

Badania Nieniszczące i Diagnostyka

3/2018

Kwartalnik Naukowo-Techniczny

Nondestructive Testing and Diagnostics



20 Years **NDT**
1998 - 2018
VT MT PT UT RT ET



TÜV Rheinland Polska od 20 lat organizuje w Polsce szkolenia i egzaminy z zakresu badań nieniszczących. Nasi wykładowcy i egzaminatorzy oprócz szerokiego zakresu wiedzy merytorycznej posiadają również doświadczenie praktyczne w wykonywaniu badań w różnych gałęziach przemysłu. Takie zaplecze pozwala nam przygotować i przeprowadzić szkolenia nawet mocno wyspecjalizowane i tym samym zaoferować wsparcie, którego oczekuje klient.

W standardzie oferujemy szkolenia i egzaminy w 1., 2. i 3 stopniu kwalifikacji w metodach ET, MT, PT, VT, RT, UT oraz technikach UTPA oraz UT-TOFD spełniające wymagania normy EN ISO 9712 i obejmujące zakres Dyrektywy Urzędów Ciśnieniowych 2014/68/UE.

Egzaminy kwalifikacyjne i proces certyfikacji przeprowadzane są przez niezależną i akredytowaną przez PCA Jednostkę Certyfikującą Osoby (nr AC 195).

www.tuv.pl

 **TÜVRheinland®**
Precisely Right.

Cena 18,50 zł (w tym 5% VAT)

PLISSN 2451-4462

Rok założenia 2016

OLYMPUS

Your Vision, Our Future



OmniScan

– uniwersalna platforma badań UT!

- Badania spoin UT, TOFD, Phased Array
- Mapowanie korozji
- Badania w energetyce
- Badania w lotnictwie
- i wiele innych...

www.olympus-ims.com/pl/OmniScan-mx2/



O szczegóły oferty zapytaj przedstawiciela Olympus
lub wyślij zapytanie na **industrial@olympus.pl**

Olympus Polska Sp. z o. o. | ul. Suwak 3, 02-676 Warszawa | tel.: (22) 366 00 77

industrial@olympus.pl | **www.olympus-ims.com**





Badania Nieniszczące i Diagnostyka
Agenda Wydawnicza SIMP
ul. Sabaly 11a, 71-341 Szczecin
tel. +48 576 400 550
e-mail: wydawnictwo@ptbnidt.pl
www.bnid.pl

ZESPÓŁ REDAKCYJNY / EDITORIAL BOARD

REDAKTOR NACZELNY / EDITOR-IN-CHIEF

Jerzy Nowacki

Z-CY REDAKTORA NACZELNEGO / DEPUTES EDITOR-IN-CHIEF

Tomasz Chady, Ryszard Pakos

SEKRETARZ NAUKOWY / SCIENTIFIC SECRETARY

Grzegorz Psuj

REDAKTOR JĘZYKOWY / EDITOR OF LANGUAGE AFFAIRS

Marcin Żytkowiak

REDAKTOR STATYSTYCZNY / EDITOR OF STATISTIC AFFAIRS

Sławomir Krajewski

REDAKTOR WYDAWNICZY / PUBLISHING EDITOR

Adam Sajak

REDAKTORZY DZIAŁOWI / SECTION EDITORS

METODOLOGIA BADAŃ / RESEARCH METHODOLOGY

Dr Sławomir Mackiewicz, Dr Marek Śliwowski

CERTYFIKACJA W BADANIACH / CERTIFICATION IN RESEARCH

Mgr Bogdan Piekarczyk, Mgr Marta Wojaś

URZĄDZENIA I SYSTEMY BADAŃ

/ EQUIPMENT AND SYSTEMS FOR RESEARCH

Dr Grzegorz Jezierski, Mgr Marek Lipnicki

PRAKTYKA PRZEMYSŁOWA BADAŃ

/ PRACTICE OF INDUSTRIAL RESEARCH

Dr Krzysztof Dragan, Mgr Bogusław Olech, Mgr Darek Wojdała

DIAGNOSTYKA / DIAGNOSTICS

Dr Bogusław Ładecki, Dr Ryszard Nowicki

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 Lotnictwa, 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. Leonard Runkiewicz, Instytut Techniki Budowlanej, Polska

Prof. Krzysztof Schabowicz, Politechnika Wrocławska, Polska

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

Prof. Jacek Stania, Instytut Spawalnictwa w Gliwicach, Polska

Prof. Jacek Szelażek, IPPT PAN, Polska

Prof. Andrzej Szymański, Politechnika Śląska, Polska

Dr Marek Śliwowski, NDTTEST Warszawa, Polska

Prof. Antonello Tamburino, University of Cassino and Southern Lazio, Italia

Prof. Yuji Tsuchida, Oita University, Japan

Prof. Andrzej Tytko, AGH Kraków, Polska

Prof. Lalita Udp, Michigan State University, USA

Prof. Gábor Vértessy, 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 3/2018

ISSN 2451-4462

VOLUMEN 3

SPIS TREŚCI

Jerzy Nowacki, Norbert Sieczkiewicz, Michał Nocoń Pomiar odkształceń spawalniczych metodami skanowania 3D*	3
Kilian Tschöke, Tobias Gaul, Thomas Klesse, Uwe Lieske, Friedrich von Dungern, Julia Guerrero-Santafe, Hannelore Wessel-Segebade Development of an integrated measurement system for CFRP components within automotive manufacture*	7
Piotr Bielawski Potencjał eksploatacyjny połączeń wciśkowych maszyn okrętowych*	13
Piotr Bielawski, Cezary Boćkowski Pneumatyczny sensor szczelności komory roboczej silnika spalinowego*	16
Leonard Runkiewicz Historia metod nieniszczących stosowanych w budownictwie polskim*	19
Leonard Runkiewicz, Jan Sieczkowski Ocena techniczna obiektów budowlanych z wykorzystaniem metod nieniszczących i seminieniszczących*	25
Mickael Messaoudi, Bruno Pouet Recent development in all-optical ultrasonic shear wave inspection*	31
Magdalena Rucka Badania nieniszczące i monitoring elementów konstrukcji budowlanych w warunkach laboratoryjnych*	36
P. Rioux, F. Lachance, D. Giguère, J. Turcotte Novel imaging techniques for defects characterisation in Phased Array inspection*	42
Krzysztof Schabowicz Najnowsze metody nieniszczące wykorzystywane w badaniach w budownictwie*	48
Bogusław Ładecki, Łukasz Knysak Badania nieniszczące połączeń lutowanych rur cienkościennych ze stali nieferromagnetycznych*	53
Marek Śliwowski Zwiększanie wiarygodności badania złączy spawanych rurociągów dla cyfrowych technik radiograficznych oraz ultradźwiękowych*	56
Aleksandra Mazurek Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych w diagnostyce technicznej obiektów budowlanych metodami nieniszczącymi*	66
Marcin Lewandowski, Mateusz Walczak, Beata Witek, Jakub Rozbicki, Tomasz Steifer Demonstrator przenośnego systemu Phased-Array z funkcją Full-Matrix Capture*	70
Marek Chalimoniuk, Artur Kułaska Możliwości zastosowania metody tomografii komputerowej (CT) w lotnictwie*	72
Łukasz Drobiec Badania nieniszczące wykorzystywane w praktyce budowlanej*	76
Radosław Jasiński Wyznaczanie wytrzymałości na ściskanie muru z autoklawizowanego betonu komórkowego metodą małoszczątkową*	81
Jerzy Kozłowski, Martin Czysch, Jakub Kozłowski Badania nieniszczące stosowane w procesie zabezpieczenia antykorozyjnego konstrukcji stalowych*	86
Janusz Hołowaty, Bernard Wichtowski Pierwszy na świecie drogowy kratownicowy most spawany w świetle badań NDT	93
Bernard Wichtowski, Krzysztof Pysiak Jakość spawanych połączeń doczołowych w stalowych mostach kolejowych Szczecina.....	94
Informacje dla Autorów i Czytelników	96

* - artykuł recenzowany

PATRONAT I STAŁA WSPÓŁPRACA
/PATRONAGE AND PERMANENT COOPERATION

casp system
ADVANCED TECHNOLOGIES

TÜVRheinland®
Precisely Right.

TELEMOND
HOLDING

badania wizualne
Everest
Polska www.endoskopy.pl

OLYMPUS

PTBNiDT



INSTYTUT SPAWALNICTWA
Polskie Spawalnicze Centrum Doskonałości

LABORATORIUM BADAWCZE SPAWALNICTWA

Usługi badawcze w Instytucie Spawalnictwa prowadzone są przez akredytowane Laboratorium Badawcze Spawalnictwa (LBS), które – dla potrzeb certyfikacji, odbiorów i dopuszczeń – wykonuje badania:

- materiałów przeznaczonych na konstrukcje spawane
- połączeń spajanych metali i ich stopów oraz tworzyw sztucznych
- sprzętu do spawania.

Laboratorium oferuje:

- badania nieniszczące
 - wizualne
 - penetracyjne
 - magnetyczno-proszkowe
 - ultradźwiękowe
 - radiograficzne
- badania mechaniczne
- badania metalograficzne (makro i mikroskopowe)

LBS ma system zarządzania jakością według normy PN-EN ISO/IEC 17025.

NAUKA DLA PRZEMYSŁU



Instytut Spawalnictwa
ul. Bł. Czesława 16-18, 44-100 Gliwice
tel.: 32 231 00 11, fax: 32 231 46 52
is@is.gliwice.pl, www.is.gliwice.pl

Jerzy Nowacki*, Norbert Sieczkiewicz, Michał Nocoń
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Pomiar odkształceń spawalniczych metodami skanowania 3D

Measurement of welding deformations using the 3D scanning methods

ABSTRACT

The article describe major problems related to measurement of welding deformations, in particular using the 3D scanning methods are presented. The study includes a review of already available industrial 3D scanning technology solutions. Experimental investigation of high strength steel welding deformations has been done. Surfacing was performed on S960QL steel by SAW method with different welding parameters applied. Appropriate 3D scanning technology was selected. 3D scans were obtained, using Kinect for Windows v1 and v2, DAVID SLS-3. Steel plates were measured using GOM ATOS III Triple Scan. Metrology grade 3D scanner used for measurements of weld distortions ensured required accuracy of measurement. Results proved the rightness and accuracy of such solution.

Keywords: welding deformations; 3D scanning; structured light scanning; laser scanning

STRESZCZENIE

W artykule zaprezentowano podstawową problematykę związaną z pomiarem odkształceń spawalniczych metodami skanowania 3D. Dokonano przeglądu dostępnych rozwiązań przemysłowych na rynku skanerów 3D oraz wykonano analizę wyników badań eksperymentalnych wielkości odkształceń stali o wysokiej wytrzymałości S960QL napawanej metodą SAW. Dobrano technikę skanowania dla prostokątnych próbek stalowych, wykorzystując następujące technologie: Kinect dla systemu Windows v1 oraz v2, DAVID SLS-3. Podczas pomiarów odkształceń wykorzystano skaner GOM ATOS III Triple Scan. Wyniki badań uzasadniają zastosowanie przemysłowego skanera 3D do pomiaru wielkości odkształceń, który pozwala na rejestrację najmniejszych różnic pomiędzy próbką przed i po napawaniu.

Słowa kluczowe: odkształcenia spawalnicze; skanowanie 3D; metoda światła strukturalnego; skanowanie laserowe

1. Wstęp

Podczas spawania i napawania konstrukcji stalowych, w wyniku grzania, topienia i chłodzenia w spoinie oraz materiale podstawowym powstają naprężenia cieplne, które mogą być przyczyną odkształceń, przekroczenia tolerancji wymiarowych oraz niedopasowania do siebie elementów podczas procesu montażu całej konstrukcji.

Dążenie do zmniejszenia kosztów produkcji, przy jednoczesnym zwiększaniu wymagań dotyczących ich wytrzymałości i bezpieczeństwa, wymaga poszukiwania metod pozwalających na ograniczenie wielkości odkształceń spawalniczych. Usuwanie odkształceń spawalniczych związane jest z dodatkowymi, często kosztownymi i czasochłonnymi, procesami. Przykładem takich procesów jest prostowanie za pomocą prasy, prostowanie płomieniowe, wyżarzanie odprężające oraz stabilizacja wibracyjna.

W artykule rozpatrywane będą bezkontaktowe metody pomiaru odkształceń przy użyciu skanowania 3D. Pozwalają one na bardzo dokładne pomiary i późniejszą analizę względem elementu odniesienia, jak na przykład model CAD, dzięki czemu możliwe jest poznanie zmian wymiarów w wyniku spawania oraz lepsze zaprojektowanie konstrukcji i opracowanie technologii spawania w celu zwiększenia potencjału eksploatacyjnego wytworzonych konstrukcji.

2. Wymagania stawiane skanerom 3D

Podczas doboru skanera do kontroli odkształceń spawalniczych należy kierować się podobnymi wymaganiami jak

dla skanerów do kontroli jakości, które obejmują:

- dokładność odtworzenia za pomocą skanera – należy zwrócić uwagę na maksymalny błąd określony w specyfikacji skanera;
- stopień złożoności geometrii skanowanego obiektu – skomplikowany kształt, miejsca trudnodostępne (np. głębokie otwory) oraz złożona geometria obiektu wymagają zastosowania skanera z dwiema kamerami, co zmniejsza ilość pozycji skanowania, a więc skraca czas pracy. Zmniejsza się również ilość szumu, w porównaniu do skanera z jedną kamerą, co zwiększa jakość skanu;
- wymiary minimalne oraz maksymalne obiektu skanowanego – należy uwzględnić, jakie maksymalne pole pomiarowe można wykorzystać. Należy tak dobrać pole pomiarowe, aby wykorzystać całą rozdzielczość skanera na obiekt. Dobrze dobrane pole pomiarowe charakteryzuje się pełnym wykorzystaniem pikseli podczas procesu skanowania;
- barwa i materiał detalu – należy sprawdzić, czy detal wymaga matowienia z użyciem preparatów matujących, co może być przeszkodą w zachowaniu oryginalnej barwy skanowanego przedmiotu. W przypadku badania próbek stalowych, jedynym problemem mogą być refleksy na powierzchni materiału [1].

3. Wybrane rodzaje metod skanowania 3D

3.1 Skanery digitalizacyjne i metrologiczne

Skanery 3D przeznaczone są do digitalizacji oraz metrologii [1]. Dokładność skanerów do digitalizacji jest

*Autor korespondencyjny. E-mail: jerzy.nowacki@zut.edu.pl

wystarczająca do odwzorowania geometrii skanowanego obiektu bez wymogu wzorcowania. Skanery stosowane w metrologii muszą spełniać wymagania dokładności wg normy VDI/VDE 2634 lub ISO 10360 część 8. Mogą również spełniać wymagania ASTM (Tab. 1). Norma VDI/VDE 2634 dotyczy badania dokładności urządzeń optycznych wykonujących pomiary na podstawie jednego zdjęcia, zaś jej druga część dotyczy badania urządzeń optycznych wykonujących pomiary na podstawie kilku zdjęć. Podaje algorytm weryfikacji urządzenia oraz schemat postępowania w celu kalibracji urządzenia. Opisuje również sposób ponownej weryfikacji urządzenia. Jest ono ważne dla użytkownika urządzenia pomiarowego oraz pozwala na utrzymanie granicznych błędów dopuszczalnych na stałym poziomie.

Dokładność skanera 3D określają:

- dokładność głowicy skanującej;
- dokładność pomiaru odległości między sferami;
- dokładność odwzorowania płaszczyzny [2].

Tab. 1. Wykaz norm dotyczących metod testowania skanerów 3D według wymagań ASTM [3].

Tab. 1. ASTM standards list related to evaluation of 3D scanners [3].

Numer normy	Tytuł normy
E2919 - 14	Standard Test Method for Evaluating the Performance of Systems that Measure Static, Six Degrees of Freedom (6DOF), Pose
E2938 - 15	Standard Test Method for Evaluating the Relative-Range Measurement Performance of 3D Imaging Systems in the Medium Range
E3064 - 16	Standard Test Method for Evaluating the Performance of Optical Tracking Systems that Measure Six Degrees of Freedom (6DOF) Pose
E3124 - 17	Standard Test Method for Measuring System Latency Performance of Optical Tracking Systems that Measure Six Degrees of Freedom (6DOF) Pose
E3125 - 17	Standard Test Method for Evaluating the Point-to-Point Distance Measurement Performance of Spherical Coordinate 3D Imaging Systems in the Medium Range

3.2 Skanery laserowe bliskiego zasięgu

Skanery laserowe bliskiego zasięgu stosowane są do triangulacji dla rejestracji kształtu trójwymiarowego obiektu i opisu pod postacią chmury punktów. Wiązka lasera kierowana jest na powierzchnię obiektu i po odbiciu od skanowanej powierzchni jej początkowa trajektoria zostaje zaburzona oraz zebrana w sensorze optycznym CCD. Dzięki triangulacji na podstawie zaburzonej wiązki można określić kąt odbicia światła, który jest zależny od odległości skanera od badanej powierzchni dzięki czemu staje się podstawą do obliczenia odległości obiektu od skanera. Gdy skaner zbierze wystarczającą ilość danych, możliwe jest stworzenie mapy powierzchni skanowanego obiektu. Aby możliwe było poprawne zeskanowanie obiektu, dystans między sensorem, a źródłem lasera musi być znany i ściśle określony. Zaletami skanerów laserowych bliskiego zasięgu jest jego dokładność i rozdzielczość oraz możliwość przenoszenia skanera. Takie skanery są również mniej wrażliwe na zmiany warunków oświetlenia w porównaniu z na przykład fotogrametrią.

Skanery laserowe bliskiego zasięgu nie sprawdzają się w przypadku przezroczystych lub błyszczących powierzchni i w związku z tym wymagane jest wówczas zmatowienie powierzchni [4,5].

3.3 Skanery laserowe dalekiego zasięgu

Skanery laserowe dalekiego zasięgu dzielą się na skanery impulsowe i skanery z przesunięciem fazowym. Do zastosowań na bliższe odległości lepiej sprawdzają się skanery oparte na zasadzie triangulacji, ponieważ wykazują się większą dokładnością (Tab. 2).

Tab. 2. Charakterystyki metrologiczne laserowych metod pomiarowych [6].

Tab. 2. The metrological characteristics of laser scanning techniques [6].

