecznego rury. W niniejszym artykule omówiono możliwości detekcji za pomocą fal kierowanych z propagacją osiową, zweryfikowane w oparciu o badania terenowe przeprowadzone za pomocą systemu Olympus Ultrawave LRT na rurociągach naziemnych i podziemnych. Badane rurociągi różniły się pod względem czasu eksploatacji, średnicy, grubości, temperatury roboczej, rodzaju powłok i izolacji. W artykule omówiono możliwości i ograniczenia metody, ustalone na podstawie uzyskanych w praktyce zakresów pomiarowych i zmierzonego stosunku sygnału do szumu.

Abstract: The Guided Waves Testing method allows screening the entire pipe wall, over tens of meters, from a single inspection position, as well as detection and location of discontinuities in the form of wall loss and corrosion effects on pipelines. It uses guided ultrasonic waves propagating in the axial direction of the pipe, excited by transducer rings consisting of connected piezoelectric modules. The received signal, in form of amplitude-time scan (A-Scan), provides information on general variations in the total cross-sectional area of pipe. This article discusses the detection capabilities of guided wave testing with axial propagation, based on practical tests carried out using Olympus Ultrawave LRT system on both above-ground and underground pipelines. The tested pipelines varied in terms of service life, diameter, thickness, temperature, type of coatings and insulation. The article discusses the possibilities and limitations of the method verified in practical application, as well as the obtained measurement ranges and signal-to-noise ratio.

39. Detekcja pęcherzy wodorowych metodami ultradźwiękowymi TOFD, TULA i Phased Array (ang. Hydrogen blisters detection by TOFD, TULA and Phased Array ultrasonic methods).

Autorzy: Maciej Szwed, Tomasz Jakubowski, Michał Targoński

Streszczenie: Badaniom poddano wycinek płaszcza aparatu instalacji rafinerijnej pracującego w środowisku zawierającym wodór, w którym na powierzchni wewnętrznej, podczas rutynowych oględzin, odnotowano obecność pęcherzy wodorowych. Przeprowadzone badania ultradźwiękowe wykazały występowanie wskazań pochodzących od nieciągłości materiałowych różnej wielkości, pochodzenia i lokalizacji. Zastosowane w niniejszej pracy techniki badań pozwoliły na znacznie łatwiejszą interpretację wyników w porównaniu do konwencjonalnej techniki echa. Analizując różne typy zobrażeń, w oparciu o informacje dotyczące warunków eksploatacji oraz możliwych do wystąpienia mechanizmów degradacji, określono rodzaj i pochodzenie nieciągłości. Podjęto również próbę określenia na podstawie widocznych wskazań na jakim etapie powstawania są pęcherze wodorowe. Obserwacje mikroskopowe potwierdziły interpretację wyników badań ultradźwiękowych.

40. Modelowanie wykrywania wad kontaktowo-zmęczeniowych w szynach kolejowych metodą ultradźwiękową (*ang. Modelling of detection of RCF defects in railroad rails by ultrasonic method*).

Autorzy: Tomasz Katz

IPPT PAN, Warszawa, tkatz@ippt.pan.pl

Streszczenie: Celem niniejszego referatu jest przedstawienie sposobów modelowania wad kontaktowo-zmęczeniowych wykorzystując komercyjne i autorskie oprogramowanie komputerowe. Szczególną uwagę zwrócono na poznanie sposobu rozwoju wad kontaktowo-zmęczeniowych czego efektem jest poprawne modelowanie wad uwzględniające takie czynniki jak: lokalizacja wady, kierunek propagacji pęknięcia. Wynikiem końcowym prac było opracowanie parametrów serii głowic ultradźwiękowych, które będą efektywnie wykrywać wady kontaktowo-zmęczeniowe w szyna kolejowych.

Abstract: The purpose of this paper is to present ways of modelling a RCF (rolling contact fatigue) defects using commercial and proprietary computer software. Particular attention was paid to learning how RCF's defects develop resulting in correct defect modeling taking into account such factors as defect location, crack propagation direction. The final result of the work was the development of parameters for a series of ultrasonic probes that will effectively detect RCF's defects in railroad rails.

41. Pomiary porowatości w CFRP (*ang. Porosity measurement in CFRP*).

Autorzy: Alireza Akhlaghi

Dolphitech Norway

Streszczenie: Mikroporowatość jest ważną kwestią dla produkcji kompozytów. Może ona wystąpić z powodu nadmiernie złożonej geometrii części, niewłaściwego doboru materiału lub nieprawidłowych cykli utwardzania. Chociaż jej głównym efektem jest osłabienie materiału, nawet jeśli ogólna porowatość pozostaje poniżej poziomu, który powoduje znaczne zmniejszenie wydajności mechanicznej, jej obecność może maskować wykrywanie innych cech powierzchniowych. Mogą to być wady krytyczne, takie jak rozwarstwienia i delaminacje. Panele CFRP o różnym poziomie porowatości zostały wyprodukowane z płaskimi otworami w dolnej części, aby zademonstrować zmienność ich wykrywalności. Te płaskie dolne otwory emulują sygnał od rozklejenia lub delaminacji. Zaobserwowano, że siła sygnału na głębokości reflektora znacznie się zmniejsza w obecności porowatości co podkreśla jej wpływ na maskowanie innych wskazań. Aby kontrolować niską zawartość porowatości, można wykonać pomiary za pomocą Dolphicam2. Dolphicam2 nadaje się do takich pomiarów ze względu na przetwornik 32 mm × 32 mm składającą się ze 128 × 128 elementów. Daje to obraz o wysokiej rozdzielczości i ogromną ilość danych, które nadają się do analizy statystycznej.

Abstract: Microporosity is an important issue for composite manufacture. It can occur due to overcomplex part geometry, inappropriate material selection, or incorrect cure cycles. Although its primary effect is weakening the material, even if the overall

porosity content remains below a level that causes a significant reduction in mechanical performance, its presence can mask the detection of other subsurface features. These can include critical defects such as dis-bonds and delaminations. CFRP panels of varying porosity levels were manufactured with flat bottom holes to demonstrate the variation in their detectability. These flat bottom holes mimic the response from a disbond or delamination. The signal strength at the reflector depth was seen to greatly reduce with porosity highlighting its effect in masking other features. To help ensure porosity content is low, porosity measurements can be taken with the Dolphicam2. The Dolphicam2 is suited to such measurements due to its 32 mm × 32 mm aperture consisting of 128 × 128 elements. This produces a high-resolution image and a vast amount of data that lends itself to statistical analysis.

42. Możliwości i ograniczenia magnetycznej metody MRT badania stanu degradacji lin stalowych w czasie ich eksploatacji (*ang. Possibilities and limitations of the magnetic MRT method for investigating the degradation state of wire ropes during their service life*).

Autorzy: Maciej Martyna, Roman Martyna

Streszczenie: O zużyciu liny decyduje najsłabszy najbardziej zdegradowany odcinek liny. Ogólny stan liny nie ma znaczenia decydującego dla oceny stanu degradacji liny. W czasie długotrwałych badań wizualnych VT długich lin można przeoczyć najbardziej osłabione miejsca, gdyż często nie dają one specjalnych zewnętrznych oznak zużycia. Jedynie badania MRT dają szansę na wykrycie nietypowych uszkodzeń lin. W artykule przedstawiono takie lokalne uszkodzenia decydujące o stanie degradacji lin wykryte przez MRT. Przedstawiono też aktualny stan rozwoju i ograniczenia metody magnetycznej MRT badania lin.

Abstract: Rope wear is determined by the weakest most degraded section of the rope. The overall condition of the rope is not decisive in assessing the degradation of the rope. During long-term VT visual examination of long ropes, the most weakened areas can be overlooked, as they often do not give special external signs of wear. Only MRT rope testing offers a chance to detect abnormal rope damage. The article presents such local damage determining the degradation state of ropes detected by MRT. The current development status and limitations of the magnetic MFL method of rope testing are also presented.

43. Nieniszcząca ocena grubości przypowierzchniowej warstwy azotków w technicznych stopach żelaza metodą prądów wirowych (*ang. Non-destructive assessment of the thickness of the near-surface layer of nitrides in technical iron alloys using the eddy current method*).

Autorzy: Adam Kondej^{1*}, Dominik Kukla^{1,2}

1) Sieć Badawcza Łukasiewicz, Warszawski Instytut Technologiczny 2) Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, *adam.kondej@wit.lukasiewicz.gov.pl

Streszczenie: Celem pracy było zbadanie możliwości zastosowania metody prądów wirowych, techniki pomiaru amplitudy napięcia i częstotliwości rezonansowej, do nieniszczącej oceny grubości przypowierzchniowej warstwy azotków żelaza w stali 42CrMo4 po azotowaniu gazowym. Zakres pracy obejmował wykonanie próbek badawczych, rozkłady twardości metodą Vickers'a oraz pomiary grubości warstw azotków na zglądach poprzecznych, badania warstw azotków metodą prądów wirowych, analizę korelacji wyników badań niszczących z nieniszczącymi. Główną aparaturę badawczą stanowił Wirotest M2 z zestawem głowic pomiarowych. Na podstawie wyników pomiarów wytypowano głowicę 100 kHz jako optymalną do oszacowania grubości warstwy azotków. Umożliwia ona także sortowanie próbek wg grubości strefy dyfuzyjnej na dwie grupy. Do oceny grubości warstwy azotków najdokładniejsza jest analiza amplitudy napięcia. W przypadku sortowania próbek pod względem grubości strefy dyfuzyjnej znajduje zastosowanie analiza amplitudowo-częstotliwościowa. Wirotest M2 może znaleźć zastosowanie w kontroli jakości stalowych części po azotowaniu do wykrywania przypowierzchniowej warstwy azotków żelaza oraz pomiaru jej grubości. Obszarem zastosowania może być przemysł narzędziowy, motoryzacyjny, lotniczy. Badania nieniszczące metodą prądów wirowych pozwalają na kontrolę wszystkich produkowanych części i mogą być uzupełnieniem dla badań niszczących, które są wykonywane dla wybranych elementów z danej partii produkcyjnej.

Abstract: The aim of the work was to investigate the possibility of using the eddy current method, a technique for measuring voltage amplitude and resonant frequency, for non-destructive assessment of the thickness of the near-surface layer of iron nitrides in 42CrMo4 steel after gas nitriding. The scope of work included the preparation of test samples, hardness distributions using the Vickers method and measurements of the thickness of nitride layers on cross-sections, testing of nitride layers using the eddy current method, analysis of the correlation of the results of destructive and non-destructive tests. The main research apparatus was the Wirotest M2 with a set of measuring heads. Based on the measurement results a 100 kHz probe was selected as the optimal one for estimating the thickness of the nitride layer. It also enables the sorting of samples according to the thickness of the diffusion zone into two groups. The most accurate to assess the thickness of the nitride layer is the analysis of the voltage amplitude. In the case of sorting samples in terms of the thickness of the diffusion zone the amplitude-frequency analysis is used. The Wirotest M2 can be used in quality control of steel parts after nitriding to detect the surface layer of iron nitrides and measure its thickness. The area of

application may be the tool, automotive and aviation industries. Non-destructive testing using the eddy current method allows for the control of all manufactured parts and can be a supplement to destructive testing, which is performed for selected elements from a given production batch.