Metoda pomiarowa	Zakres pomiarowy, m	Dokładność, mm	Szybkość skanowania, punkty na sekundę
Pomiar czasu przelotu impulsu	< 1500	< 20	Do 12 000
Pomiar przesunięcia fazowego	< 100	< 10	Do 625 000
Triangulacja	Kilka metrów	< 0,1	Do 10 000

Skanery impulsowe

Skanery impulsowe mogą skanować na dalekie odległości dzięki temu, że w nich można uzyskać dużą moc w impulsie oraz krótki czas trwania impulsu. Skanery impulsowe mierzą odległość obiektu od sensora na podstawie czasu, jaki jest potrzebny wiązce lasera, aby dotrzeć do przedmiotu i wrócić do sensora. Do przetworzenia danych wykorzystuje się zespół obwodów elektrycznych, dzięki którym możliwe jest określenie, w jakim czasie światło lasera wróci do sensora z dokładnością do pikosekundy. W tych laserach jeden pomiar jest w stanie określić pozycję tylko jednego punktu, dlatego, aby zeskanować trójwymiarową powierzchnię, laser musi się obracać o 360 stopni. Dokonuje się tego przeważnie za pomocą lustra (Rys. 1), które zmienia kierunek lasera. Zaletą tych laserów jest możliwość skanowania dużych obiektów, zaś ograniczeniem jest niewielka szybkość skanowania [5,7].

Skanery z przesunięciem fazowym

Skanery z przesunięciem fazowym, poza pulsującym laserem, posiadają możliwość zmiany mocy wiązki lasera. Emitują wiązkę o zmiennej amplitudzie. Różnica w fazie wiązki wysłanej i odbitej stanowi podstawę oszacowania czasu opóźnienia i odległości. Dzięki określaniu odległości na podstawie czasu przelotu impulsu oraz przesunięcia fazowego, skanery z przesunięciem fazowym są dokładniejsze niż skanery impulsowe, jednak mają większe ograniczenia zasięgu [4,7]. Przykładem takiego skanera, gdzie odległość mierzona jest na podstawie różnicy w fazie wiązki lasera, jest przemysłowy skaner Omnitrac 2 (Rys. 2) umożliwiający skanowanie dużych obiektów w zadanych punktach. Informacje o współrzędnych punktu uzyskuje się na podstawie porównania faz wiązki wysłanej przez głowicę i odbitej

od przedmiotu, a także dwóch enkoderów dostarczających informacji o obrotach głowicy w dwóch płaszczyznach [8].



Rys. 1. Lotniczy skaner laserowy Dornier EBK 3D-Laser-Kamera wyposażony w ruchome lustro.

Fig. 1. The laser-based range imaging camera Dornier EBK 3D-Laser-Kamera with rotating mirror, which transmits a laser pulse.



Rys. 2. Tracker laserowy Omnitrac 2 firmy Automated Precision wyposażony w moduł komunikacji bezprzewodowej. Dodatkowo zaprezentowano dwa retroreflektory o średnicach 1,5 cala oraz 0,5 cala, które z wykorzystaniem odpowiednich adapterów, mogą służyć do pomiarów płaszczyzn (adapter „flat nest”) i otworów (adapter „pin nest”).

Fig. 2. Omnitrac 2 is wireless laser tracker from Automated Precision. Picture presents two spherically mounted retroreflectors and laser tracker. Retroreflectors are used in pair with additional tooling such as a flat nest or pin nest.

3.4 Skanery emitujące światło strukturalne

Skanery emitujące światło strukturalne oparte są na niebieskim lub białym świetle LED. Światło może być wyświetlane przez projektor LCD lub DLP. Skanery oparte na świetle strukturalnym wyświetlają serię liniowych wzorów świetlnych na obiekt. Kształt przedmiotu jest wykrywany przez jedną lub dwie kamery poprzez odkształcenie się wzoru. Oprogramowanie jest w stanie wyodrębnić krawędzie każdej linii we wzorze, aby następnie bazując na triangulacji, poznać odległość badanej powierzchni od skanera i określić kształt badanego obiektu [9]. W przypadku układów z dwoma kamerami uzyskuje się dwa zdjęcia na skan, dzięki czemu możliwe jest tworzenie obrazu 3D w jednym ujęciu. Skanery te cechują się dużą prędkością skanowania, która pozwala na wykonanie pojedynczego skanu obiektu w ciągu 2 sekund, oraz wysoką rozdzielczością. W przeciwieństwie

do skanerów laserowych skanery oparte na świetle strukturalnym są bezpieczne dla oczu. Wadą tych skanerów w przypadku skomplikowanych kształtów przedmiotu jest konieczność wykonania skanów pod różnymi kątami, aby w całości zeskanować obiekt. Dodatkowo skanery te są wrażliwe na oświetlenie otoczenia i nie powinny pracować w warunkach terenowych. Wrażliwość na otoczenie można częściowo zmniejszyć przez zastosowanie skanerów z projektorem emitującym niebieskie światło.



Rys. 3. GOM ATOS ScanPort - skaner wykorzystujący światło strukturalne wyposażony jest w zautomatyzowany stolik obrotowy; widoczna płyta kalibracyjna zamontowana w miejscu stolika.

Fig. 3. GOM ATOS ScanPort - an optical desktop scanner equipped with automated rotating table. Picture presents ATOS ScanPort with calibration pad in place of rotating table.

Przykładem przemysłowego skanera optycznego ze światłem strukturalnym jest skaner GOM ATOS Triple Scan (Rys. 8) oraz ATOS Core (Rys. 3). Pomiary można dokonywać ręcznie umieszczając skaner na statywie lub pulpicie. Skaner ten może być również komponentem optycznym we w pełni zautomatyzowanym urządzeniu pomiarowym firmy GOM, gdzie dodatkowo można na skaner Triple Scan nałożyć skaner fotogrametryczny pozwalający na lepszą odwzorowalność oraz jednakową dokładność w całym zakresie obszaru skanowania. Wynika to z poprawy pozycjonowania na podstawie punktów referencyjnych. Skaner Atos Triple Scan wykorzystuje jako źródło światła niebieskie światło LED, a do rejestracji obrazu wykorzystywane są kamery w technice stereoskopii [4,10]. Konkurencyjnym rozwiązaniem są systemy COMET firmy Zeiss.

4. Próby skanowania 3D odkształceń spawalniczych

W celu kontroli odkształceń spawalniczych zeskanowano kwadratowe próbki o wymiarach 176 x 176 x 8 mm, wykonane ze stali S960QL, przed i po napawaniu łukiem krytym. Następnie przeprowadzono porównanie siatki po napawaniu z wykorzystaniem modelu CAD (wygenerowanego na podstawie siatki przed napawaniem), uzyskując kolorowe mapy odchyłek.

Tab. 3. Skanery 3D wraz z wynikiem pomiaru.
Tab. 3. 3D scanners and results of scanning.

Metoda skanowania	Urządzenie		Wynik skanowania
Światło strukturalne	DAVID SLS-3		
Światło strukturalne	Kinect dla systemu Windows v1		
Analizator czasu przelotu	Kinect dla systemu Windows v2		

Dobierając technikę skanowania odpowiednią do założonego zadania pomiarowego, przeanalizowano barwę i kształt detalu oraz jego wielkość. Wytypowane metody skanowania obejmowały triangulację laserową oraz skanowanie metodą światła strukturalnego. Na podstawie wstępnych badań wybrano metodę światła strukturalnego (Tab. 3). Próbkę zeskanowaną urządzeniem Kinect dla systemu Windows v2 charakteryzowała się najmniejszą ilością detali, zaś najlepszy rezultat uzyskano za pomocą skanera DAVID SLS-3. W celu uzyskania wymaganej dokładności i zarejestrowania najmniejszych odkształceń spawalniczych, skanowanie próbek zostało wykonane na urządzeniu GOM ATOS ScanBox serii 6, które jest metrologicznym skanerem bazującym na świetle strukturalnym.

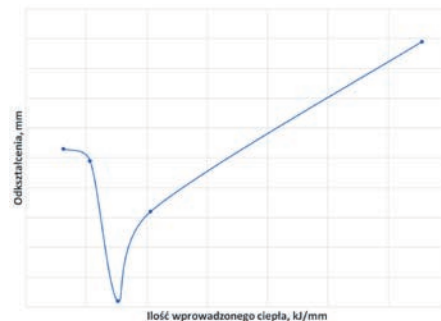


Rys. 4. GOM ATOS ScanBox serii 6 przygotowany do skanowania próbki zamocowanej w imadle.

Fig. 4. GOM ATOS ScanBox series 6 prepared to 3D scanning of clamp mounted object.

W celu określenia wpływu ilości wprowadzonego ciepła w procesie napawania na odkształcenia w próbkach wykonanych ze stali S960QL, dokonano analizy modeli w aspekcie odkształceń kątowych. Zależności odkształceń próbek od ilości wprowadzonego ciepła we wszystkich rozpatrywanych

przekrojach były bardzo zbliżone, co pozwoliło na określenie zmian w badanych próbkach (Rys. 5). Przebieg zależności odkształceń od ilości wprowadzonego ciepła nie jest monotonicznie rosnący. W pewnym przedziale ilości wprowadzonego ciepła wartość odkształceń gwałtownie spada.



Rys. 5. Wykres zestawienia odkształceń próbek w poszczególnych przekrojach w zależności od wprowadzonego ciepła.

Fig. 5. Effect of heat input on welding deformations.

5. Wnioski

Wykazano, że skanowanie metodą światła strukturalnego może zostać wykorzystane do pomiaru odkształceń spawalniczych oraz ich późniejszej analizy.

Z przeprowadzonych badań wynika, że istnieje wąski zakres ilości wprowadzonego ciepła, dla którego odkształcenia spawalnicze są znacznie mniejsze niż dla pozostałych ilości wprowadzonego ciepła.

Zależność wprowadzonego ciepła do materiału podczas napawania nie jest liniowa. Zakres optymalnych parametrów spawania można wyznaczyć stosując metodę przygotowywania elementów z wykorzystaniem zmiennych parametrów spawania, następnie skanowania gotowych próbek za pomocą skanera 3D oraz analizie wielkości odkształceń.

6. Literatura/References

- [1] Logismarket.pl. [Online]. Available: <https://www.logismarket.pl/ic/prima-polska-sp-z-oo-informacje-nt-skanerow-3d-834595.pdf>. [Accessed: 01- Aug- 2018].
- [2] A. Wszółek, "Dokładność skanera 3D", Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie, vol. 6, no. 81, p. 12, 2014.
- [3] "3D Imaging Standards", Astm.org, 2018. [Online]. Available: <https://www.astm.org/Standards/3d-imaging-standards.html>. [Accessed: 01- Aug- 2018].
- [4] Ems-usa.com. [Online]. Available: <https://www.ems-usa.com/tech-papers/3D%20Scanning%20Technologies%20.pdf>. [Accessed: 01- Aug- 2018].
- [5] "3D scanning technologies - Aniwa.com", Aniwa.com. [Online]. Available: <https://www.aniwaa.com/3d-scanning-technologies-and-the-3d-scanning-process/>. [Accessed: 01- Aug- 2018].
- [6] F. Huang, R. Klette and K. Scheibe, Panoramic Imaging: Sensor-Line Cameras and Laser Range-Finders. Wiley, 2008.
- [7] G. Vosselman and H. Maas, Airborne and Terrestrial Laser Scanning. Whittles Publishing, 2010.
- [8] "FARO | 3D Measurement, Imaging & Realization Technology", www.faro.com. [Online]. Available: <https://www.faro.com>. [Accessed: 08- Aug- 2018].
- [9] P. ALLARD and J. LAVOIE, "Differentiation of 3D scanners and their positioning method when applied to pipeline integrity", EITEP Institute, 2014.
- [10] "Precise Industrial 3D Metrology", Gom.com, 2018. [Online]. Available: <http://www.gom.com/>. [Accessed: 01- Aug- 2018].

Kilian Tschöke¹, Tobias Gaul¹, Thomas Klesse¹, Uwe Lieske¹, Friedrich von Dungen², Julia Guerrero-Santafe², Hannelore Wessel-Segebade^{3*}

¹Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems IKTS

²INVENT GmbH

³Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.

Development of an integrated measurement system for CFRP components within automotive manufacture

CarbonSafe – Zbudowanie zintegrowanego systemu pomiarowego dla komponentów CFRP w przemyśle motoryzacyjnym

ABSTRACT

Overview of a German project funded by the Federal Department of Education and Research within the scope of the priority program "KMU Innovativ" (Funding No. 16ES0333).

The idea of the project was to develop a simple, but efficient SHM system for CFRP structures based on guided waves. The key milestones of the project were:

- specification of required sensors and development of sensors
- sensor characterization and application
- concept of external diagnostic equipment
- transducer self-test
- validation by generic geometries
- proof by POD and simulation of measurement results
- implementation of sensors into automotive structure
- field test.

Keywords: Carbon fibre reinforced plastic (CFRP), automotive manufacture, guided waves, structure health monitoring (SHM)

STRESZCZENIE

Przegląd niemieckiego projektu finansowanego przez Federalny Departament Edukacji i Badań w ramach programu priorytetowego "KMU Innovativ" (Fundusze nr 16ES0333). Ideą projektu było opracowanie prostego, ale skutecznego systemu SHM dla struktur CFRP bazującego na zastosowaniu fal prowadzonych. Kluczowymi kamieniami milowymi tego projektu były:

- specyfikacja wymagań i opracowanie czujników
- określenie charakterystyki i zastosowanie czujnika
- koncepcja zewnętrznego sprzętu diagnostycznego
- autotest przetwornika
- walidacja za pomocą ogólnych geometrii
- dowód przez POD i symulacje wyników pomiarów
- wdrożenie czujników do rozwiązań samochodowych
- test w terenie

Słowa kluczowe: kompozyt zbrojony włóknem węglowym (CFRP), produkcja samochodowa, fale kierowane, monitorowanie stanu konstrukcji (SHM)

1. Motivation

Today low-weight and high-strength components are used for automobile production or in aerospace sector which exhibit a high energy absorption. With respect to electromobility such materials are an excellent compensation of the heavy batteries.

However, there is one drawback: the damage behaviour of carbon fibre reinforced plastics components (CFRP) is completely different from that of materials previously used such as light metals or steel.

The structure of CFRP might be damaged upon a heavy impact. Fig. 1 shows an impact damage effect in a longitudinal CFRP structure.

Main reasons for damage are

- delaminations;
- damage of the matrix;
- fibre cracks.

Furthermore, cavities or dry spots may occur. Main cause for damage are the different component properties – fibres

and resin. Damage minimise the durability of the automobile structure dramatically. Normally, that is due to crashes, hail or rock fall.

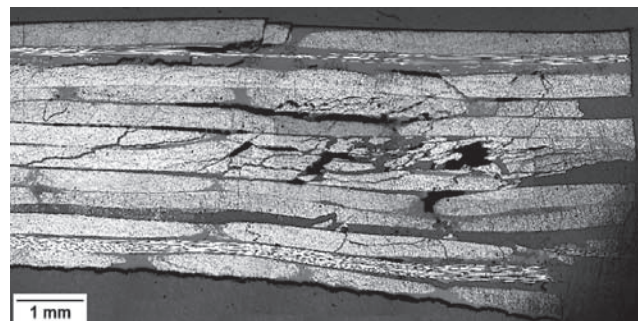


Fig. 1. Longitudinal cross section of a CFRP structure with impact damage [1].

Rys. 1. Przekrój podłużny struktury CFRP z uszkodzeniami uderzeniowymi [1].

Unfortunately, this type of damage quite often is not visible, viz. cannot be detected by visual testing. Only time-consuming pulse-echo ultrasonic testing is able to detect

*Corresponding author. E-mail: hawessel@t-online.de

this damage non-destructively. However, one advantage is: Determination of depth as well as the extent of damage can be recorded.



Fig. 2. Pulse-echo ultrasound test device VAS 852 003, designed for Audi R8 2016 [2].

Rys. 2. Ultradźwiękowy aparat impulsowej metody echa VAS 852 003 zaprojektowany dla Audi R8 2016 [2].

Besides the long duration of the tests further drawbacks are: the structure must be well accessible to carry out the test, and the test personnel must be qualified.

2. The CarbonSafe Project

The CarbonSafe Project was designed to develop a suitable Structure Health Monitoring (SHM) system based upon the application of ultrasonic guided waves for monitoring CFRP incorporate structures in automobiles. The aim was to implement the piezoelectric transducers permanently on or in the CFRP component. All sensors should be able to perform a self-test. Test instructions should be developed, so that the monitoring could be integrated into the routine revision of the workshop.

The project was funded by the German Federal Ministry of Education and Research. The project period was 3 years. The project was completed in May 2018.

2.1 The Consortium

The consortium partners are:

- INVENT GmbH was the leader of the consortium and responsible for:
 - development of suitable sensors;
 - production of test specimens;
- Fraunhofer Institute (IKTS) in Dresden was mainly responsible for:
 - classification of damages in CFRP;
 - probability of detection investigations (POD);
 - simulations;
- University Siegen was involved:
 - in investigations concerning the capability of self-testing of the sensors;
- Autohaus ELITZSCH, a car dealer in Dresden:
 - supported the project by provision of a suitable car for the field tests;

- German Society for NDT (DGZfP e.V.) had the tasks to:
 - investigate the possibility of integration of the new technique into vocational training;
 - develop training material with regard to the functioning of the final Structural Health Monitoring System (SHM System).

Additionally, the project was accompanied by an advisory board with members from different automobile and electronic device manufacturers. Several meetings took place and the interest was quite high.

2.2 Ultrasonic guided waves

Guided waves result from reflections of longitudinal and shear waves at borders in plate-like structures. These guided waves propagate planarly along the surface or between two surfaces of a test specimen. The localisation of a defect is possible through the interaction of the guided wave with the material defect.

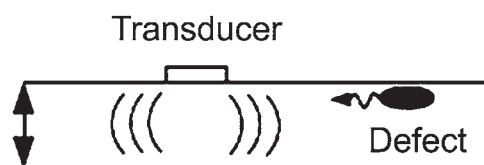


Fig. 3. Ultrasonic testing with guided waves [3].

Rys. 3. Badanie ultradźwiękowe z zastosowaniem fal kierowanych [3].