44. Zastosowanie metod badań nieniszczących do oceny karoserii środków transportu drogowego (*ang. Application of non-destructive testing methods to the assessment of road transport vehicle bodies*).

Autorzy: Dariusz Ulbrich, dr hab. inż. Marina Jósko
Politechnika Poznańska, pl. Marii Skłodowskiej-Curie 5,
60-965 Poznań

Streszczenie:

Rosnąca liczba użytkowanych w Polsce, w Europie i na świecie środków transportu drogowego po-woduje konieczność zapewnienia odpowiedniego zaplecza technicznego, pozwalającego na utrzymanie tych środków – pojazdów samochodowych – w stanie zdatności eksploatacyjnej. Występujące zdarzenia losowe, w postaci kolizji lub wypadków drogowych, powodują konieczność odtworzenia pierwotnych właściwości uszkodzonej karoserii pojazdu samochodowego. Głównym celem badań przedstawionych w referacie było opracowanie efektywnych, nieniszczących metod kontroli karoserii środków transportu drogowego, stosowanych w naprawach powypadkowych. W ramach zrealizowa-nych zadań zaproponowano własne procedury kontroli połączeń klejowych, połączenia powłoki z podłożem oraz zgrzein punktowych, jak również wykonano badania grubości fabrycznie nowych powłok lakierowych. Opracowano metodę lokalizacji ścieżki kleju, która na podstawie liczby ech wielokrotnych z obszaru połączenia pozwala na określenie jakości połączenia klejowego. Ponadto, zaproponowano metodę szacowania przyczepności powłoki adhezyjnej do blachy karoseryjnej z uwzględnieniem wartości modułu ciśnieniowego współczynnika odbicia $|r|$ ultradźwiękowej fali podłużnej. Badania grubości powłok lakierowych pozwoliły na określenie poziomu jego wartości, który świadczy o fabrycznie nałożonej powłoce, co może pomóc w ocenie historii pojazdu, zwłaszcza jego szkód komunikacyjnych. Wnioski wynikające z wykonanych wieloetapowych badań pozwalają na wprowadzenie modyfikacji w procesie naprawy powypadkowej karoserii środków transportu drogowego. Opracowane umożliwią uzyskanie wyższej niż dotychczas jakości wykonywanej naprawy i zwiększają możliwość przywrócenia nadwozia pojazdu do stanu fabrycznego.

45. Możliwości wykorzystania metody ultradźwiękowej do oceny połączeń klejowych (ang. Possibilities of using the ultrasonic method to evaluate adhesive joints).

Autorzy: Kowalczyk Jakub, Daniel Wieczorek

Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

Streszczenie: Połączenia klejowe są powszechnie wykorzystywane praktycznie w każdym obszarze produkcji. Znajdują one coraz szersze zastosowanie, co powoduje, że konieczna jest ocena ich jakości. Ocena ta może być prowadzona w sposób niszczący i nieniszczący. Do nieniszczących metod oceny połączeń klejowych zalicza się metodę ultradźwiękową. Metoda ultradźwiękowa w ocenie połączeń klejowych ma szerokie zastosowanie, umożliwia ocenę połączeń na etapie produkcji, eksploatacji oraz w czasie kontroli poawaryjnej. Ponieważ połączenia klejowe cechują się dużą różnorodnością, każdorazowo należy dobrać rodzaj fali ultradźwiękowej oraz jej częstotliwość, a także sposób analizy sygnału. W badaniach wykorzystuje się fale o częstotliwości od 2 do 20 MHz, przy czym wykorzystuje się fale normalne oraz fale powierzchniowe. Częstotliwość fali ultradźwiękowej oraz jej rodzaj

zależą w znacznym stopniu od grubości łączonych elementów, ich właściwości akustycznych oraz właściwości kleju. Przeprowadzone badania potwierdziły, że wykorzystanie metody ultradźwiękowej w ocenie połączeń klejowych jest w pełni uzasadnione.

Abstract: Adhesive joints are widely used in virtually every area of manufacturing. They are becoming more widely used, which makes it necessary to assess their quality. This evaluation can be carried out by destructive and non-destructive means. Non-destructive methods for evaluating adhesive joints include the ultrasonic method. The ultrasonic method in the evaluation of adhesive joints has a wide range of applications, making it possible to evaluate joints at the stage of production, operation and during post-failure inspection. Since adhesive joints are characterized by a wide variety, each time the type of ultrasonic wave and its frequency must be selected, as well as the method of signal analysis. Waves with frequencies from 2 to 20 MHz are used in testing, with normal waves and surface waves. The frequency of the ultrasonic wave and its type depend largely on the thickness of the parts to be joined, their acoustic properties and the properties of the adhesive. The conducted research confirmed that the use of the ultrasonic method in the evaluation of adhesive joints is fully justified.

Bogusław Ładecki*, Joanna Augustyn-Nadzieja
AGH w Krakowie

Problemy pęknięcia zmęczeniowego wału wirnika wentylatora ze stali C45

Problems of fatigue cracking of the fan rotor shaft made of C45 steel

STRESZCZENIE

W referacie omówiono przypadek przedwczesnego wystąpienia pęknięcia zmęczeniowego wału wykonanego ze stali gatunku C45. Przeprowadzone badania wizualne, metalograficzne i pomiary twardości, wykazały występowanie błędów w obróbce termicznej elementu, które nie zostały stwierdzone poprzez wykonanie odpowiednich badań diagnostycznych wału.

Słowa kluczowe: płyty włóknisto-cementowe; badania nieniszczące; ultradźwięki; emisja akustyczna; SEM

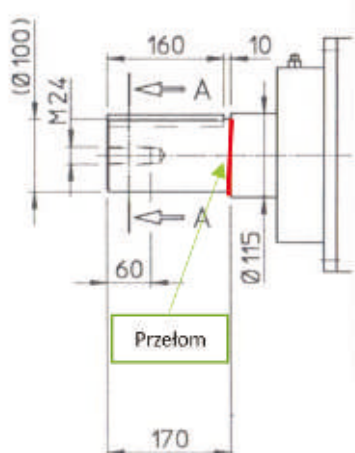
ABSTRACT

The paper discusses the case of premature fatigue crack occurrence of a shaft made of steel grade C45. Visual, metallographic and hardness tests carried out showed the occurrence of errors in the heat treatment of the element, which were not found by performing appropriate shaft diagnostic tests.

Keywords: fibre-cement boards; non-destructive methods; ultrasounds; acoustic emission; SEM

1. Wstęp

Stal gatunku C45 to stal niestopowa do ulepszenia cieplnego i normalizowana, charakteryzująca się dużą wytrzymałością i ciągliwością. Ze względu na swoje właściwości, stal ta jest wykorzystywana do produkcji średnio obciążonych i odporniejszych na ścieranie części maszyn takich jak osie, wały korbowe, mimośrodowe oraz uzębione, wrzeciona, walce, wirniki pomp itp. W pracy analizie poddano wał wirnika wentylatora, który po relatywnie krótkim okresie eksploatacji wynoszącym ok. 10 lat doznał pęknięcia na wskroś w obszarze karbu zilustrowanym na rys. 1.

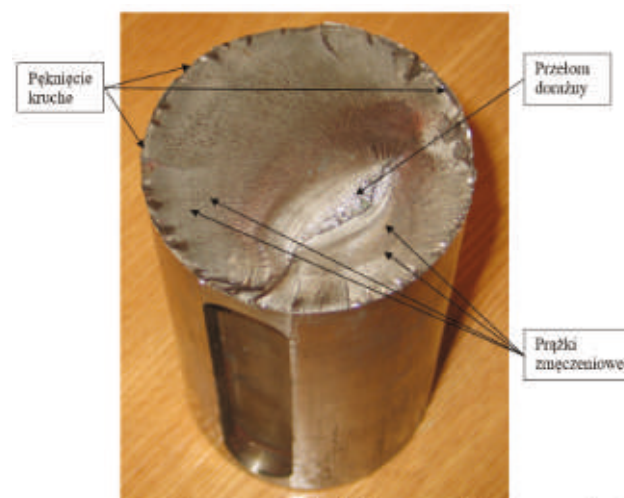


Rys. 1. Uszkodzony zmęczeniowo wał z zaznaczonym miejscem pęknięcia.

Fig. 1. Fatigue-damaged shaft with marked place of cracking.

Odlamany fragment czopa wału pokazano na rys. 2 [1], na którym zaobserwować można obszar inicjacji pęknięcia w postaci kruchego pęknięcia na całym obwodzie czopa, prążki zmęczeniowe oraz przełom doraźny ciągliwy [2,3].

Badania wizualne urwanego czopa wału ujawniły występowanie trzech skupisk licznych defektów powierzchniowych o kształcie półkulistym w obszarze rowka wpułowego [1] – rys. 3.



Rys. 2. Oderwany fragment wału z widocznym przełomem zmęczeniowym.

Fig. 2. A broken fragment- of the shaft with a visible fatigue fracture.

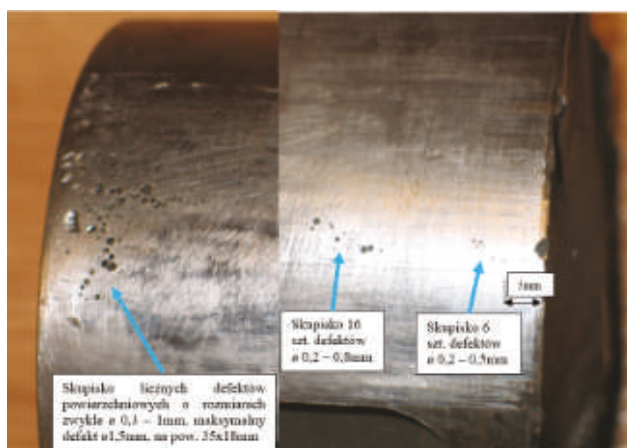
*Autor korespondencyjny.

E-mail: boglad@agh.edu.pl

Tab. 1. Skład chemiczny stali.

Tab. 1. Chemical composition of steel.

	Pierwiastek chemiczny, % mas.						Wynik analizy [1]
	C	Mn	Si	S	P	Fe	
Własna analiza	0,407	0,582	0,318	0,0257	0,0306	reszta	C45 Śr. z 3 pom.



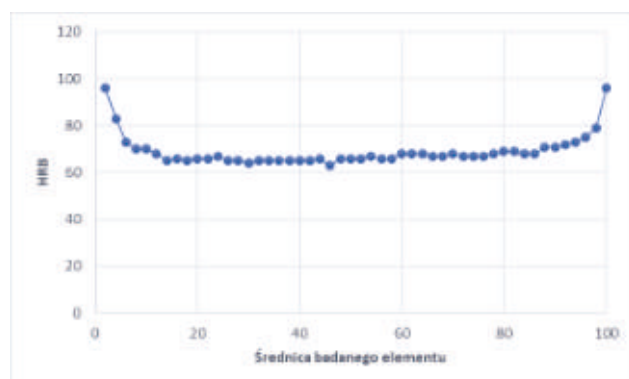
Rys. 3. Czop wału z trzema skupiskami defektów powierzchniowych.

Fig. 3. Shaft journal with three clusters of surface defects.

2. Analiza składu chemicznego i pomiary twardości

Przeprowadzona analiza wykazała (Tab. I), że pod względem składu chemicznego rozważana stal zgodnie z normą [4] odpowiada gatunkowi C45.