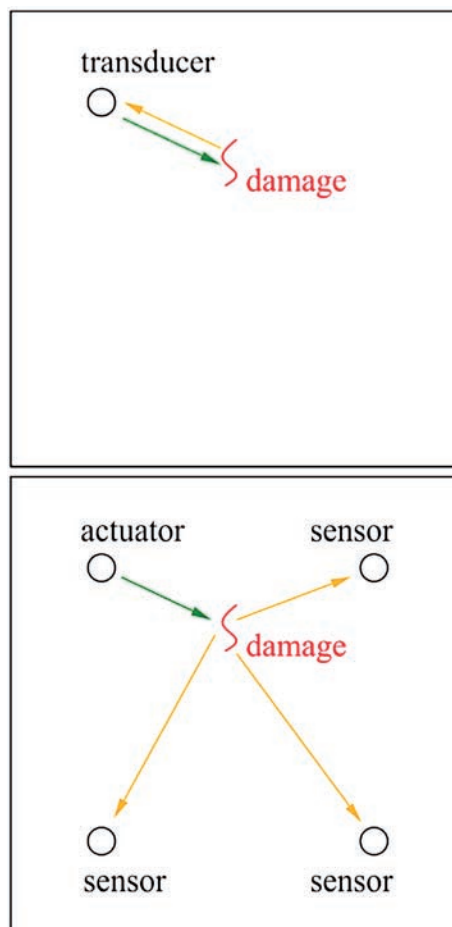


Fig. 4. Pulse-echo method (up), pitch-catch method (down).

Rys. 4. Impulsowa metoda echa (góra), metoda pitch-catch (dół).

Guided waves excel with high range. Large components and structures which are difficult to access can be tested in short time. Two different modes of application are possible: pulse-echo or pitch-catch.

Good results were already obtained by NDT in the aerospace industry. Suitable SHM systems for automobile structure were still missing.

2.3 Components of SHM system

Piezo-electric transducers

The requirements were:

- Ready-to-integrate into typical automobile's manufacturing processes e.g. by RTM (resin transfer moulding) injection method based on preforms:
- 1) Placing the preform (non-impregnated semi-finished product) into the two-piece injection tool
 - 2) Injecting resin with constant volume stream and pressure into the closed tool
 - 3) Hardening by, e.g., air jet
 - 4) Removing the component from the tool

During this process transducers and cables can already be placed at the predetermined locations. So they can join with the structure during the hardening process (Co-Bonding).

- over an area of 1 m² not more than 10 transducers should be distributed with efficient coupling;
- because the transducers have to be integrated into the surface during the production period of the component, they must be of very flat design;
- furthermore, they must be of similar fatigue strength and resistance as the component.



Fig. 5. DuraAct™ transducer (series design).
Rys. 5. Przetwornik DuraAct™ (wykonanie seryjne).

Characterisation of transducers

For characterisation of the transducer beam characteristic in generic components the wave field was measured with a 3D laser vibrometer [4] (see Fig. 6). Suitable measurement frequencies were determined by impedance analysis.

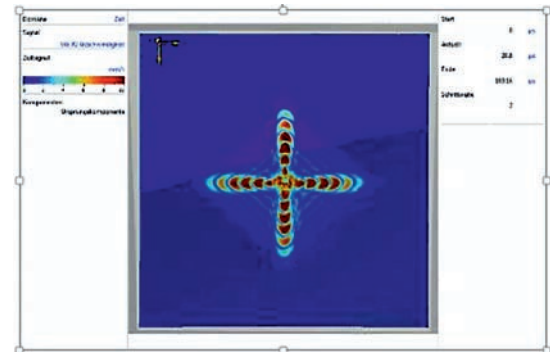


Fig. 6. Measurement of wave fields with 3D laser vibrometer (RC5-impulse, 200 kHz).

Rys. 6. Pomiar pola fali za pomocą wibrometru laserowego 3D (RC5-impulse, 200 kHz).

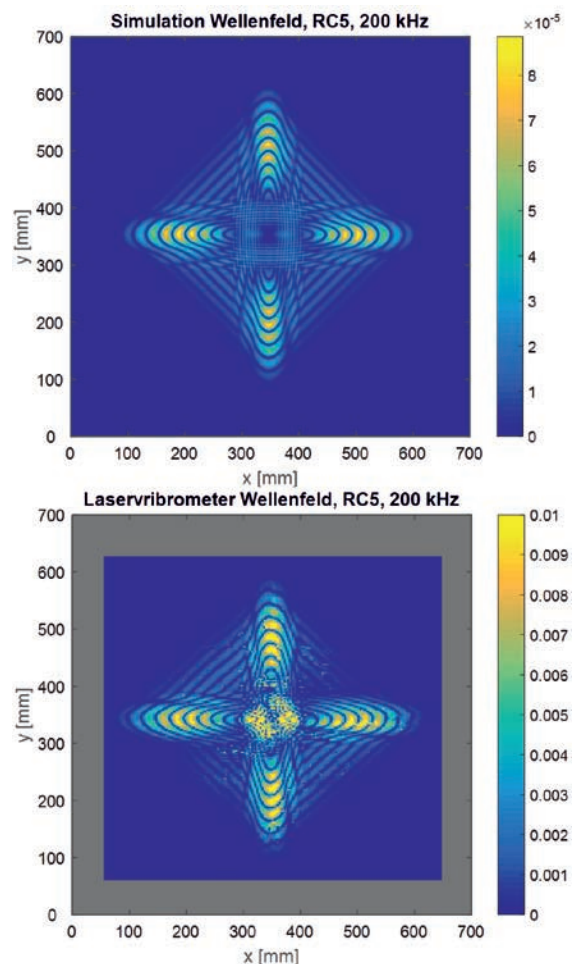


Fig. 7. Comparison of results: Simulation of the wave field (up), laser vibrometric measurement of the wave field (down).

Rys. 7. Porównanie wyników: Symulacja fali (góra), laserowy pomiar wibrometryczny pola falowego (dół).

The resonance behaviour of the transducer and the adjacent structure can be recognised by measurement of the

impedance. The transducer should not operate at a frequency range, in which resonance appears. This would hamper the later signal evaluation significantly. Furthermore, it is necessary for the later measurement method to identify a frequency range, in which the transducer shows a uniform vibration behaviour.

In addition, the interaction of the wave field with defect locations was simulated and compared with laser vibrometric measurement. The results show a very good coincidence between simulation and laser vibrometric measurement (see Fig. 7). Finally, measures to protect the system against electromagnetic disturbances (EMC) were undertaken.

The number of transducers required for a given structure under consideration of fail of one transducer can be determined with this procedure, as well as the locations where the transducers should be placed on the structure.

Transducer self-test

The SHM system must be able to identify damaged transducers through a self-test and exclude them from the system. Exchange of damaged transducers is not possible. The self-test is based on measurement of the electromechanic impedance spectrum which depends on the temperature. It compares the actual condition with the measured baseline under same temperature of the environment or by compensation of the temperature difference. [5].

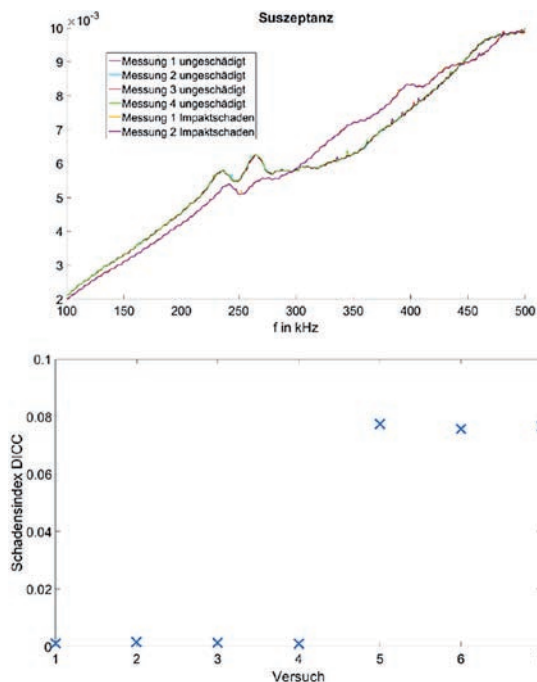


Fig. 8. Susceptance (up) and damage index (down).
Rys. 8. Zużycie (góra) i wskaźnik uszkodzeń (dół).

By this procedure damaged transducers can be clearly identified. Their malfunction can be considered in the evaluation.

SHM system and field test

During the progress of the project a CFRP component with an integrated transducer network was developed using

the RTM method and co-bonding. The diagnostics equipment consists of the measurement electronics, a preamplifier and a small PC built in a housing (see Fig. 9).



Fig. 9. Open diagnostics equipment.
Rys. 9. System diagnostyczny otwartego dostępu.

For function proof of the SHM system a generic crash reinforcement structure was produced as reference structure using the RTM method. In the final version transducers were integrated in the component.

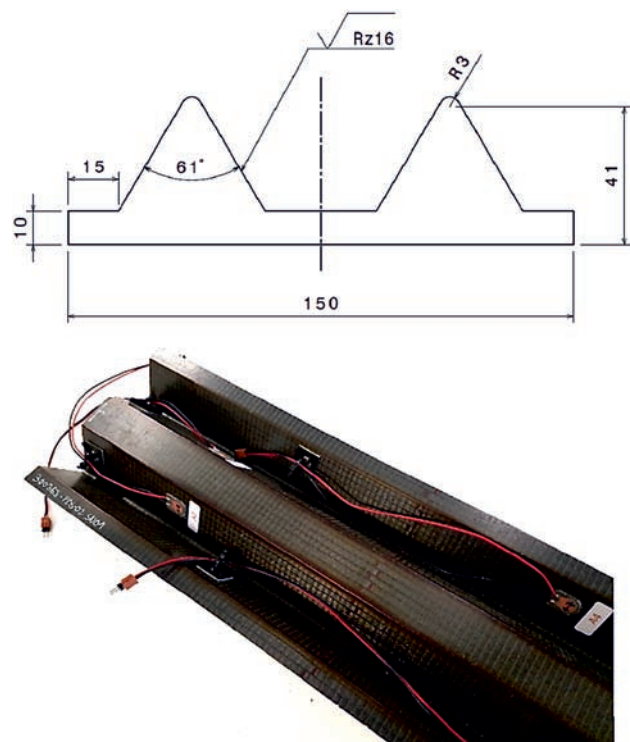


Fig. 10. Reference structure.
Rys. 10. Struktura odniesienia.

For the field test a hood was selected because of good accessibility and relatively high stress e.g. (temperature, rock fall). Three areas were selected for application with transducer networks.

As demonstrator component a hut profile was constructed which illustrates a typical reinforcement structure with representative dimensions. It serves for the baseline measurement.

As defect simply two magnets were fixed at the component, although they do not represent a typical defect but the active principle is comparable.

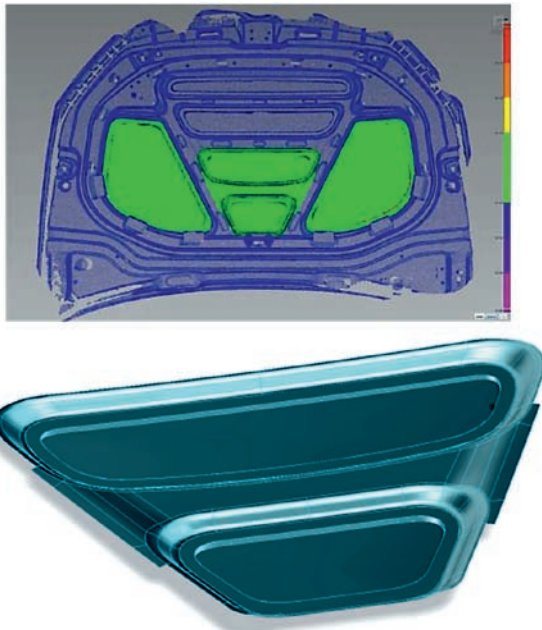


Fig. 11. Hood (field test).
Rys. 11. Pokrywa (testy terenowe).

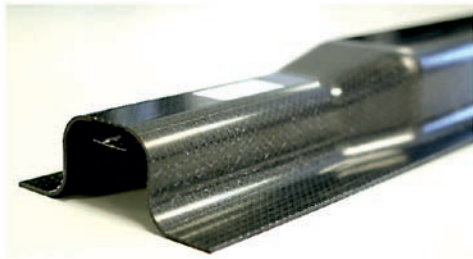


Fig. 12. Hut profile, upper with integrated SHM network.
Rys. 12. Profil, górny ze zintegrowaną siecią SHM.

The field test is still ongoing. The measurement results are shown on a tablet. First results demonstrate that the SHM system is operating reliable. Recording of data is performed easily in the workshop.

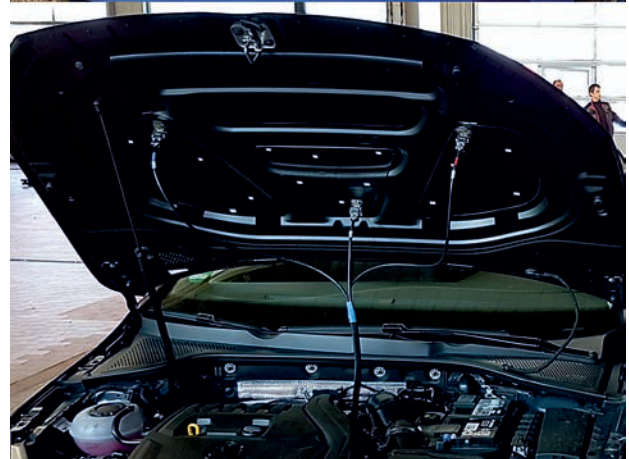


Fig. 13. Field test car.
Rys. 13. Samochód do testów terenowych.

3. References/Literatura

- [1] L. Schubert, U. Lieske, B. Frankenstein, B. Köhler, "Interaction of Lamb waves with impact damaged CFRP's – effects and conclusions for Acousto-Ultrasonic applications", Proceedings of the 7th International Workshop on Structural Health Monitoring, 2009, Stanford University Lancaster
- [2] <https://erwin.volkswagen.de/workshop/deutsch/index.htm>, <https://erwin.volkswagen.de/workshop/deutsch/pinfo/85200370000.htm>, retrieval 03.01.2018
- [3] R. Schwerz, thesis „Verfahren zum wellenmodeselektiven Empfang/Senden von Plattenwellen in der Werkstoffprüfung“, p. 2, 2009
- [4] For the function of the 3D laser vibrometer refer to <https://www.youtube.com/watch?v=YWwZU2hgjs8>
- [5] B. Weihnacht, T. Klesse, R. Neubeck, L. Schubert, "Monitoring of hot pipes at the power plant Neurath using guided waves"; Proceedings of the Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, 2013, San Diego

NOWE ROZWIĄZANIA W DZIEDZINIE PAUT = NOWA JAKOŚĆ



**MASZ
WIĘCEJ PYTAŃ?
ZADZWOŃ!
+48 32 720 24 04**

MANTIS



GEKKO



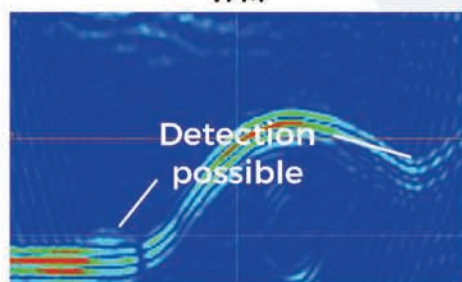
PANTER



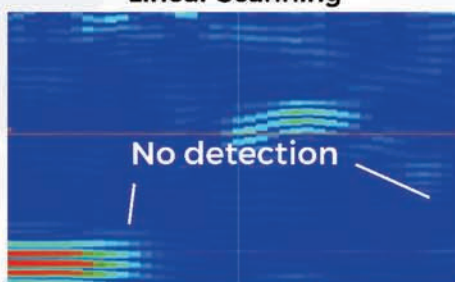
IŁOŚĆ KANAŁÓW :	16:64 + 2 TOFD	64:64 + 4 TOFD	32:128 do 2048:2048
ROZDZIELCZOŚĆ :	16 bit (zakres dynamiczny 800%)		
PRF :	do 20kHz	do 20kHz	do 40 kHz
OBSŁUGA SOND :	LINEAR, MATRIX, DLA, DMA	LINEAR, MATRIX, DLA, DMA	LINEAR, MATRIX, DLA, DMA, DAISY, ANNULAR, SECTORIAL
TECHNIKI OBRAZOWANIA :	PE, PAUT, TFM, FMC, TOFD	PE, PAUT, TFM, FMC, TOFD	PE, PAUT, TFM, FMC, PWI, TOFD
TOTAL FOCUSING METHOD (TFM) :	Real-Time TFM	Real -Time TFM, Adaptive TFM	Real-Time TFM
WEJŚCIA ENKODEROWE :	2 lub 3	3	3
DYSK TWARDY :	SSD 128GB do 1TB		
DODATKOWE FUNKCJE :	wbudowany konfigurator do parametryzacji sprzętu, narzędzia do obliczenia parametrów badania i kalibracji		

Mapowanie korozji

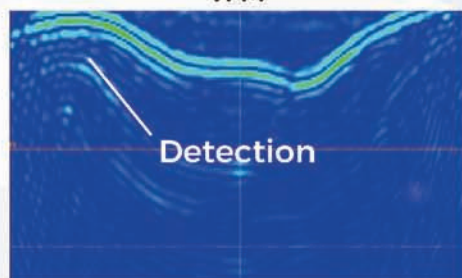
TFM



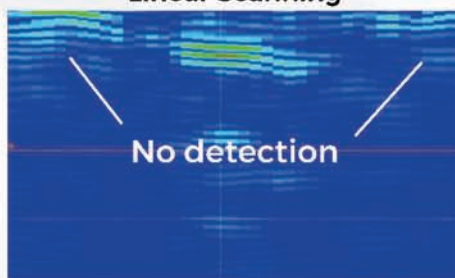
Linear Scanning



TFM

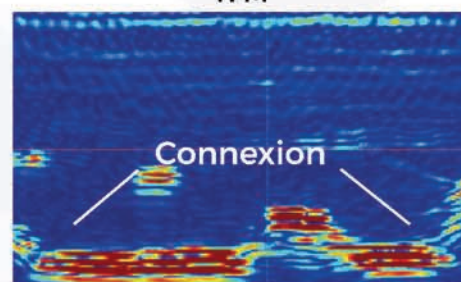


Linear Scanning

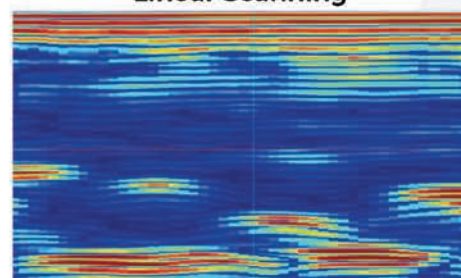


Pęknięcie wodorowe (HIC)

TFM



Linear Scanning



Casp System Sp. z o.o.

ul. Puzsquina 2, 43-603 Jaworzno

tel.: +48 32 720 24 04 / +48 32 614 12 29 / fax: +48 32 750 56 06 / e-mail: ndt@casp.pl

www.ndt24.pl

casp system
ADVANCED TECHNOLOGIES



Piotr Bielawski*

Akademia Morska w Szczecinie

Potencjał eksploatacyjny połączeń wciskowych maszyn okrętowych

Wear margin of ship machine units with press fits

ABSTRACT

To inseparable connection of two machine elements is used, among others, press fit connections. The elements of the press fit connection undergo a specific wear during use which may lead to the loss of the wear margin of the connection. Particularly important press fit connections of ship machinery are the connection of the propeller - shaft and connection of the shell - connecting rod big end. The model of the press fit connection and the results of the experiment consisting in the comparison of the calculated and measured torque required to break the connection are presented. It was indicated that fretting corrosion is a characteristic type of wear at the nonstationary load of the press fit connection. The values influencing the course of the fretting corrosion of the press fit connection were listed. The effects of fretting corrosion of the propeller-shaft connection are described. The structure of the connection of the shell-connecting rod big end was characterized and the causes of fretting corrosion were indicated. It was found that acoustic emission may be a symptom of the wear margin of an press fit connection. In the case of a shell - connecting rod big end connection, an additional symptom may be the rotation slip of the shell in big end of connecting rod or the axial displacement of the shell in the big end of connecting rod.

Keywords: ship machine, wear margin, press fit connection, fretting corrosion, symptoms of the wear margin

STRESZCZENIE

Celem nierozłącznego połączenia dwóch elementów maszyn stosuje się między innymi połączenia wciskowe. Elementy maszyn połączone wciskowo ulegają podczas użytkowania specyficznemu zużyciu co może doprowadzić do utraty potencjału eksploatacyjnego połączenia. Szczególnie ważnymi połączeniami wciskowymi maszyn okrętowych są połączenia wał śrubowy - śruba i panewka - korbówód. Przedstawiono model połączenia wciskowego i wyniki eksperymentu polegającego na porównaniu obliczonego i zmierzonego momentu skręcającego potrzebnego do rozrwania połączenia. Wskazano, że charakterystycznym rodzajem zużycia przy niestacjonarnym obciążeniu połączenia wciskowego jest korozja cierna. Wymieniono wielkości wpływające na przebieg korozji czarnej połączenia wciskowego. Opisano skutki korozji czarnej połączenia śruba-wał śrubowy. Scharakteryzowano konstrukcję połączenia panewka-stopa korbowodu i wskazano na przyczyny korozji czarnej. Stwierdzono, że symptomem potencjału eksploatacyjnego połączenia wciskowego może być emisja akustyczna. W przypadku połączenia panewka-stopa korbowodu dodatkowym symptomem może być obrót panewki w stopie lub osiowe przesunięcie panewki w stopie korbowodu.

Słowa kluczowe: maszyny okrętowe, potencjał eksploatacyjny, połączenie wciskowe, korozja cierna, symptomy potencjału

1. Wstęp

Maszyny, w tym maszyny okrętowe mają wiele elementów połączonych z sobą w sposób „nierozłączny” za pomocą tzw. połączeń wciskowych. W wielu przypadkach „nierozłączny” oznacza połączenie na całe życie maszyny, w innych przypadkach „nierozłączny” należy rozumieć wyłączone jako takie połączenie, w którym dwa połączone elementy zachowują się podczas pracy maszyny jak jeden element. W wielu przypadkach podczas pracy maszyny może dojść do zerwania połączenia wciskowego i uszkodzenia maszyny. Konieczne jest znalezienie miar i symptomów potencjału eksploatacyjnego ważnych połączeń wciskowych istotnych maszyn. Istotnymi maszynami okrętowymi są linie wałów i silniki okrętowe, a ważnymi połączeniami wciskowymi są połączenia śruba-wał śrubowy i panewka - stopa korbowodu.

2. Potencjał eksploatacyjny połączeń wciskowych

Wyróżnia się czyste połączenia wciskowe i połączenia kształtowo-wciskowe. Najbardziej znanym modelem połączenia wciskowego jest model typu „pierścień w pierścieniu”. Do połączeń wciskowo-kształtowych mogą być przypisane połączenia wciskowo-wpustowe i wciskowe poligonowe.

Czyste połączenie wciskowe może dotyczyć elementów o kształcie walcowym i stożkowym.

Potencjał eksploatacyjny czystego połączenia wciskowego zostanie wyczerpany w momencie, kiedy momenty i siły tarcia między połączonymi „nierozłącznie” elementami będą mniejsze od momentów i sił rozdzielających te elementy. Siła tarcia jest iloczynem nacisków promieniowych i współczynnika tarcia. Naciski promieniowe w modelu „pierścień w pierścieniu” są powiązane z naprężeniami w obydwu pierścieniach, te z kolei zależą od „wcisku”, czyli różnicy średnic pierścieni przed montażem i właściwości materiałów [1]. Współczynnik tarcia zależy głównie od rodzaju materiałów i rodzaju powierzchni tarcia. Naciski promieniowe i współczynnik tarcia zależą również od sposobu realizacji połączenia:

- w włączanych połączeniach walcowych, w szczególności przy dużych wciskach, może dochodzić do niszczenia powierzchni lub niewspółosiowego ustawienia obydwu pierścieni. Skutkiem jest inny wcisk i inny współczynnik tarcia. Metodą kontroli procesu włączania jest pomiar siły włączania w funkcji drogi włączania, a metody kontroli jakości złącza to pomiar naprężeń w pierścieniach oraz pomiary geometrii połączenia;

*Autor korespondencyjny. E-mail: p.bielawski@am.szczecin.pl

- w skurczowych połączeniach walcowych i stożkowych należy uwzględniać wpływ temperatury na materiały: możliwe są przemiany fazowe i niszczenie powłok ochronnych. Metody kontroli procesu to pomiary temperatur łączonych elementów, a metody kontroli jakości połączenia to pomiary naprężeń w materiałach oraz pomiary geometrii połączenia;
- w wtłaczanych połączeniach stożkowych możliwe jest zastosowanie „hydraulicznego rozszerzania” pierścienia zewnętrznego, co znacząco ogranicza niszczenie powierzchni materiałów i ułatwia montaż i demontaż. Metody kontroli procesu to pomiar drogi wtłaczania (kontrola wcisku), a metody kontroli jakości złącza to pomiar naprężeń w pierścieniach oraz pomiary geometrii połączenia.

Połączenia wciskowe mogą być modelowo rozrywane momentami skręcającymi lub siłami poosiowymi. W [2] obliczono moment skręcający potrzebny do zerwania połączenia wciskowego, a następnie na zbudowanym stanowisku dokonano pomiaru momentu potrzebnego do zerwania połączenia. Generalnie, zmierzony moment skręcający, przy którym dochodziło do zerwania połączenia był niższy od momentu wyliczonego z modelu. Dla wtłaczanych połączeń wciskowych różnica między momentem wyliczonym i zmierzonym mieściła się w zakresie od 5,91 do 16,1% wartości momentu wyliczonego. Potwierdzono, że jednorazowe zerwanie połączenia, demontaż i ponowny montaż skutkuje znaczącym, średnio 25% spadkiem momentu potrzebnego do zerwania połączenia.

Połączenia wciskowe w maszynach nie są obciążane wyłącznie stałą siłą poosiową lub stałym momentem obrotowym. Moment skręcający jest z reguły momentem zmiennym, ponadto może występować również zmienne obciążenie gnące. Niestacjonarne obciążenie połączenia wciskowego jest najczęstszą przyczyną cyklicznych ruchów poślizgowych w obszarze nacisków promieniowych połączenia. Następstwem takiego obciążenia tribologicznego jest plastyczna deformacja i ścinanie wierzchołków nierówności (chropowatości) lub mikropęknięcia [3]:

- ścinanie wierzchołków nierówności powoduje powstawanie cząstek zużycia, które w większości przypadków reagują z tlenem z otaczającego medium. Powstaje typowy obraz tzw. korozji cierniej, a z połączenia wydostawać się może „rdza połączenia wciskowego”, co często nazywane jest „krwawieniem połączenia”;
- jeżeli mikropęknięcie jest ukierunkowane niekorzystnie, to może się rozwijać i w końcu doprowadzić do ciernego pęknięcia zmęczeniowego. Powstawanie i rozkład mikropęknięć zależne jest między innymi od chropowatości powierzchni, co znacząco utrudnia deterministyczne prognozowanie pęknięcia. Do rozwoju pęknięcia potrzebny jest odpowiedni stan naprężeń.

Wpływ na korozję cierną i tym samym potencjał eksploatacyjny ma również rodzaj ruchu względnego, temperatura i cząstki zużycia [3]. Niskie temperatury przyspieszają korozję w szczególności stali, podczas gdy wysokie temperatury mają działanie stabilizujące. Działanie temperatury wyjaśnia się zależnym od temperatury wpływem wilgotności

powietrza na korozję chemiczną. Wpływ chropowatości powierzchni na korozję cierną skutkującą pęknięciami nie jest jednoznacznie opisany. Ruch względny jest zależnym od obciążenia ruchem oscylacyjnym o pewnej częstotliwości i amplitudzie:

- wpływ częstotliwości: spadek częstotliwości ruchu oscylacyjnego skutkuje wzrostem korozji cierniej i spadkiem wytrzymałości na ruchy oscylacyjne. Efekt ten wyjaśnia się dwójako. Z jednej strony związane jest to ze wzrostem współczynnika tarcia wraz ze spadkiem prędkości ruchu względnego, co skutkuje ścinaniem większej ilości wierzchołków nierówności. Z drugiej strony niższa częstotliwość powoduje wydłużenie czasu tworzenia się tlenków na powierzchni tarcia;
- wpływ amplitudy: w zakresie małych amplitud nie przekraczających odkształceń sprężystych, utrzymuje się kontakt między wierzchołkami i nie można ocenić zużycia, a liczba cykli do zmęczenia pozostaje wysoka;
- wpływ amplitudy: od pewnej wartości amplitudy ruchu zużycie rośnie powoli, a liczba cykli spada bardzo szybko aż do pewnego minimum, gdzie istnieje niebezpieczeństwo przelomu;
- wpływ amplitudy: przy jeszcze większych amplitudach szybkość zużywania rośnie bardzo szybko i od pewnej wartości amplitudy stabilizuje się. Przy dużej szybkości zużywania następuje likwidacja mikropęknięć: wzrost szybkości zużycia działa pozytywnie na liczbę obciążeń do przelomu;
- wpływ utlenionych cząstek zużycia na przebieg zużycia: cząstki zużycia poprzez ruch względny mogą być same wprowadzone w ruch. Tak działający proces transportowy odbywa się bardzo wolno, tak, że mówi się o dryfowaniu. Jeżeli cząstki nie mogą opuścić powierzchni styku, w niektórych miejscach może dochodzić do ich gromadzenia się. Powstaje w ten sposób tzw. układ trybologiczny z cieczą rozdzielającą w postaci proszku: trójtlenek żelaza Fe_2O_3 ma mniejszą gęstość i tym samym większą objętość, powoduje lokalne rozdzielanie współpracujących elementów. Skutkuje to lokalną koncentracją naprężeń i może, w zależności od grubości warstwy cząstek, zwiększać albo zmniejszać zużycie.

3. Korozja cierna połączenia śruba-wał śrubowy i panewka – stopa korbowodu

Połączenia śruba-wał śrubowy i panewka – stopa korbowodu to przykłady dwóch odmiennych konstrukcji połączenia.

Połączenie śruba – wał śrubowy jest wpustowym lub bezwpustowym, wciskowym połączeniem stożkowym realizowanym z hydraulicznym rozszerzaniem piasty. Istnieje niewiele opisów korozji cierniej tego połączenia. Ze względu na zmienne obciążenie skręcające i gnące działające na połączenie korozja cierna może doprowadzić do mikropęknięć, które mogą rozwinąć się w pęknięcie zmęczeniowe wału. Przepisy Towarzystw Klasyfikacyjnych nakazują podczas przeglądów, po demontażu śruby, badania nieniszczące

celem wykrycia mikropęknięć w szczególności na przedniej części stożka wału śrubowego [4].

Połączenie panewka-stopa korbowodu jest połączeniem wciskowym dzielonym w płaszczyźnie przechodzącej przez oś łożyska ślizgowego. Realizowane jest przez połączenie śrubami dzielonego pierścienia zewnętrznego i odpowiednie napięcie wstępne śrub. Model połączenia przedstawiono w [5] na podstawie [6]. Obciążenie działające na złącze jest następstwem sił masowych i gazowych działających na korbówód oraz momentów tarcia między czopem i panewką. W tego rodzaju połączeniach utrata potencjału eksploatacyjnego może być skutkiem albo korozji ciernej w samym połączeniu, albo uszkodzeń innych elementów silnika. Badania własne wskazują, że korozji ciernej może towarzyszyć obrót panewki w obudowie łącznie z niszczeniem wszelkich elementów ustalających położenie panewki w obudowie (stopie korbowodu) oraz że możliwe jest jednoczesne poosiowe przesuwanie panewki w obudowie. W oparciu o przeprowadzone analizy przypadków uszkodzeń można wykazać, że do przesunięcia poosiowego potrzebna zawsze była dodatkowa przyczyna, która spowodowała pojawienie się w łożysku korbowym dodatkowej siły gnącej.

4. Zakończenie

Utrata potencjału eksploatacyjnego połączenia wciskowego następuje najczęściej na skutek korozji ciernej. Korozja może powodować ubytki materiału z powierzchni wspólnej

połączenia i/lub powodować powstawanie mikropęknięć. Mikropęknięcia w obecności zmiennych obciążeń gnących mogą rozwinąć się w przełomy zmęczeniowe. Ubytki materiału mogą doprowadzić do zerwania połączenia, obrotu lub rozłączenia połączenia. Powstanie mikroruchów o amplitudzie umożliwiającej ścinanie wierzchołków nierówności generuje emisję akustyczną oraz wyzwala energię cieplną. Symptodem potencjału eksploatacyjnego połączeń wciskowych wszystkich rodzajów jest emisja akustyczna i wzrost temperatury, a w panewkach symptomem dodatkowym może być obrót lub wysunięcie panewki.

5. Literatura/References

- [1] L. Flöpper: Drang und Zwang. Bd. III, R. Oldenburg, München 1947
- [2] Szymkiewicz Ł.: Budowa stanowiska do pomiaru momentu tarcia w połączeniach wciskowych. Praca dyplomowa, Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin 2007
- [3] Jules B. Njinku: Verschleiß und Ermüdung reibkorrosionsgefährdeter Pressverbindungen bei Umlauf- und Wechselbiegung. Diss. Technische Universität Berlin, Berlin 2009
- [4] PRS Przepisy. Publikacja nr 111/P: Przeglądy okresowe wałów śrubowych. Gdańsk 2017
- [5] Bielawski P. Raunmiagi Z.: Wear margin of functional units with press fits. Advances in Technical Diagnostics-2018, Springer International Publishing, 57-67
- [6] Roemer W.: Die Berechnung des Preßsitzes von Gleitlagerschalen. MTZ 22(1961)2 i 4 Sonderdruck

- 1) dr hab. inż. Maciej Roskosz, prof. nadzw. AGH w Krakowie
- 2) prof. dr hab. inż. Piotr Bielawski, AM w Szczecinie
- 3) dr hab. inż. Jacek Szelażek, prof. nadzw. PAN
- 4) mgr inż. Jędrzej Hlebowicz, Pro Novum Sp. z o.o.
- 5) prof. dr inż. Ryszard Sikora, emerytowany prof. ZUT w Szczecinie
- 6) dr hab. inż. Jarosław Chmiel, prof. nadzw. AM w Szczecinie
- 7) dr hab. inż. Bernard Wichtowski, emerytowany pracownik ZUT w Szczecinie
- 8) dr hab. inż. Jacek Ślania, prof. nadzw. IS w Gliwicach
- 9) dr inż. Grzegorz Jezierski, Politechnika Opolska
- 10) dr inż. Michał Kawiak, ZUT w Szczecinie
- 11) dr inż. Adam Sajek, ZUT w Szczecinie
- 12) mgr inż. Marek Lipnicki, Koli Sp. z o.o.
- 13) prof. dr hab. inż. Tomasz Węgrzyn, PŚL w Gliwicach
- 14) dr hab. inż. Jaromir Mysłowski, ZUT w Szczecinie
- 15) dr inż. Grzegorz Jezierski, Politechnika Opolska

Piotr Bielawski*, Cezary Boćkowski
Akademia Morska w Szczecinie

Pneumatyczny sensor szczelności komory roboczej silnika spalinowego

Pneumatic leak sensor of the working chamber of an internal combustion engine

ABSTRACT

Tightness of the working chamber is caused by leakage of the working medium between the piston and bushing, on the valves and between the head and the sleeve. The reason for the increase in leakage is wear, and the cause of damage to the chamber components may be excessive leakage. A currently offered equipment for assessing the tightness of the combustion chamber has been described. The possibility of developing these equipment was indicated. The construction of a pre-prototypical, pneumatic leak sensor of the combustion chamber has been described. The results of leak testing of the working chamber of a small combustion engine are presented.

Keywords: combustion chamber, tightness, nozzle, leak sensor

STRESZCZENIE

Nieszczelność komory roboczej spowodowana jest przeciekami czynnika roboczego między tłokiem i tuleją, na zaworach i między głowicą i tuleją. Przyczyną wzrostu nieszczelności jest zużycie, a przyczyną uszkodzeń elementów może być nadmierny przeciek. Opisano obecnie oferowane urządzenia do oceny szczelności komory roboczej silników. Wskazano na możliwość rozwoju tych urządzeń. Opisano budowę przedprototypowego, pneumatycznego sensora komory roboczej. Przedstawiono wyniki badań szczelności komory roboczej małego silnika spalinowego.

Słowa kluczowe: komora spalania, nieszczelność, dysza, sensor szczelności

1. Wstęp

Nieszczelności w komorze roboczej maszyny tłokowej zmniejszają sprawność energetyczną maszyny, a w przypadku silników spalinowych mogą być dodatkowo przyczyną uszkodzeń zaworów, uszczelnień, tulei i pierścieni tłokowych. Nieszczelność między pierścieniami i tuleją w silniku skutkuje przeciekami – przedmuchem gorących gazów między tuleją i pierścieniami. Przedmuchi gazów powodują zrywanie filmu olejowego między tuleją i pierścieniami, co może spowodować zacieranie tłoka w tulei. Podobnie w przypadku zaworów i uszczelnień, przedmuchi gorących gazów mogą powodować erozję gazową par gniazdo – grzybek, głowica – uszczelnienie podgłowicowe.