Pomiary twardości wykonano na płycie płasko-równoległej wyciętej w pobliżu przełomu czopa. Wyniki pomiarów twardości zestawiono na rys. 4. Wskazują one, że przy powierzchni wału twardość wynosi 98 HRB, by na głębokości ok. 7 mm spaść do wartości 653 HRB. Taki rozkład twardości świadczy, że wał został powierzchniowo obrobiony cieplnie.

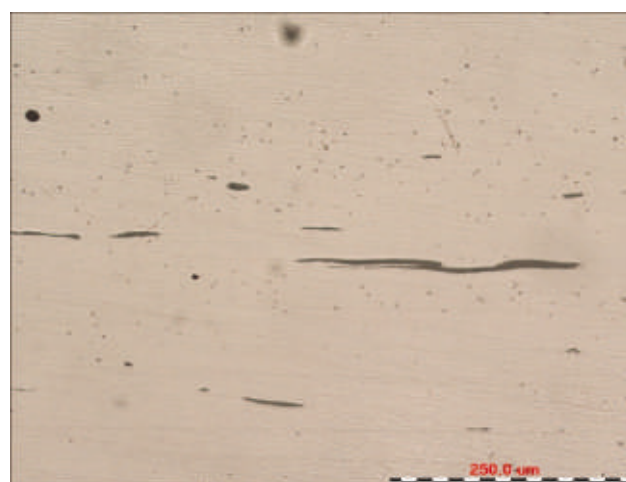


Rys. 4. Wyniki pomiarów twardości HRB na przekroju poprzecznym czopa [mm].

Fig. 4. Results of HRB hardness measurements on the cross-section of the journal [mm].

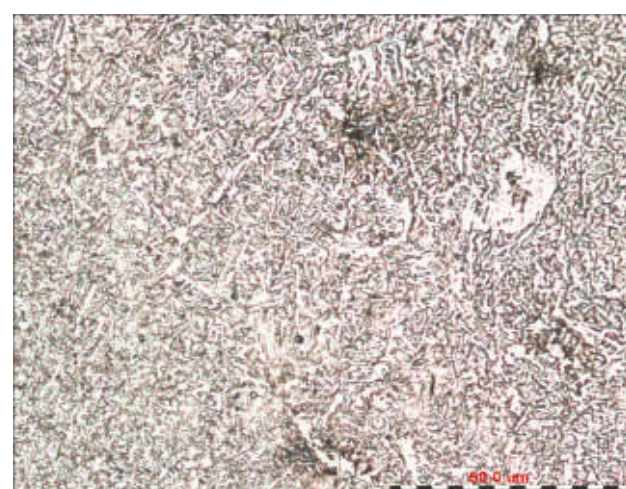
3. Badania metalograficzne

Dla próbki pobranej w obszarze pęknięcia w pobliżu powierzchni zewnętrznej czopa wału zaobserwowano występowanie na całym przekroju znacznej ilości wtrąceń niemetalicznych, głównie krzemianów usytuowanych równoległe do osi wału, jak również kulistych wtrąceń tlenkowych – rys. 5. Badania mikroskopowe wykonane w pobliżu brzegu próbki wskazały obecność mikrostruktury



Rys. 5. Wtrącenia krzemianowe równoległe do osi wału oraz kuliste wtrącenia tlenkowe. Zgląd nietrawiony (obiektyw10).

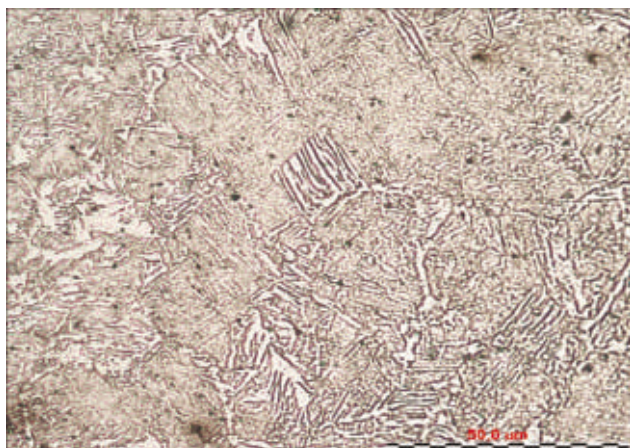
Fig. 5. Silicate inclusions parallel to the shaft axis and spherical oxide inclusions. Undigested death (10x lens).



Rys. 6. Mikrostruktura bainitu górnego od brzegu próbki. Widoczny ferryt po granicach ziarn (obiektyw 50). Trawiono nital.

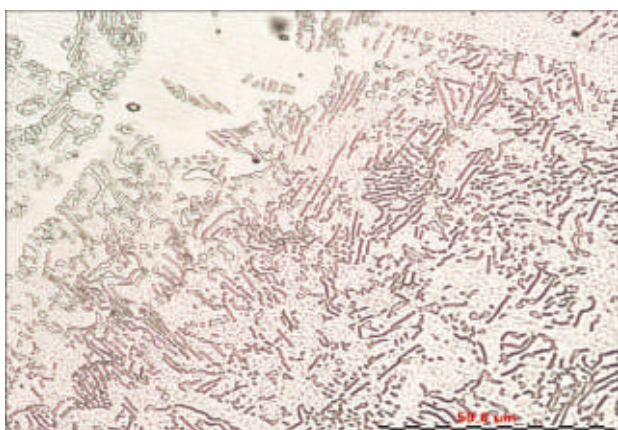
Fig. 6. Microstructure of the bainite upper from the edge of the sample. Visible ferrite along the grain boundaries (50x lens). Etched with nital