Do oceny wartości nieszczelności / wartości przecieków można stosować znane z badań nieniszczących metody oceny szczelności. Metody badań szczelności opisane są w normie PN-EN 1779. Zastosowanie tych metod w przypadku zmontowanych maszyn tłokowych jest problematyczne. Z metod przedstawionych w normie PN-EN 1779 do oceny przecieków na pracujących maszynach tłokowych może być bezpośrednio stosowana metoda ultradźwiękowa. Daje ona jednakże dobre rezultaty tylko w przypadku przecieków (nieszczelności) kanałowych na zaworach i uszczelnieniach podgłowicowych.

2. Ocena szczelności komory roboczej

Znane są dwie metody oceny szczelności komory spalania silników [2]. Pierwsza metoda polega na pomiarze maksymalnego ciśnienia sprężania i porównanie wartości otrzymanej z wartością wzorcową ustaloną zazwyczaj z wyników

prób na hamowni. Druga polega na wtłaczaniu powietrza do zamkniętej komory spalania i ocenie przecieku.

W przypadku pierwszej, pomiaru ciśnienia sprężania w badanej komorze spalania dokonuje się po „podwieszeniu” pompy paliwowej, za pomocą sensora ciśnienia połączonego z badaną komorą spalania kurkiem indykatorowym. Przy porównywaniu ciśnień uwzględnić należy to, że ciśnienie sprężania zależy od prędkości obrotowej i ciśnienia powietrza doładowującego.

Tab. 1. Wartości graniczne spadków ciśnień w komorze spalania.
Tab. 1. Limiting values of pressure drops in the combustion chamber.

Względny spadek ciśnienia $\Delta p/p \cdot 100\%$	Stan techniczny komory spalania
0 ÷ 5	bardzo dobry
6 ÷ 25	dobry
powyżej 25	wymaga ustalenia przyczyny przecieku

Druga metoda, opisana w [3], polega na zastosowaniu urządzenia w postaci przewodu z dwoma dyszami i dwoma manometrami: jeden w przewodzie przed dyszami, drugi w przewodzie między dyszami. Takie urządzenie było i jest oferowane przez różne firmy, między innymi Hazwerk Polska. Urządzenie łączy się z komorą spalania przez kurek indykatorowy, otwór od wtryskiwacza, otwór świecy zapłonowej lub inny otwór. Pomiar przeprowadza się przy zamkniętych zaworach i ustawieniu tłoka w określonych położeniach między innymi w GMP (górnym martwym położeniu). Przy braku przecieku, po ustaleniu ciśnienia obydwa manometry powinny wskazywać to samo ciśnienie. Istniejący przeciek w komorze spalania powoduje, że na manometrze między

*Autor korespondencyjny. E-mail: p.bielawski@am.szczecin.pl

dyszami następuje spadek ciśnienia o Δp w porównaniu z ciśnieniem p przed dyszami. Miarą przecieku jest w tym urządzeniu względny spadek ciśnienia $\Delta p/p \cdot 100\%$. Dla silników o zapłonie samoczynnym stosowana jest za [4] reguła wnioskowania podana w tab. 1.

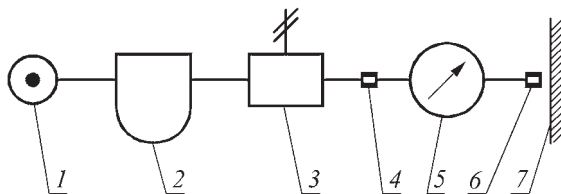
Pomiar względnego spadku ciśnienia przy zamkniętych zaworach dodatkowo w miejscach innych niż GMP umożliwia ocenę rozkładu zużycia tulei wzdłuż tworzącej tulei.

3. Urządzenie z manometrem różnicowym

Urządzenie z dwoma manometrami i dwoma dyszami nie jest powszechnie stosowane w okrętownictwie i przemyśle ze względu na niejednoznaczne kryteria oceny. Wskazane jest znalezienie metody i urządzenia, które pozwalają na pomiar przecieku. Rozwiązania należy szukać, wykorzystując prawa hydromechaniki i rozwiązania stosowane w pneumatycznych urządzeniach pomiarowych.

W hydromechanice wyróżnia się dwa rodzaje zwężeń: zwężki dławiące / dysze i kryzy. Dla kryzy stosunek długości do średnicy przepływu / rurociągu jest stosunkowo mały. W przypadku dyszy długość dyszy jest większa od średnicy przepływu. Między strumieniem objętości przepływającym przez zwężkę i różnicą ciśnień przed i za zwężką istnieje zależność. W przypadku dyszy jest ona liniowa.

Zasada działania przyrządów z manometrami i dyszami jest zasadą wykorzystywaną w pneumatycznych urządzeniach pomiarowych, np. do pomiaru odległości, rys.1. Podstawowym elementem urządzeń pneumatycznych jest dysza. Pneumatyczne urządzenia pomiarowe opisane są w przykładowo w [5-10].

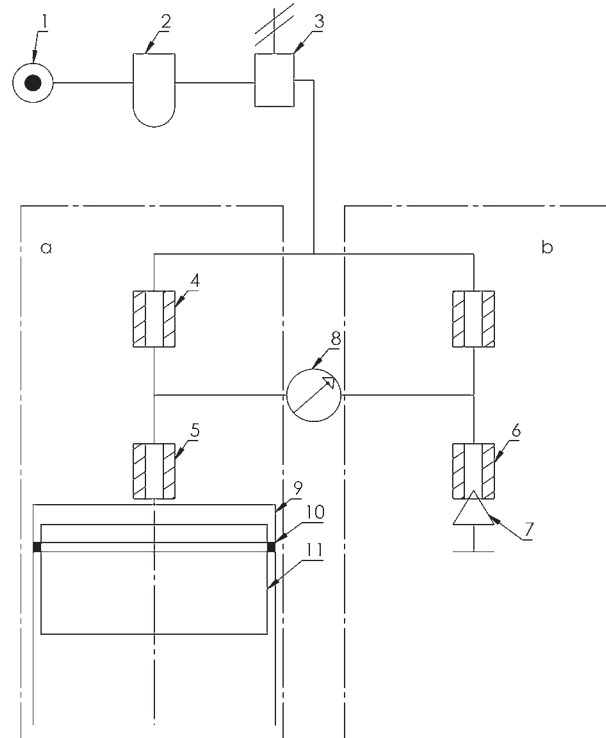


Rys. 1. Tor do pomiaru metodą ciśnieniową [5]: 1 – źródło sprężonego powietrza, 2 – filtr powietrza, 3 – zawór redukcyjny, 4 – dysza wstępna, 5 – manometr, 6 – dysza pomiarowa, 7 – badany obiekt.

Fig. 1. Track for measurement with pressure method [5]: 1 - source of compressed air, 2 - air filter, 3 - reducing valve, 4 - pre-nozzle, 5 - manometer, 6 - measuring nozzle, 7 - object under study.

W układzie jak na rys.1 spadek ciśnienia zasilającego zachodzi częściowo na dyszy wstępnej i reszta na dyszy pomiarowej. Stosunek obydwu ciśnień zależy od stosunku oporów przepływu na obydwu dyszach. Zmniejszanie pola przekroju dyszy pomiarowej spowoduje wzrost ciśnienia przed dyszą pomiarową. Jeżeli zmniejszenie pola będzie niewielkie (mały opór przepływu), spadek ciśnienia zasilającego nastąpi głównie na dyszy wstępnej. Jeżeli zmniejszenie pola przekroju dyszy pomiarowej będzie duże (duży opór przepływu), przez przewód popłynie niewielka ilość powietrza, co będzie skutkowało tym, że na dyszy wstępnej nastąpi niezauważalny spadek ciśnienia, a cały spadek ciśnienia zasilania odbędzie się na dyszy pomiarowej. Jeżeli szczelina między dyszą pomiarową a badanym obiektem

jest duża (mały opór przepływu), spadek ciśnienia zasilającego nastąpi głównie na dyszy wstępnej i zostanie zmierzony tylko niewielki spadek na dyszy pomiarowej. Jeżeli szczelina jest mała (duży opór przepływu), przez przewód popłynie niewielka ilość powietrza, co skutkuje tym, że na dyszy wstępnej nastąpi niezauważalny spadek ciśnienia, a cały spadek ciśnienia zasilania odbędzie się na dyszy pomiarowej [5].



Rys. 2. Pneumatyczny sensor szczelności komory roboczej silnika spalinowego: 1 – źródło sprężonego powietrza, 2 – filtr powietrza, 3 – zawór redukcyjny, 4 – dysza wstępna, 5 – dysza pomiarowa, 6 – dysza porównawcza, 7 – zawór regulacyjny, 8 – manometr różnicowy, 9 – tuleja cylindrowa, 10 – pierścień tłokowy, 11 – tłok, a – tor pomiarowy, b – tor porównawczy.

Fig. 2. Pneumatic leak sensor of the working chamber of an internal combustion engine: 1 - source of compressed air, 2 - air filter, 3 - reducing valve, 4 - pre-nozzle, 5 - measuring nozzle, 6 - comparison nozzle, 7 - regulating valve, 8 - differential pressure gauge, 9 - cylinder liner, 10 - piston ring, 11 - piston, a - measuring track, b - comparison track.

W przyrządach pneumatycznych stosowane są również rozwiązania z manometrem różnicowym. Wydaje się, że takie rozwiązanie można wykorzystać do pomiarów szczelności komory spalania, rys.2. Tory pomiarowe z manometrem różnicowym stosuje się, jeżeli nie mierzy się wartości strumienia objętości, lecz porównuje się dwa strumienie. Dwa strumienie są jednakowe, jeżeli przepływ przez dwie dysze pomiarowe jest jednakowy, niezależnie od tego, jaki jest całkowity strumień objętości. W tym celu w urządzeniu pomiarowym tworzy się dwa torowiska, każdy z dyszą wstępną i pomiarową, rys.2. Mierzone jest nie ciśnienie w jednym i drugim torze względem otoczenia, ale ciśnienie pomiędzy obydwo torami a i b. Jeżeli przez obydwa torowiska przepływa taka sama ilość gazu, to różnica ciśnień wynosi zero. Różni się strumień objętości jednego toru od drugiego,

to zmienia się tam ciśnienie i tym samym różnica ciśnień. Strumień objętościowy toru b regulowany jest zaworem regulacyjnym 7.

Celem weryfikacji rozwiązania przeprowadzono badania komory spalania małego dwusuwowego silnika spalinowego. Zbudowano układ według rys. 2. Średnicę dysz dobrano z warunku, że szczelina między tłokiem i tuleją może dopiero wtedy dławić przepływ powietrza, jeżeli powierzchnia A przekroju szczeliny jest mniejsza od kołowego przekroju dyszy pomiarowej: $A_{gr} < \pi d^2/4$. Jako zaworu regulacyjnego użyto dostępnego do badań zaworu dławiącego.

Zawór dławiący jest również dyszą. Za pomocą śruby regulacyjnej można ustawiać szczelinę za dyszą i tym samym regulować przepływający strumień objętości płynu. Miarą wartości strumienia objętości jest liczba działek odczytana na bębnie zaworu (0 działek – zawór zamknięty). Wartość bezwzględna strumienia objętości można wyznaczyć z charakterystyki zaworu. Potrzebny jest jednak dodatkowy pomiar spadku ciśnienia na zaworze.

Podczas badań komory spalania zmieniano szczelność komory poprzez montaż pierścieni znajdujących się w różnym stanie technicznym. Po wymianie pierścienia pojawiała się różnica ciśnienia na manometrze różnicowym, rys. 3. Za pomocą zaworu dławiącego doprowadzano do „wyzeroowania manometru różnicowego”, rys.3. Odczytywano liczbę działek na bębnie zaworu.



Rys. 3. Przykładowy przebieg różnicy ciśnień podczas badania szczelności.

Fig. 3. An example of the course of the pressure difference during the leak test.

Pomiaru przecieku dla danego cylindra dokonywano przy ciśnieniu 2 bar powietrza zasilającego, w określonych wybranych położeniach tłoka w cylindrze, w położeniach w których wszystkie zawory danego cylindra są zamknięte. Wybranymi położeniami tłoka są górne martwe położenie (GMP) i położenie, przy którym dla danej maszyny prędkość tłoka jest największa. Wyniki zamieszczono w tab.2.

Tab. 2. Wyniki badań szczelności komory roboczej małego silnika.

Tab. 2. The results of leak testing of the small engine work chamber.

Pierścień		zużyty	nowy	innego producenta	pierścień połamany
Położenie tłoka w cylindrze	0° (GMP)	5 działek	4,5 działki	5 działek	6,5 działek
	45°	4 działki	3 działki	3,5 działek	-
Spadek różnicy ciśnień po zmianie położenia		24 kPa	12,5 kPa	19 kPa	-

4. Zakończenie

Potwierdzono przydatność sensora z manometrem różnicowym do pomiaru szczelności komory spalania. Możliwe jest wykrycie i rozróżnienie nieszczelności spowodowanej zużyciem pierścienia i nieszczelności spowodowanej zużyciem tulei cylindrowej. Wskazane są dalsze prace konstrukcyjne celem między innymi wyeliminowania zaworu dławiącego.

5. Literatura/References

- [1] PN-EN 1779. Badania nieniszczące. Badania szczelności. Kryteria wyboru metody i techniki
- [2] St. Kluj: Diagnostyka urządzeń okrętowych. Studium Doskonalenia Kadr S.C. Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni.
- [3] Gricaj L.: Diagnostičeskie parametry glawnich sudowych maloobrotnych diezelej. Trudy CNIMF, 174/73
- [4] Syromiatnikow W.F.: Awtomatika kak sriedstwo diagnostyki na morskich sudach. Wyd. Sudostrojenie, Leningrad 1976
- [5] Buch zur Längenprüftechnik. <http://www.urlich-rapp.de/>, 2007.
- [6] DIN 2271. Pneumatische Längenmessung.
- [7] Pneumatisches Oberflächen – Prüfgerät. Bedienungsanleitung. VEB Maschinenindustrie Werdau, Werdau 1976.
- [8] Zelczak A.: Pneumatyczne pomiary długości. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2002.
- [9] Zelczak A.: Podstawy konstrukcji i zastosowanie pneumatycznych przyrządów pomiarowych do kontroli złożonych kształtów wewnętrznych. Przegląd Mechaniczny, 10/2006, s. 9–17.
- [10] Zelczak A.: Przyczynek do racjonalizacji pomiarów średnic otworów przyrządami pneumatycznymi. Przegląd Mechaniczny, 2/2004, s. 11–16.

Leonard Runkiewicz*

Instytut Techniki Budowlanej, Politechnika Warszawska

Historia metod nieniszczących stosowanych w budownictwie polskim

History of nondestructive methods in building and civil engineering in Poland

ABSTRACT

The paper presents the development of nondestructive methods based on:

- scientific and research works at the Polish Academy of Sciences, universities and research institutes;
- scientific and technical conferences;
- publications in the form of monographs, articles and lectures;
- courses and post-graduate studies.

Also presented are universities, research centers and professors having a significant influence on the development of nondestructive testing in Polish construction. A review and division of nondestructive methods and techniques currently used in construction to the appraisal of reinforced concrete, steel, wooden, masonry and plastic structures is also provided.

Keywords: structures; nondestructive testing

STRESZCZENIE

W referacie przedstawiono rozwój metod nieniszczących na podstawie:

- prac naukowo – badawczych w PAN, wyższych uczelniach oraz instytutach naukowo – badawczych;
- konferencji naukowo – technicznych;
- publikacji w postaci monografii, artykułów i referatów;
- kursów i studiów podyplomowych.

Prezentowane są także uczelnie, ośrodki naukowo – badawcze i profesorów mających znaczący wpływ na rozwój badań nieniszczących w polskim budownictwie. Podano również przegląd oraz podział metod i technik nieniszczących stosowanych obecnie w budownictwie do ocen konstrukcji żelbetonowych, stalowych, drewnianych, murowych i z tworzyw sztucznych.

Słowa kluczowe: konstrukcje budowlane; badania nieniszczące

1. Wstęp

Prawidłowe przeprowadzenie oceny bezpieczeństwa konstrukcji wymaga znajomości wytrzymałości materiałów, z których jest ona wykonana. W przypadku konstrukcji żelbetonowych materiałami takimi jest beton i stal. Niekiedy do oceny bezpieczeństwa elementów konstrukcji stosowana jest metoda obciążeń próbnych.

Wyznaczenia wytrzymałości i jednorodności materiałów można dokonać przy użyciu zarówno metod nieniszczących, jak i metod seminiszczących lub niszczących. Wśród badań nieniszczących najczęściej stosowana jest metoda radiologiczna, ultradźwiękowa i sklerometryczna. Natomiast badania seminiszczące konstrukcji żelbetonowych najczęściej polegają na wrywaniu kotew osadzonych w stwardniałym betonie (metoda pull-out) lub umieszczonych w konstrukcji przed jej zabetonowaniem (metoda lock-out), odrywaniu stalowych krążków przyklejonych do powierzchni betonu (metoda pull-off) oraz ścinaniu naroży elementu betonowego lub wylamywaniu walcowych bloków betonowych powstałych po nawierceniu betonu wiertnicą (metoda break-out). Badania niszczące mające na celu określenie wytrzymałości betonu na ścinanie wykonuje się na próbkach wyciętych z konstrukcji, najczęściej o kształcie walcowym [3].

Oceny konstrukcji budowlanych z innych materiałów takich jak stal, drewno, ceramika, tworzywa sztuczne dokonuje się za pomocą nieniszczących metod specjalistycznych.

2. Rozwój metod nieniszczących w budownictwie

Za początek badań nieniszczących (ang. Non Destructive Testing – NDT) uznaje się odkrycie i zastosowanie przez

Wilhelma Conrada Roentgena promieniowania X w 1895 r. Kolejnym ważnym krokiem w rozwoju badań nieniszczących było użycie w 1893 r. ultradźwięków. Jednak znaczny rozwój badań nieniszczących nastąpił w czasie II wojny światowej, gdyż konieczne było zapewnienie niezawodności środków bojowych [2].

Stosowanie metod nieniszczących w budownictwie rozpoczęło się w Polsce w połowie XX w. Pierwsze prace badawcze i diagnostyczne prowadzone były m.in. w Polskiej Akademii Nauk, Politechnice Warszawskiej, Instytucie Techniki Budowlanej oraz Instytucie Elektrotechniki. Obszar badań i wdrożeń poszerzał się stopniowo również na inne uczelnie techniczne oraz ośrodki naukowo-badawcze.

Początkowy okres rozwoju badań nieniszczących w budownictwie związany był z prof. prof. W. Olszakiem, A. Sawczukiem, Z. Pawłowskim, J. Pyszniakiem, L. Brunarskim, J. Remiszewskim, L. Runkiewiczem i wieloma innymi, którzy prowadzili prace związane z:

- 1) metodami badania materiałów budowlanych poprzez pomiar ich twardości (w szczególności zastosowanie młotka Poldiego);
- 2) rezonansową metodą pomiarów dynamicznych stałych sprężystych;
- 3) ultradźwiękową metodą kontroli jakości materiałów budowlanych;
- 4) rentgenografią konstrukcji żelbetonowych i stalowych;
- 5) elastooptyką i metodami badań modelowych (w szczególności na modelach z gumy);
- 6) badaniami konstrukcji przy użyciu tensometrów strunowych, elektrooporowych i magnetycznych (opracowanych w Czechosłowacji).

W początkowym okresie z zagranicy sprowadzane były

*Autor korespondencyjny. E-mail: l.runkiewicz@itb.pl

specjalistyczne przyrządy pomiarowe, m.in. do badań twardości (Schmidta, Paldiego), oceny zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych (Covemet, Proceq Szwajcaria). Natomiast w kraju konstruowano aparaturę specjalistyczną m.in. do badań ultradźwiękowych, rezonansowych, radiologicznych, elastooptycznych (PAN, ITB, IBJ, IE itp.). Aparatura i urządzenia te były wykorzystywane w badaniach naukowych mających na celu poszerzenie zakresu ich optymalnego stosowania, szczególnie w diagnostykach konstrukcji budowlanych wykonanych z różnych materiałów (stalowych, żelbetowych, murowych, drewnianych, zespolonych lub z tworzyw sztucznych).

Polskie ośrodki naukowo-badawcze przedstawiały swoje wyniki badań na krajowych i zagranicznych konferencjach i kongresach badań nieniszczących.

Krajowe uczelnie wyższe oraz ośrodki naukowo-badawcze, np. Polska Akademia Nauk, Instytut Elektrotechniki, Instytut Techniki Budowlanej, organizowały różne formy podnoszenia kwalifikacji w zakresie badań nieniszczących, takie jak konferencje, sympozja, studia podyplomowe. Kursy podyplomowe były znaczącym ogniwem w popularyzowaniu i wdrożeniu metod nieniszczących. Przykładowo kursy podyplomowe organizowane przez ITB obejmowały badania oraz diagnostyki konstrukcji budowlanych prowadzone metodami ultradźwiękowymi, sklerometrycznymi, radiologicznymi, rezonansowymi oraz elektrycznymi.

Znaczącą rolę w dynamicznym rozwoju metod nieniszczących w Polsce odegrał VII Międzynarodowy Kongres Badań Nieniszczących, który odbył się w 1973 r. w Warszawie (Przewodniczący Z. Pawłowski), a także trzy Konferencje Badań Nieniszczących w Budownictwie w latach 1974, 1976 i 1978, w których uczestniczyli – co w tamtych czasach było rzadkością – goście zagraniczni. Organizatorami tych konferencji był Instytut Techniki Budowlanej oraz Politechnika Wrocławska.

Na konferencjach tych przedstawiono oraz opublikowano ponad 120 referatów z Polski i zagranicy, co uważano wtedy za duży sukces naukowy i organizacyjny. Referaty dotyczyły m.in. zagadnień takich jak:

- ogólnych zasad stosowania metod nieniszczących w budownictwie;
- wpływów czynników technicznych i technologicznych na wyniki badań ultradźwiękowych, sklerometrycznych, radiologicznych, emisji akustycznej itp.;
- wpływów czynników środowiskowych i korelacyjnych na dokładności badań nieniszczących;
- wpływów analiz matematycznych na ocenę bezpieczeństwa konstrukcji metodami nieniszczącymi;
- stosowania metod nieniszczących dla oceny różnych rodzajów materiałów;
- ocen jakości elementów prefabrykowanych za pomocą metod nieniszczących;
- kompleksowego stosowania metod nieniszczących do oceny jakości konstrukcji budowlanych;
- stosowania metod radiologicznych i magnetycznych do oceny zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych;
- wilgotności i korozji betonu w konstrukcjach;
- połączeń elementów w konstrukcjach stalowych;

- ocen konstrukcji murowych, drewnianych, zespolonych oraz z tworzyw sztucznych;
- ocen jakości stropów, słupów, ścian, wież, zapór, wia-
duktów, mostów oraz innych elementów i konstrukcji
specjalistycznych;
- ocen budowli wieżowych, kominów i chłodni;
- ocen zbiorników i silosów;
- ocen zbrojenia i jego korozji metodami radiograficz-
nymi, radiologicznymi, ultradźwiękowymi, prądów
wirowych oraz za pomocą specjalistycznej aparatury
badawczej, jak np. źródeł promieniowania wyso-
koenergetycznego, izotopów, betatronów, aparatów
rentgenowskich, magnetycznych itp.

W wyniku współpracy naukowej w ramach RWPG opracowano w Centrum Badań Nieniszczących, we współpracy z krajami zachodnimi, podstawy do stosowania metod nieniszczących w budownictwie.

W Polskim Komitecie Normalizacyjnym opracowano specjalistyczne normy m.in. ultradźwiękowe, sklerometryczne, radiologiczne itp. do zastosowania w budownictwie. Normy te zostały wprowadzone do norm międzynarodowych, a później do norm Unii Europejskiej.

Prowadzone w kraju badania nad metodami nieniszczącymi, szczególnie na Wyższych Uczelniach oraz w ITB, pozwalały na coraz szersze stosowanie tych metod w budownictwie.

Przyczyniły się one także do powstania szeregu prac doktorskich i habilitacyjnych, przykładowo na Politechnice Warszawskiej, Wrocławskiej, Krakowskiej, Śląskiej, AGH, Rzeszowskiej, Szczecińskiej, Poznańskiej, Białostockiej, Lubelskiej, a także w Instytucie Techniki Budowlanej. W ośrodkach tych powstawały „szkoły” badań nieniszczących, w których wyróżnić można szkoły prof. prof. A. Garbacza, J. Hoły, J. Kaszyńskiego, R. Sztukiewicza, K. Flagi, K. Schabowicza, B. Stawiskiego, Ł. Drobca i innych.

W Instytucie Techniki Budowlanej zostały opracowane instrukcje stosowania oraz wytyczne oceny jakości, a także zalecenia Ministerstwa Budownictwa w sprawie podnoszenia kwalifikacji oraz zasad oceny bezpieczeństwa konstrukcji budowlanych metodami nieniszczącymi. Wymienione prace pozwalały na poprawne stosowanie metod nieniszczących w budownictwie.

Metody nieniszczące weszły do programów nauczania studentów na wszystkich wydziałach budowlanych wyższych uczelni. Ponadto są one przedmiotem wielu budowlanych konferencji naukowo – technicznych, takich jak cykliczne konferencje: PAN i PZITB w Krynicy, Awarie budowlane w Międzyzdrojach, Warsztaty Projektanta Konstrukcji Budowlanych, Warsztaty Rzeczoznawcy Budowlanego, Kontra, Zbiorniki, Renowacje, Budownictwo w energetyce, Konstrukcje sprężone, Matbud i innych.

Za pomocą metod nieniszczących realizowano diagnostyki większości ważniejszych obiektów budowlanych w kraju, a ich wyniki stanowiły podstawy do oceny bezpieczeństwa oraz zakresu ewentualnego wzmocnienia odpowiedzialnych obiektów, w tym obiektów zabytkowych.

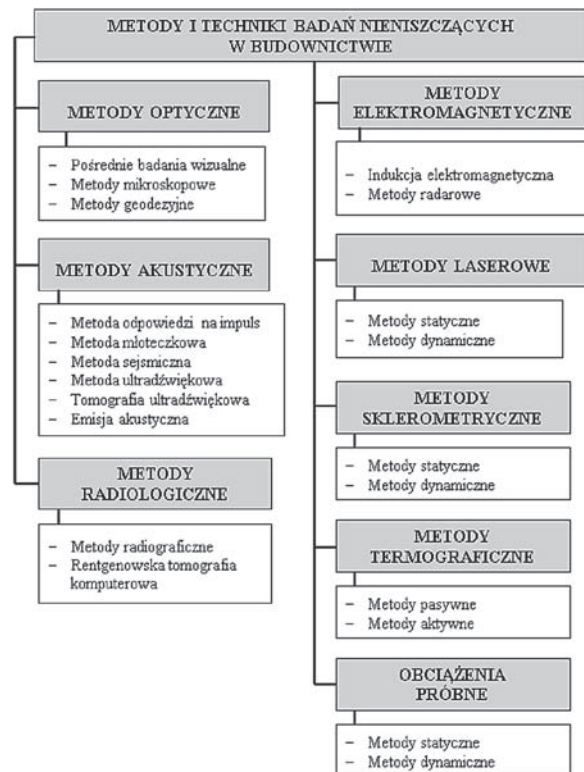
Szeroki i innowacyjny rozwój konstrukcji budowlanych wymaga dalszego rozwoju badań nieniszczących

z wykorzystaniem specjalistycznej, nowoczesnej aparatury badawczej.

3. Krótki przegląd metod nieniszczących i seminieniszczących w budownictwie

Podział metod i technik nieniszczących

W diagnostyce konstrukcji budowlanych powszechnie stosowane są metody nieinwazyjne, nieniszczące i seminieniszczące, które nie powodują naruszenia struktur badanych konstrukcji. Na rysunku 1 przedstawiono ogólny podział tych metod, a ich szczegółowy opis można znaleźć w literaturze technicznej, np. w [1, 3].



Rys. 1. Ogólna klasyfikacja nieniszczących metod i technik stosowanych w diagnostyce konstrukcji budowlanych.

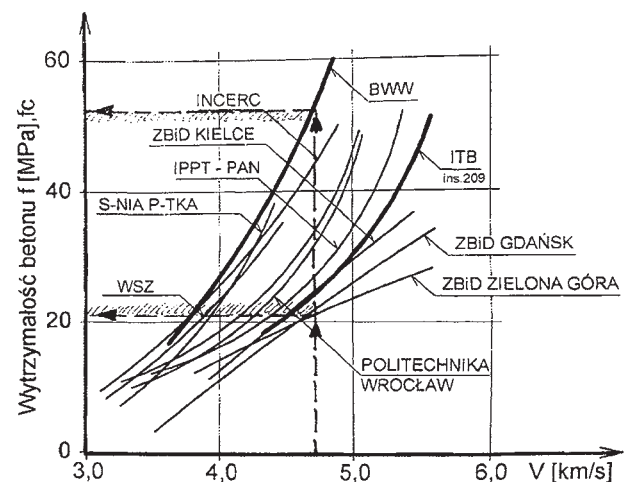
Fig. 1. General classification of nondestructive methods and techniques used in diagnostics of building structures.

Metody optyczne - do metod optycznych zalicza się wiele technik pomiarowych wykorzystujących aparaturę badawczą w postaci m.in. endoskopów, boroskopów, wideoskopów umożliwiających badanie powierzchni i miejsc niedostępnych dla oka, a także mikroskopy użyteczne w warunkach laboratoryjnych. Ponadto do tej grupy metod zalicza się także skaning laserowy umożliwiający zdalne wyznaczenie położenia zbioru punktów w przestrzeni trójwymiarowej, co daje możliwość rekonstrukcji trójwymiarowego obrazu (ukształtowania) całych obiektów budowlanych lub ich fragmentów, w tym widocznej dla lasera konstrukcji [1]. Metoda ta może być stosowana m.in. do zdalnych pomiarów postępujących ugięć wybranych elementów konstrukcji. Stosowane są one w monitoringach obiektów budowlanych.

Metody akustyczne - do metod akustycznych zalicza się metody ultradźwiękowe, odpowiedzi na impuls, młoteczkową, tomografię ultradźwiękową i emisji akustycznej.

Metody ultradźwiękowe - są stosowane m.in. do oceny, w sposób pośredni, wytrzymałości i jednorodności betonu i stali w konstrukcji [4-11], a także do wykrywania nieciągłości strukturalnej w postaci pęknięć oraz do lokalizowania pustek powietrznych w badanych materiałach. Wytrzymałość betonu określana jest na podstawie prędkości podłużnych fal ultradźwiękowych rozprzestrzeniających się w badanych betonach, skorelowanych z wytrzymałością na ściskanie uzyskaną na podstawie badań wytrzymałościowych próbek pobranych z konstrukcji.

Przykładowe zależności $f_c - V$ dla różnych krajów i ośrodków pokazano na rys. 2.



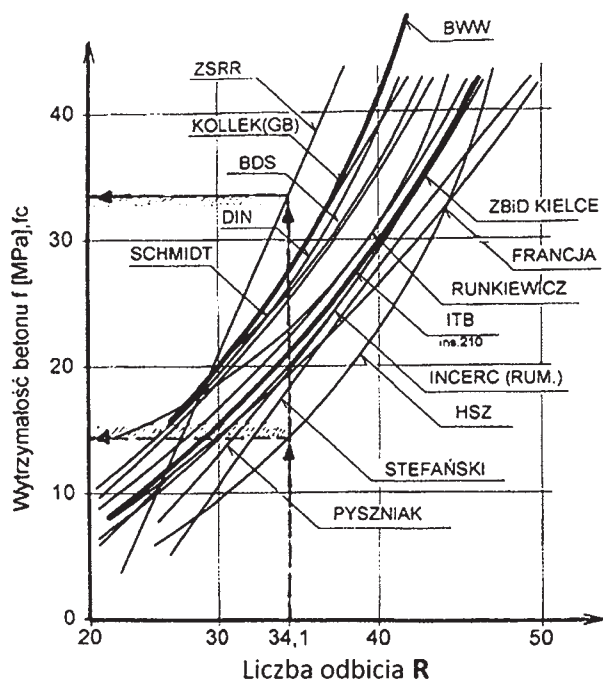
Rys. 2. Przykłady charakterystycznych zależności $f_c - V$ dla metody ultradźwiękowej (dla różnych betonów i różnych krajów).

Fig. 2. Examples of characteristic dependencies $f_c - V$ for the ultrasonic method (for different concretes and different countries).

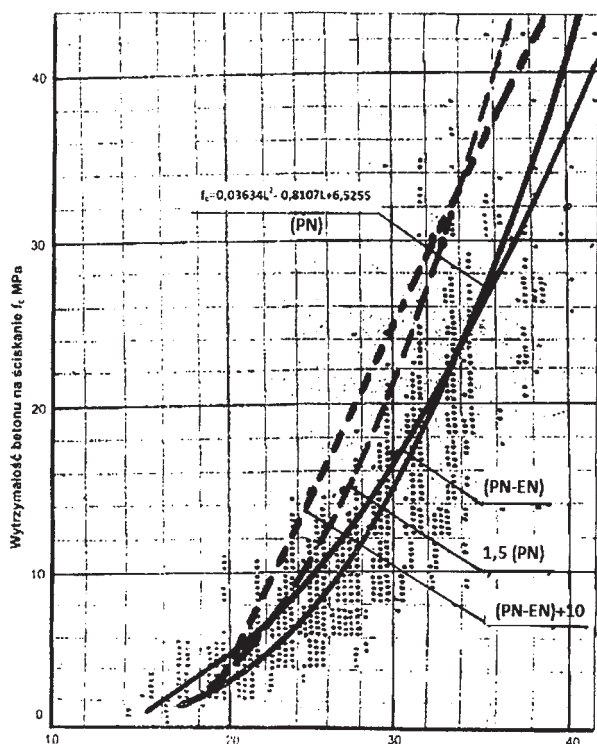
Metody odpowiedzi na impuls (impulse response) - są stosowane m.in. do wykrywania pustek powietrznych pod płytami żelbetowymi ułożonymi na gruncie, delaminacji na stykach warstw, miejsc wadliwych i obszarów o dużej niejednorodności struktury betonu w masywnych elementach betonowych (tzw. honeycombing).

Metody emisji akustycznej - są to metody pomiarowe wykorzystujące zjawisko powstawania i rozprzestrzeniania się fal sprężystych wysokiej częstotliwości w strukturze materiału, powodowanych obciążeniem. Mogą to być obciążenia narastające statycznie, wielokrotnie zmienne, dynamiczne, ale też i obciążenia niemechaniczne [8]. W metodach tych znacznie wcześniej niż w innych sygnalizowany jest rozwój procesów destrukcyjnych, które mogą spowodować zniszczenie, dając w ten sposób czas potrzebny do odciążenia konstrukcji.

Metody elektromagnetyczne - wykorzystywane są do określenia lub wykrywania w dostępnych jednostronnie betonowych i żelbetowych elementach, zwłaszcza płytowych: grubości, rozwarstwień, rozległych wad, usytuowania prętów zbrojeniowych [9]. Aparatura może przemieszczać się po powierzchni badanego elementu. Zaletą tej metody jest możliwość szybkiego badania elementów o dużych powierzchniach szczególnie w zakresie lokalizowania zbrojenia, natomiast wadą - mała dokładność określenia średnicy i grubości otuliny zbrojenia w elementach żelbetowych.



Rys. 3. Przykładowe zależności empiryczne $f_c - R$ dla sklerometrów Schmidta typu N (dla różnych betonów w różnych krajach).
Fig. 3. Examples of empirical relationships $f_c - R$ for Schmidt type N sclerometers (for different concretes in different countries).



Rys. 4. Zależności empiryczne dla młotków Schmidta typu N ($a = 0$) do oceny wytrzymałości betonu podane dla warunków polskich [7].
Fig. 4. Empirical dependencies for type N Schmidt hammers ($a = 0$) for the assessment of concrete strength given for Polish conditions [7].

Metody sklerometryczne - stosowane do oceny, w sposób pośredni, wytrzymałości i jednorodności betonu

w konstrukcji. Uzyskiwany z badań parametr w postaci tzw. liczby odbicia R skorelowany jest z wytrzymałością na ściskanie betonu poprzez dobór odpowiedniej zależności korelacyjnej lub hipotetycznej [3, 6, 7].