bainitu górnego - rys. 6, który charakteryzuje się słabą odpornością na pękanie, słabą ciągliwością oraz ma niskie własności wytrzymałościowe [5-8]. Bainit ten powstaje po schłodzeniu poniżej temperatury 550C. Na głębokości ok. 2 mm zaobserwowano występowanie mikrostruktury Widmanstattena - rys. 7, która charakteryzuje się małą odpornością na pękanie, natomiast w odległości ok. 12 mm od powierzchni mikrostrukturę ferrytyczno-perlityczną z perlitem ziarnistym charakterystycznym dla stanu zmiękzonego - rys. 8. Badania fraktograficzne za pomocą SEM wskazały występowanie kruchego przełomu międzykrystalicznego od powierzchni zewnętrznej - rys. 9. Za strefą tą zaobserwowano przełom zmęczeniowy z wyraźnymi liniami zatrzymań czoła pęknięcia - rys. 2, natomiast w odległości ok. 12 mm od powierzchni czopa wału przełom ciągły zmęczeniowy - rys. 10.



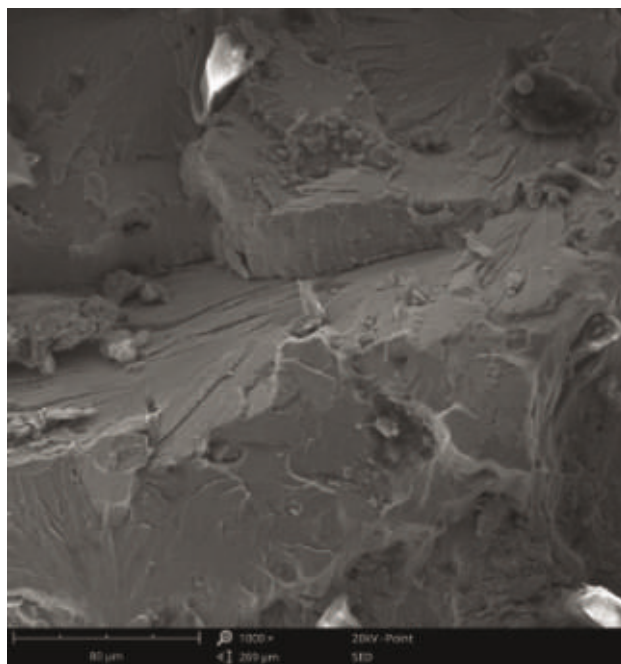
Rys. 7. Mikrostruktura w odległości ok. 2 mm od powierzchni. Widoczna struktura Widmanstattena - ferryt i perlit w układzie iglastym (obiektyw 50). Trawiono nitałem.

Fig. 7. Microstructure at a distance of approx. 2 mm from the surface. Visible Widmanstätten structure – ferrite and pearlite in an acicular system (50x lens). Etched with nital.



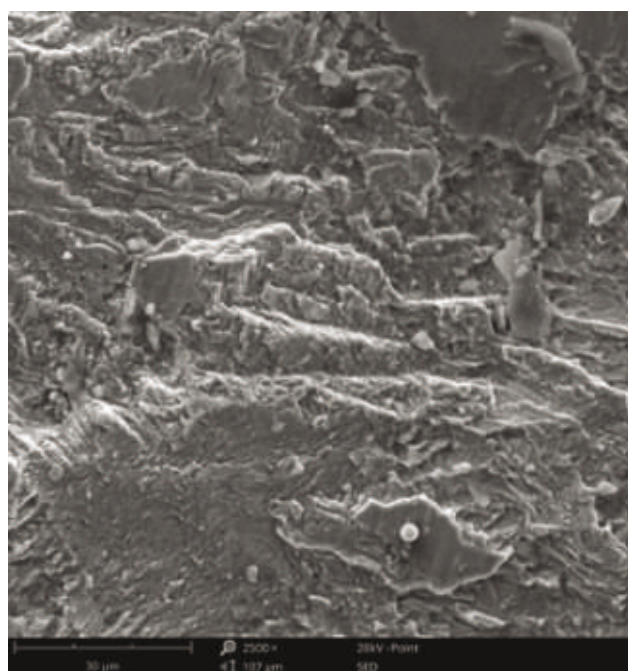
Rys. 8. Mikrostruktura w odległości ok. 12 mm od powierzchni. Widoczna mikrostruktura ferrytyczno-perlityczna z cementytem zesferoidyzowanym (obiektyw 50). Trawiono nitałem.

Fig. 8. Microstructure at a distance of approx. 12 mm from the surface. Visible ferritic-pearlitic microstructure with spheroidized cementite (50x lens). Etched with nital.



Rys. 9. Obraz SEM przełomu blisko powierzchni zewnętrznej wału z widocznym pęknięciem międzykrystalicznym (pow. 1000x).

Fig. 9. SEM image of a fracture close to the outer surface of the shaft with a visible intergranular crack (1000x lens)



Rys. 10. Obraz SEM przełomu w odległości ok. 12mm od powierzchni zewnętrznej wału z widocznym przełomem ciągłym zmęczeniowym (pow. 2500x).

Fig. 10. SEM image of a fracture close at a distance of approx. 12 mm from the outer surface of the shaft with a visible ductile fatigue fracture (2500x lens)

4. Podsumowanie

Wał wirnika wentylatora wykonano ze stali węglowej gatunku C45 przeznaczonej do ulepszania cieplnego (hartowanie, odpuszczanie). Po takiej obróbce cieplnej, tj. hartowaniu na martenzyt i niskim odpuszczaniu, na powierzchni można uzyskać twardość do 54HRC. Efekt wykonanej obróbki cieplnej rozważanego wału widoczny jest na rys. 4. Przeprowadzone pomiary twardości wykazały, że w pobliżu powierzchni twardość wynosi ok. 98 HRB, co w przybliżeniu odpowiada twardości ok. 20 HRC [9].

Badania wykonane za pomocą mikroskopu świetlnego wykazały obecność mikrostruktury bainitu górnego (rys. 6), który charakteryzuje się słabą odpornością na pękanie, słabą ciągliwością, oraz ma niskie własności wytrzymałościowe. Bainit ten powstaje po schłodzeniu poniżej temperatury 550C. Na całym przekroju wału stwierdzono występowanie licznych wtrąceń niemetalicznych (rys. 5). Na głębokości ok. 2 mm zaobserwowano mikrostrukturę Widmanstattena (rys. 7), która charakteryzuje się małą odpornością na pękanie, natomiast w odległości ok. 12 mm od powierzchni mikrostrukturę ferrytyczno-perlityczną z perlitem ziarnistym (rys. 8) charakterystyczną dla stanu zmiekczonego.

Badania fraktograficzne za pomocą SEM wykazały występowanie od powierzchni zewnętrznej kruchego przełomu międzykrystalicznego (rys. 9) oraz transkrystalicznego. Za tą strefą zaobserwowano przełom zmęczeniowy z wyraźnymi liniami zatrzymań czoła pęknięcia (rys. 2 i 10).

Jako podstawową przyczynę wystąpienia pęknięcia wału, wskazać można błędy w procesie technologicznym obróbki cieplnej powierzchniowej (hartowanie i odpuszczanie), polegające na powstaniu kruchej struktury bainitu górnego w zewnętrznej warstwie powierzchni wału o zbyt małej twardości, a co za tym idzie zbyt niskiej wytrzymałości. Wskutek powyższego podczas eksploatacji elementu nastąpiła inicjacja pęknięcia, poprzez powstanie kruchego pęknięcia obwodowego w obszarze koncentracji naprężeń związanym z karbem geometrycznym (rys. 1), w warstwie powierzchniowej o grubości ok. 5 – 7 mm. Pęknięcie to rozwinęło się dalej jako pęknięcie zmęczeniowe ciągliwe propagujące na wskroś elementu. Stwierdzone występowanie na powierzchni czopa wału skupisk defektów (rys. 3) związane jest prawdopodobnie ze występowaniem wtrąceń niemetalicznych, często o kształcie kulistych wtrąceń tlenkowych (rys. 5).

Pomimo, że zastosowana stal w pełni spełnia wymagania konstrukcyjne przedmiotowego wału, brak przeprowadzenia poprawnie zaplanowanych badań odbiorczych, polegających na etapie wykonania elementu na przeprowadzeniu kontroli jakości wykonania obróbki termicznej np. poprzez wykonanie pomiarów twardości, w połączeniu z badaniami nieniszczącymi, było przyczyną przedwczesnego wystąpienia uszkodzenia zmęczeniowego wału oraz poważnej awarii.

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

5. Literatura

- [1] B. Ładecki, J. Augustyn-Nadzieja, T. Skowronek: Analiza przyczyn pęknięcia wału wirnika wentylatora. AGH, KPiEM, praca nie publikowana, Kraków 2023.
- [2] N. E. Dowling: Mechanical Behavior of Materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. Printice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, 1999.
- [3] J. Schijve: Fatigue of Structures and Materials. Springer Science + Business Media B.V., Amsterdam 2009.
- [4] PN-EN 10083-2:2008 (Stale do ulepszania cieplnego - Część 2: Warunki techniczne dostawy stali niestopowych).
- [5] K. Przybyłowicz: Metaloznawstwo WNT Warszawa 1999.
- [6] O. Hajizad, A. Kumar, Z. Li., R. H. Petrov, J. Sietsma and R. Dollevoet: "Influence of Microstructure on Mechanical Properties of Bainitic Steels in Railway Applications" Metals 2019, 9(7), 778; <https://doi.org/10.3390/met9070778>
- [7] F. B. Pickering: Structure-Property Relationships in Steels. Material Science and Technology; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, Germany, 2006; pp. 43–81.
- [8] Krauss G.: 4 - Physical metallurgy of steels: An overview, Automotive Steels Design, Metallurgy, Processing and Applications 2017, pp. 95-111. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100638-2.00004-3>.
- [9] PN-93/H-04357: Stal i staliwo. Tablice porównawcze twardości.



Dr inż. Bogusław Ładecki, jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademii Górniczo Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie. Od wielu lat pełni funkcję Sekretarza Zarządu w Polskim Towarzystwie

Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP, jak również funkcję członka Zarządu Krakowskiego Oddziału SIMP. Jako autor lub współautor ponad stu publikacji naukowo-badawczych, zajmuje się problemami wytrzymałości, zmęczenia, oraz badań nieniszczących materiałów i konstrukcji.



Dr inż. Joanna Augustyn-Nadzieja, adiunkt Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, pracownik Wydziału Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej. Autorka ponad 100 publikacji naukowych, promotor naukowy ponad 90 prac i projektów

dyplomowych. Z ogromną satysfakcją i przyjemnością pełni rolę Tutora akademickiego. Konsultant i ekspert prac dla przemysłu z zakresu materiałoznawstwa. Od strony naukowej interesuje się materiałami Co-Cr otrzymanymi techniką druku 3D, stosowanymi w protetyce dentystycznej. Od 2020 roku pełni funkcję Pełnomocnika Rektora ds. Kół Naukowych; pod swoją opieką ma ponad 60 kół naukowych działających na Akademii Górniczo-Hutniczej.

INFORMACJE BNiD

Wspomnienie o płk. dr. inż. Romanie OSTROWSKIM

Urodził się 26.06.1929r w Ostrowie Wielkopolskim w rodzinie powstańca wielkopolskiego. Wojna przerwała mu naukę w szkole podstawowej i w wieku 14 lat zmuszony został podjąć pracę w Zakładach Naprawczych Taboru Kolejowego w Ostrowie Wlkp. Po wojnie ukończył Gimnazjum Kolejowe.