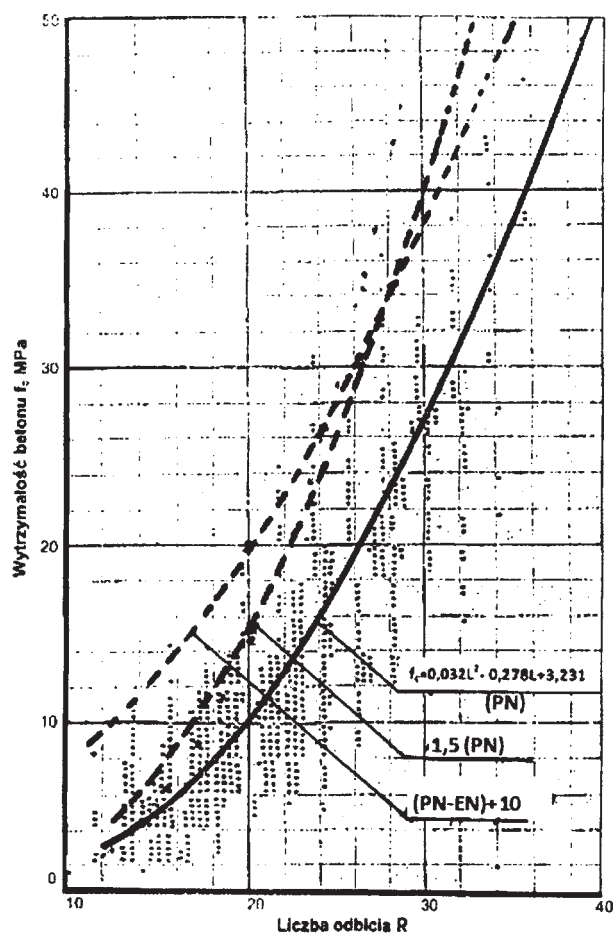
Przykładowe zależności badawcze dla metod sklerometrycznych do oceny wytrzymałości betonu podano na rys. 3. Uzasadniają one potrzebę uproszczonego skalowania metody dla każdego rodzaju betonu.

Polskie zależności empiryczne $f_c - R$ dla sklerometrów Schmidta, dla betonów specjalistycznych i regionalnych, były opracowywane na podstawie bardzo licznych badań.

Przykładowe zależności opracowane w ITB na ponad 2000 pomiarach, dla warunków polskich pokazano na rys. 4 i 5 [14].

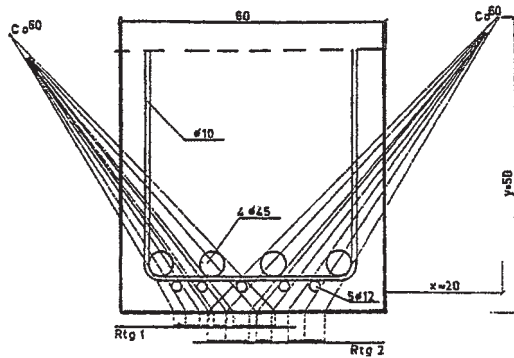
Metody radiologiczne. Wśród metod radiologicznych można wyróżnić metodę radiograficzną [12] służącą m.in. do oceny rozkładu zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych. Przykład oceny zbrojenia w belce żelbetowej pokazano na rys. 6. Metody te są opisane w wielu publikacjach.

Wyniki badań naukowych opracowanych przez ITB stały się podstawą do opracowania odpowiedniej normy PN-B i obecnie służą do opracowania normy PN-EN.



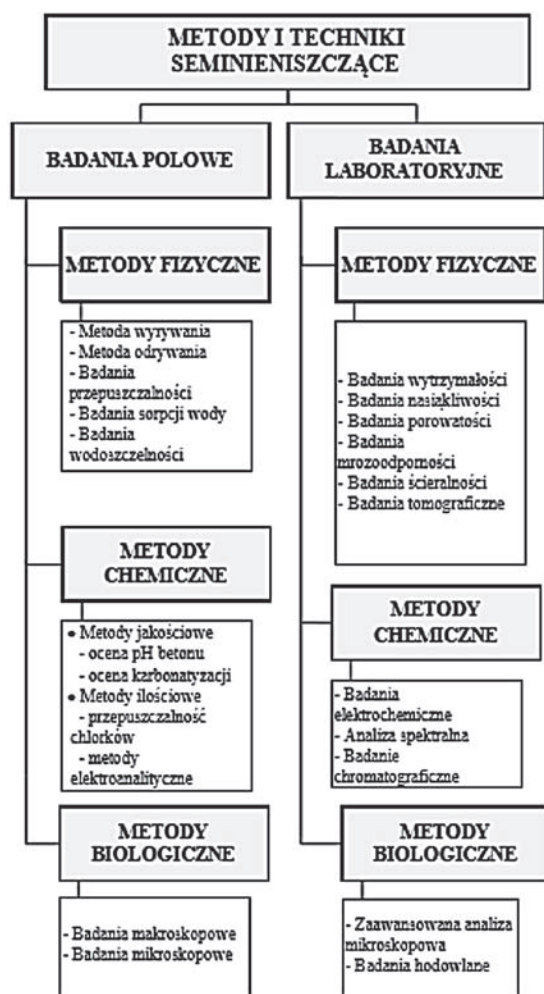
Rys. 5. Zależności empiryczne dla młotków Schmidta typu L ($a = 0$) do oceny wytrzymałości betonu dla warunków polskich [7].
Fig. 5. Empirical dependencies for L-type Schmidt hammers ($a = 0$) to assess concrete strength for Polish conditions [7].

Metody i techniki seminieniszczące - metody te, podobnie jak metody nieniszczące, cechują się dużą przydatnością w ocenie trwałości, bezpieczeństwa i niezawodności



Rys. 6. Ocena zbrojenia dolnego w belce (w środku przęsła) za pomocą metody radiograficznej.

Fig. 6. Evaluation of the bottom reinforcement in the beam (in the middle of the span) using the radiographic method.



Rys. 7. Ogólna klasyfikacja metod i technik seminieniszczących stosowanych w diagnozowaniu konstrukcji budowlanych.

Fig. 7. General classification of seminondestructive methods and techniques used in diagnosing building structures.

konstrukcji żelbetowych. Ich stosowanie nie powoduje istotnego naruszenia struktury badanej konstrukcji. Rysunek 7 jest propozycją ogólnej klasyfikacji podstawowych metod i technik seminieniszczących przydatnych w diagnostyce konstrukcji budowlanych. Wyróżniono metody fizyczne, chemiczne i biologiczne, z podziałem na przydatne w badaniach polowych (terenowych) oraz stosowane w laboratoryjnych

badaniach próbek, w tym na przykład rdzeniowych pobranych z konstrukcji. Szczegółowe opisy metod i technik seminieniszczących dostępne są m.in. w pracach [1, 3, 13].

Obciążenia próbne konstrukcji – wykorzystywane są do oceny aktualnego stanu granicznego nośności lub użyteczności elementu konstrukcyjnego, gdy z różnych przyczyn nie można tego dokonać na drodze badawczej lub obliczeniowo [10].

4. Podsumowanie i wnioski

Rozwój metod nieniszczących w budownictwie, rozpoczęty w Polsce przed ponad 50 laty należy ocenić, mimo wielu trudności techniczno – gospodarczych, jako dobry. Na wyższych uczelniach i w ośrodkach naukowo – badawczych są opracowywane i rozwijane specjalistyczne metody badawcze służące, w oparciu o aparaturę i urządzenia badawcze opracowywane w kraju, jak i zakupywane za granicą, rozwojowi polskiego nowoczesnego budownictwa na poziomie światowym. Ich dalszy rozwój powinien być wdrażany przez szkolenia, publikacje oraz prace naukowo – badawcze, realizowane wspólnie z ośrodkami zagranicznymi.

5. Literatura/References

- [1] J. Bień: Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010.
- [2] T. Chady, R. Sikora: Badania nieniszczące: historia, stan obecny i perspektywy rozwoju. Przegląd Spawalnictwa 12/2013, s. 13-15
- [3] Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk: Diagnostyka konstrukcji żelbetowych, tom 1, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- [4] PN-EN 12504-4:2005. Badania betonu. Część 4. Oznaczanie prędkości fali ultradźwiękowej
- [5] B. Goszczyńska, G. Świt, W. Trompczyński, i inni: Zastosowanie metody emisji akustycznej do analizy procesu zarysowania belek żelbetowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej: Budownictwo i Inżynieria Środowiska. Zeszyt 59, 2012, s. 76 – 84.
- [6] L. Runkiewicz, J. Sieczkowski: Ocena wytrzymałości betonu w konstrukcji na podstawie badań sklerometrycznych. Poradnik. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2018.
- [7] PN-EN 12504-2:2013-03. Badania betonu w konstrukcjach. Część 2. Badania nieniszczące. Oznaczenie liczby odbicia.
- [8] PN-EN 12504-3:2006. Badania betonu w konstrukcjach. Część 3. Oznaczanie siły wyrywającej.
- [9] PN-EN 13791:2008. Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych.
- [10] B. Lewicki: Obciążenia próbne konstrukcji istniejących budynków. Prace Naukowe Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 1997.
- [11] D. Stefaniuk, Ł. Sadowski, Wykorzystanie rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej do oceny wybranych cech mikrostruktury betonu, Krajowa Konferencja Badań Radiograficznych - „POPÓW 2016”
- [12] J. Hoła, K. Schabowicz: Diagnostyka obiektów budowlanych. Materiały Budowlane, 2015, 5, 3 – 7.
- [13] A. Zybura, M. Jaśniok, T. Jaśniok: Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Tom 2. Badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017
- [14] L. Runkiewicz: Instrukcja stosowania młotków Schmidta do nieniszczącej kontroli jakości betonu. Instrukcja nr 210, ITB, Warszawa 1977
- [15] L. Runkiewicz: Sklerometryczna ocena jakości betonu. Praca magisterska. Politechnika Warszawska, 1961



**BAKER
HUGHES**
a GE company



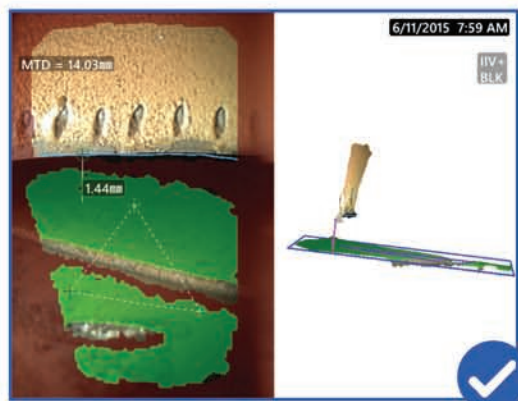
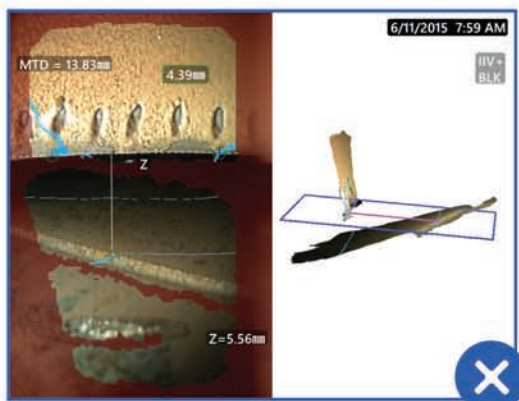
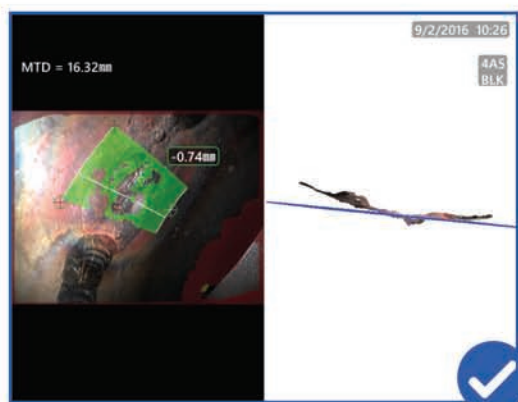
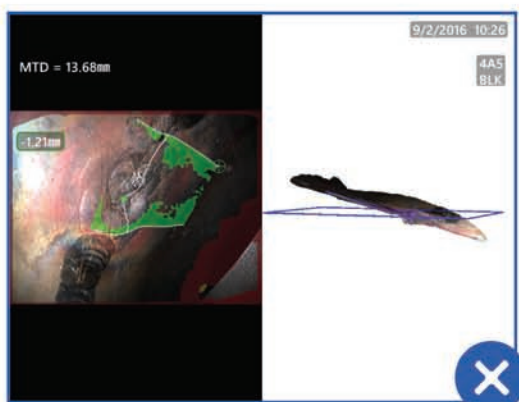
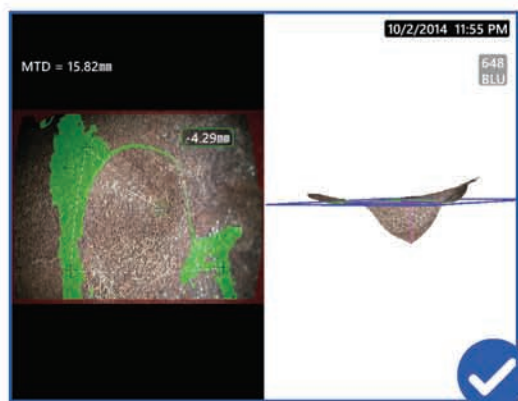
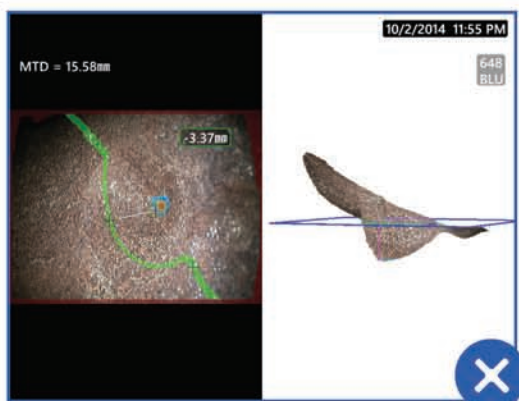
Channel Partner



Popraw dokładność swoich pomiarów z technologią Real3D Measurement, jedyną z pełnym obrazowaniem 3D.

Real3D Measurement - Połączenie trójwymiarowego modelu, zaawansowanych algorytmów pomiarowych oraz wiernego odwzorowania widoku modelowanej powierzchni umożliwia precyzyjne, wiarygodne i powtarzalne pomiary.

Prezentacja ruchomego i skalowalnego modelu, z naniesioną maską rzeczywiście obserwowanej powierzchni, umożliwia wiarygodną weryfikację umiejscowienia wybranych punktów pomiarowych, eliminując dotychczasowe pomyłki.



Niepoprawne umiejscowienie
kursorów pomiarowych widoczne
na modelu 3D

Poprawne umiejscowienie
kursorów pomiarowych widoczne
na modelu 3D

technologia badań
wizualnych

Everest
Polska

Everest Polska Sp. z o.o. ul. Geodetów 176, 05-500 Piaseczno k. Warszawy

tel. (+48 22) 750 50 83, faks: (+48 22) 750 70 21, email: everestvit@everestvit.pl, www.everestvit.pl

Leonard Runkiewicz^{1*}, Jan Sieczkowski²

¹Instytut Techniki Budowlanej, Politechnika Warszawska

²Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa

Ocena techniczna obiektów budowlanych z wykorzystaniem metod nieniszczących i seminieniszczących

Technical assessment of building structures by the nondestructive and seminondestructive methods

ABSTRACT

The paper presents the following issues:

- safety and reliability of buildings;
- degradation of buildings;
- types of diagnostics and assessments of buildings;
- methods and techniques of diagnosing buildings;
- methods and techniques of testing nondestructive and seminondestructive construction structures.

Keywords: building structures, nondestructive methods, seminondestructive methods

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono zagadnienia:

- bezpieczeństwa i niezawodności obiektów budowlanych;
- degradacji obiektów budowlanych;
- rodzajów diagnostyk i ocen obiektów budowlanych;
- metod i technik diagnozowania obiektów budowlanych;
- metod i technik badań nieniszczących i seminieniszczących konstrukcji budowlanych.

Słowa kluczowe: ocena techniczna, metody nieniszczące, metody seminieniszczące

1. Wstęp

Obiekty budowlane powinny być, zgodnie z przepisami [4], tak zaprojektowane i wybudowane, aby w przewidywanym okresie użytkowania spełniały stawiane im wymagania podstawowe. Obiekty te, przez cały okres eksploatacji, powinny być utrzymywane w należytym stanie technicznym, nie dopuszczając do nadmiernego pogorszenia ich właściwości użytkowych i sprawności technicznej.

Wraz z upływem czasu wbudowane materiały i wyroby podlegają procesom starzenia, a ich właściwości użytkowe ulegają pogorszeniu. Poziom degradacji właściwości użytkowych powinien być więc często sprawdzany, a uszkodzone wyroby naprawiane, remontowane lub wymieniane. Sprawdzenia właściwości użytkowych dokonuje się w ramach kontroli okresowych (corocznych lub co 5 lat) [4], wymaganych przepisami lub spowodowanych innymi przyczynami, takimi jak zarysowania, spękania i nadmierne ugięcia elementów.

W ramach dokonywanych ocen stanów technicznych obiektów budowlanych, do ocen parametrów materiałów i wyrobów często stosowane są badania z wykorzystaniem metod nieniszczących lub seminieniszczących. Metody te są z reguły stosowane do oceny pierwszego wymagania podstawowego „Nośność i stateczność konstrukcji”.

Istotnym zagadnieniem, często pomijanym przy ocenach cech materiałów budowlanych, jest zagrożenie popełniania nadmiernych błędów. Błędy te mogą zakłócać prawidłową ocenę jakości i trwałości konstrukcji, a w konsekwencji

przyczyniać się do podjęcia nieprawidłowych decyzji o zakresie dalszej eksploatacji, o sposobie i metodach renowacji, wzmocnień lub modernizacji obiektów.

2. Degradacje konstrukcji budowlanych

Degradacje konstrukcji budowlanych powodowane są wieloma czynnikami, które w praktyce zazwyczaj występują w postaci kombinacji złożonej z kilku czynników. Aktywność i znaczenie mechanizmów degradacji jest różnicowane w zależności od materiałów, z których konstrukcje są wykonane, co przykładowo dla konstrukcji żelbetowych i stalowych ilustruje tabela 1.

Intensywność procesów degradacyjnych może być różna w zależności od warunków eksploatacji konstrukcji. Może ona być spowolniona, gdy konstrukcja jest należycie zabezpieczona przed niekorzystnymi oddziaływaniami środowiskowymi. Intensywność procesów może także ulec przyspieszeniu, na przykład w wyniku nagłego zadziaływania czynników mechanicznych (przeciążenie, uderzenie, wybuch), wystąpienia nadzwyczajnych czynników pogodowych czy też innych zdarzeń o charakterze losowym (ekstremalne opady, pożar), nieprawidłowej eksploatacji, braku dbałości o konstrukcję w czasie jej użytkowania, błędów wykonawczych lub projektowych itd.