W 1947r powołany został do Zasadniczej Służby Wojskowej w której pozostał jako podoficer zawodowy. W wojsku ukończył Techniczną Szkołę Lotnictwa w Warszawie oraz Zaoczne Liceum Mechaniczne i Wieczorowe Liceum Ogólnokształcące. W 1953 podjął studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej. Po studiach w 1959r. został skierowany do pracy w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych w którym pracował do emerytury w 1998r. W czasie swojej służby w ITWL zajmował się zagadnieniami związanymi z przyczynami pojawiania się wad eksploatacyjnych i produkcyjnych elementów silników i płatowców wojskowych statków powietrznych. W efekcie opracował około 350 dokumentów w postaci instrukcji, ekspertyz i innych opracowań. Między innymi doprowadził do publikacji „Poradnik. Ocena Stanu Technicznego Elementów Statków Powietrznych Metodami Defektoskopowymi” wydanego przez Dowództwo Wojsk Lotniczych w 1982r. Był również współautorem książki „Wykrywanie Wad Powierzchniowych Metodą Penetracyjną” wydaną w 1972r przez Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, oraz w 1983r autorem książki „Defektoskopia Penetracyjna.



Materiały Szkoleniowe” wydaną przez Instytut Metalurgii Żelaza. W 1984r obronił pracę doktorską na Wydziale Mechanicznym Wojskowej Akademii Technicznej i uzyskał tytuł doktora nauk technicznych. W swoim dorobku posiadał 6 patentów i wzorów użytkowych oraz wiele wniosków racjonalizatorskich. Za swoją działalność racjonalizatorską w 1980r wyróżniony został Nagrodą II stopnia w konkursie ”Za wybitne osiągnięcia w zakresie Techniki” dla Wojskowych kół NOT i uzyskał Tytuł i Odznakę Racjonalizatora Wojskowego. Obok pracy zawodowej wymienić należy szeroko zakrojoną działalność społeczną, organizacyjną, szkoleniową i rzeczoznawczą. W 1961r zapisał się do Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich (SIMP). W latach 1961-1969 był Członkiem Zarządu Oddziału Warszawskiego SIMP, w którym pełnił funkcję Przewodniczącego Komisji Rewizyjnej. W latach 1962-1987 był przedstawicielem SIMP w Urzędzie Patentowym PRL. W latach 1962r. do 1980r. był współzałożycielem, następnie Sekretarzem i Przewodniczącym Koła SIMP przy ITWL. Od 1963r był członkiem Sekcji Wytrzymałości Materiałów SIMP. A od 1969r przez 18 lat był vice Przewodniczącym Sekcji Wytrzymałości i Badania Materiałów (SWiBM). Od 1970r, gdy SWiBM stała się przedstawicielem Polski przy organizacji VII Międzynarodowej Konferencji Badań Nieniszczących, pełnił funkcję Vice-Przewodniczącego Komitetu Organizacyjnego Konferencji. Za swoją aktywną działalność został wyróżniony Nagrodą II stopnia Komitetu Nauki i Techniki. oraz w 1976r Nagrodą II stopnia Ministra Obrony Narodowej. W 1974r uzyskał Tytuł Dyplomowany Rzeczoznawca SIMP. Jako vice-przewodniczący SWiBM czynnie brał udział w organizowaniu seminariów, narad technicznych, konferencji i kursów. W 1985r był Przewodniczącym Komitetu Organizacyjnego 14. Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących w Kiekrzu k/Poznań. W następnym 1986r. również jako Członek Komitetu Organizacyjnego był zaangażowany w organizację 15 KKBN w Ryni. W latach 1979- 1981 działał w Radzie Programowej czasopisma „Eksploatacja Maszyn”. Opracował wkładkę pt.: ”Badania Nieniszczące i Wytrzymałość Materiałów” do terminarza ”Technika Mechanika” w latach 1984 i 1985. Był aktywnym wykładowcą z zakresu Badań Nieniszczących zarówno dla personelu Służb Technicznych Dowództwa Wojsk Lotniczych jak i dla personelu cywilnego w ramach szkoleń prowadzonych przez Ośrodek Doskonalenia Kadr SIMP. Ponieważ biegle znał język niemiecki i angielski w 1985r. uzyskał uprawnienia Tłumacza Technicznego SIMP w zakresie tych języków. W roku 1987 został wybrany na Przewodniczącego SWiBM, funkcję tę pełnił do 1990r. W 1987r uzyskał Tytułarny III stopień kwalifikacji w zakresie Badań Nieniszczących nadany przez Specjalną Komisję Kwalifikacyjną SIMP. Od 1990r aż do emerytury w 1998r. był Członkiem Zarządu i pełnił funkcję Przewodniczącego Komisji Rewizyjnej Towarzystwa.

Za swoją aktywną działalność społeczną został odznaczony Srebrną i Złotą Odznaką Honorową SIMP i Srebrną i Złotą Odznaką Honorową NOT. Za całokształt swojej pracy był uhonorowany: Krzyżem Kawalerskim Orderu Odrodzenia Polski oraz Srebrnym i Złotym Krzyżem Zasługi.

Kolega Roman Ostrowski był wspaniałym kolegą i przyjacielem, zmarł w rodzinnym Ostrowie Wlkp. w dniu 30.06.2023r w wieku 94 lat.

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 zawierać:

- 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](http://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](http://www.bnid.pl).

PRENUMERATA

Prenumerata realizowana jest przez Redakcję. Kontakt i zamówienia pod adresem mailowym: wydawnictwo@bnid.pl.