Konsekwencją procesów degradacyjnych, w sytuacji, gdy trwałość pierwotna konstrukcji staje się niewystarczająca, jest pojawienie się w niej mniej lub bardziej poważnych uszkodzeń wymagających naprawy lub wzmocnienia [1, 2, 3]. Ale może to być też przyczyną wystąpienia poważniejszych zniszczeń, w tym awarii lub katastrof obiektów budowlanych.

*Autor korespondencyjny. E-mail: l.runkiewicz@itb.pl

Tab. 1. Mechanizmy degradacji żelbetu i stali w konstrukcjach budowlanych [2].

Tab. 1. Mechanisms of degradation of reinforced concrete and steel in building constructions [2].

Mechanizmy degradacji	Rodzaj konstrukcji	
	żelbetowa	stalowa
CZYNNIKI FIZYCZNE		
Akumulacja zabrudzeń nieorganicznych	•	•
Cykliczne zamrażanie/odmrażanie	•	o
Erozja	•	o
Krystalizacja	•	
Oddziaływanie ekstremalnych temperatur	o	•
Pękanie	o	
Relaksacja	•	o
Skurcz	•	
Przeciążenia	•	•
Wymywanie	•	
Zmęczenie	o	•
Zmiany warunków geotechnicznych	•	•
CZYNNIKI CHEMICZNE		
Karbonatyzacja betonu	•	
Korozja	•	•
Oddziaływania substancji agresywnych	•	•
Reakcje między składnikami materiału	•	
BIOLOGICZNE		
Akumulacja zabrudzeń organicznych	•	•
Oddziaływania mikroorganizmów	•	•
Oddziaływania roślin	•	o
Oznaczenie: • – mechanizm podstawowy; o – mechanizm dodatkowy		

Mając na uwadze trwałość, w tym bezpieczeństwo i niezawodność konstrukcji budowlanych, poddaje się je okresowym przeglądom technicznym, zgodnie z wymaganiami ustawy Prawo budowlane [4].

Stwierdzenie w wyniku dokonanych ocen okresowych istotnych nieprawidłowości, poważniejszych usterek lub uszkodzeń poszczególnych elementów lub całych konstrukcji skutkuje zwykle potrzebą przeprowadzenia znacznie bardziej szczegółowego i zaawansowanego, w stosunku do przeglądu okresowego, postępowania zwanego diagnostyką doraźną [3].

Przeprowadzenie szczegółowych diagnostyk konstrukcji budowlanych także występuje w przypadkach potrzeby określenia możliwości i warunków wykonania planowanych modernizacji konstrukcyjno-budowlanych, nadbudów, rozbudów albo zmian technologicznych w obiektach. Diagnostyki takie nazywane są docelowymi i mogą mieć charakter dwuetapowy [7]. Podobnie jak diagnostyki doraźne wymagają one przeprowadzania całego szeregu postępowań, wśród których integralne są badania techniczne (diagnostyczne) i analizy, wymagające z kolei umiejętnego stosowania nowoczesnych metod badawczych i analitycznych.

Rozwiązywanie problemów występujących podczas diagnoz konstrukcji eksploatowanych jest często trudniejsze niż projektowanie konstrukcji nowych. Bierze się to stąd, że w czasie eksploatacji konstrukcje te często ulegają niejednorodnemu osłabieniu i podlegają niszczeniu w wyniku

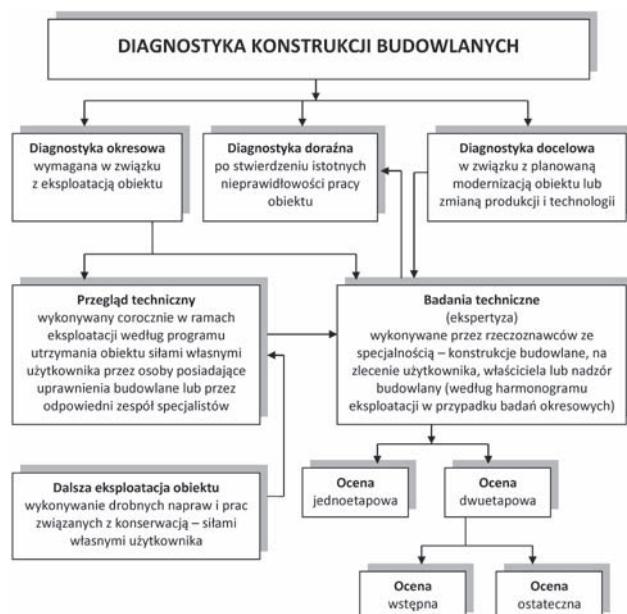
korozji elementów, zmian warunków posadowienia, zmian obciążenia, działania szkodliwego środowiska, działania czynników losowych itp. Przeprowadzenie prawidłowej diagnostyki konstrukcji wymaga znajomości jej pracy oraz umiejętności wykorzystania wiedzy z wielu dziedzin nauki i techniki.

3. Rodzaje ocen konstrukcji budowlanych

Wyróżnia się trzy rodzaje ocen konstrukcji budowlanych (rys. 1):

- okresowe (przeglądy techniczne);
- doraźne;
- docelowe.

Oceny okresowe są związane z wykonywaniem przeglądów technicznych, które powinny stanowić jeden z podstawowych warunków prawidłowej eksploatacji obiektu budowlanego zgodnie z wymaganiami ustawy Prawo budowlane. Przestrzeganie harmonogramów przeglądów technicznych oraz ich realizację powinny należeć do użytkowników (zarządców). Mogą być one wykonane jego siłami własnymi lub przez utworzone w tym celu zespoły specjalistów, przy czym powinny być przeprowadzane corocznie i wpisywane do książki obiektu.



Rys. 1. Systemy diagnostyk konstrukcji budowlanych [7].

Fig. 1. Diagnostics systems for building structures [7].

Oceny docelowe są najczęściej związane z oceną możliwości i warunków przeprowadzania planowanych zmian lub modernizacji konstrukcyjno-budowlanych, rozbudowy, nadbudowy oraz zmian technologicznych w obiektach.

Oceny doraźne i docelowe konstrukcji budowlanych wykonuje się najczęściej z powodu:

- występujących uszkodzeń lub lokalnych zniszczeń elementów konstrukcji;
- planowanych zmian sposobu użytkowania lub przedłużenia planowanego okresu eksploatacji;
- pogorszenia się stanu technicznego konstrukcji na skutek eksploatacji, czynników środowiskowych lub obciążeń

wyjątkowych (pożaru, wstrząsu, wybuchu itp.);

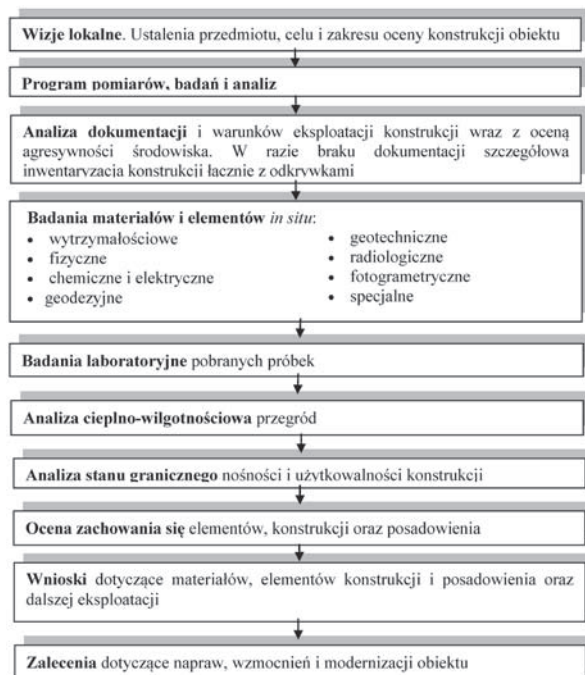
- planowanej modernizacji lub innych zmian, podczas których będą wymieniane lub wprowadzane nowe elementy konstrukcyjne, obok istniejących układów konstrukcyjnych przenoszących obciążenia;
- obniżonej niezawodności konstrukcji na skutek wstrząsów parasejsmicznych, zalania wodą, działania pożaru itp.;
- wymagań nadzoru budowlanego, firm ubezpieczeniowych, właścicieli, zarządców, użytkowników itp.

Oceny okresowe (przeglądy techniczne) mogą przeprowadzać własnymi siłami właściciele lub użytkownicy (zarządcy) obiektów budowlanych.

Oceny doraźne lub docelowe, które wymagają przeprowadzenia badań technicznych i analiz, mogą wykonać zespoły specjalistów lub uprawnieni rzeczoznawcy.

W zależności od specyfiki poszczególnych przypadków, oceny (diagnozy) można realizować jednoetapowo lub dwuetapowo.

Jednoetapowe oceny stanów konstrukcji budowlanych można wykonać w normalnym trybie postępowania (niewymuszonym wyjątkowo złym stanem technicznym konstrukcji lub koniecznością podjęcia szybkich decyzji w związku z planowaną modernizacją lub innymi czynnościami administracyjno-technicznymi (rys. 2).



Rys. 2. Schemat jednoetapowej oceny konstrukcji budowlanych [7].
Fig. 2. Scheme of a one-step evaluation of building structures [7].

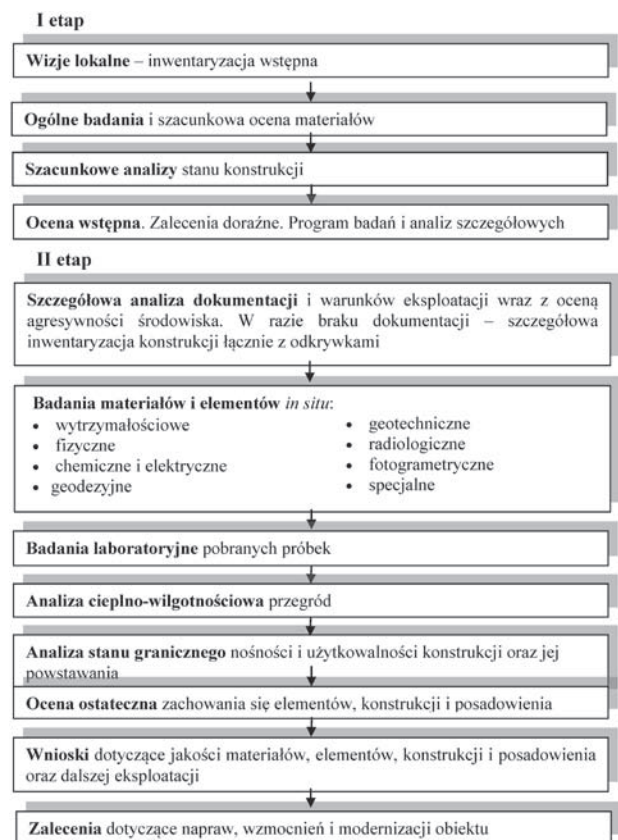
Dwuetapowe oceny stanu technicznego konstrukcji budowlanych należy przeprowadzać głównie w razie potrzeby podejmowania decyzji o doraźnym wzmocnieniu lub zabezpieczeniu konstrukcji znajdujących się w wyjątkowo złym stanie technicznym, a także w celu ukierunkowania dalszych działań (rys. 3). Te systemy ocen mogą być również przydatne w sytuacjach, gdy są konieczne szybkie orientacje dotyczące możliwości adaptacji obiektów w razie planowanych

zmian funkcji obiektów lub przewidywanych wprowadzeń istotnych zmian technologicznych i organizacyjnych.

Dwuetapowe oceny konstrukcji budowlanych składają się z ocen wstępnych i ostatecznych.

Bezpieczeństwo i niezawodność budowlanych konstrukcji eksploatowanych mogą być (w zależności od wymagań) określone dla sytuacji:

- trwałych, odpowiadających normalnym warunkom użytkowania;
- przejściowych, odpowiadających warunkom występującym w czasie remontów, modernizacji lub wzmocnień;
- wyjątkowych, odpowiadających warunkom losowym (wypadkowym), nie ujętych normami, jak pożar, uderzenie, wichura, zalanie, wybuch.



Rys. 3. Schemat dwuetapowej oceny konstrukcji budowlanych [7].
Fig. 3. Scheme of a two-stage assessment of building structures [7].

4. Postępowania diagnostyczne

Ogólne zasady postępowania

Postępowaniom diagnostycznym mogą być poddane, w zależności od potrzeb, całe konstrukcje budowlane albo tylko wybrane ich elementy, np. uszkodzone lub przewidziane do zmian konstrukcyjnych, napraw albo do modernizacji. W takich przypadkach zakresem diagnostyki powinny być objęte również inne elementy konstrukcji, w stosunku do których istnieje podejrzenie, że poziom ich niezawodności i bezpieczeństwa użytkowania mógł ulec obniżeniu.

W badaniach diagnostycznych konstrukcji budowlanych lub elementów składowych tych konstrukcji należy uwzględnić rzeczywisty stan i rzeczywiste warunki ich pracy, a przy

ocenie stosować aktualne normy. Dawne normy stanowiące podstawę projektowania tych konstrukcji powinny być traktowane jedynie jako wiedza techniczna. Poziomy bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji, powinny być nie niższe od poziomów wymaganych przy projektowaniu nowych konstrukcji.

Wybór metod i technik diagnostycznych należy dostosować do warunków i stanu technicznego diagnozowanych konstrukcji. Szczególnie polecane są metody nieniszczące i seminieniszczące. W wyjątkowych sytuacjach można zastosować obciążenia próbne. Stosowane metody powinny zapewnić uzyskanie wyników o wymaganej dokładności i na tyle licznych, aby możliwa była ocena statystyczna wymagana przez przepisy normowe.

Wizje lokalne i badania wizualne konstrukcji budowlanych, zarówno eksploatowanych, jak i wyłączonych z użytkowania powinno się poprzedzić analizą zarówno dostępnej dokumentacji technicznej, jak i innych dokumentów, do których należy zaliczyć między innymi: projekty budowlane, projekty wykonawcze, projekty przeprowadzonych w przeszłości remontów albo modernizacji lub adaptacji, dzienniki budowy, książki obiektów, opinie, orzeczenia i ekspertyzy dotyczące konstrukcji. Źródłem informacji mogą być też wywiady przeprowadzone z wykonawcami konstrukcji, z jej użytkownikami i zarządcami, państwowym nadzorem budowlanym itp.

Podczas wizji lokalnych oraz badań należy zwracać uwagę na czynniki, które aktualnie nie wpływają bezpośrednio na stany graniczne nośności lub użyteczności ocenianych konstrukcji budowlanych, ale pośrednio, w dłuższym okresie mogą istotnie wpłynąć na ich bezpieczeństwo i niezawodność. Przykładami takich czynników mogą być: agresywne środowisko, brak zabezpieczeń przeciwwilgociowych, drgania przenoszące się przez podłoże.

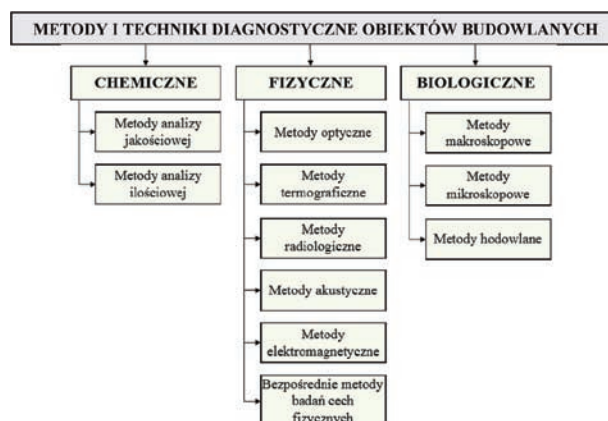
Dla bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji budowlanych oceny dokonuje się w oparciu o aktualne rzeczywiste dane obejmujące m.in.: wymiary elementów, właściwości i cechy materiałów, w tym ich wytrzymałości i jednorodności, właściwości i cechy stali zbrojeniowych, w tym ich rozmieszczenie, otulenia betonem, skorodowanie, parametry elementów prefabrykowanych, obciążenia i ich charakter, modele (schematy) pracy, odkształcenia, lokalizację uszkodzeń i wad, parametry podłoża gruntowego.

Metody i techniki diagnozowania (badania)

Rodzaje stosowanych metod i technik diagnozowania (badania) zależą w dużym stopniu od warunków i stanów technicznych diagnozowanych konstrukcji. Przyjęte metody badań powinny umożliwiać uzyskanie wyników o wymaganych dokładnościach, pozwalających na statystyczną ich ocenę i na charakteryzowanie aktualnych stanów ocenianych konstrukcji [3-5]. Podstawowe grupy metod i technik diagnozowania przedstawiono na rysunku 4 [2].

Każdej grupie metod i technik diagnostycznych przyporządkowano stosunkowo dużą liczbę technik pomiarowych (tablica 2). Określono dla tych metod obszary przydatności w badaniach geometrii, w badaniach właściwości materiałów konstrukcji, w wykrywaniu oraz identyfikacji

uszkodzeń, wraz z podaniem informacji, czy dane metody są podstawowe w rozumieniu powszechności stosowania czy uzupełniające.



Rys. 4. Podstawowe metody i techniki diagnostyczne obiektów budowlanych [2].

Fig. 4. Basic methods and diagnostic techniques of building objects [2].

Metody i techniki nieniszczące stosowane w diagnostyce obiektów o konstrukcjach żelbetonowych

W diagnostyce obiektów konstrukcji żelbetonowych istotna jest ocena wytrzymałości i jednorodności betonu. Zestawienie metod nieniszczących i seminieniszczących przydatnych do tej oceny przedstawiono, za [6], na rysunku 5.



Rys. 5. Metody nieniszczące i seminieniszczące stosowane do oceny wytrzymałości i jednorodności betonu w konstrukcjach budowlanych [6].

Fig. 5. Nondestructive and seminon-destructive methods used to assess the strength and homogeneity of concrete in building constructions [6].

Metody badawcze stosowane w laboratorium

Badania wytrzymałości betonu na ściskanie mogą być realizowane bezpośrednio na próbkach pobranych z konstrukcji albo pośrednio z wykorzystaniem metod nieniszczących, np. ultradźwiękowej [9] lub sklerometrycznej [8, 11, 12]. Szczegółowe procedury badania wytrzymałości betonu na ściskanie in situ na próbkach oraz oceny tej wytrzymałości w konstrukcji na podstawie wyniku badania próbek określa norma [10].

Procedura badania wytrzymałości betonu na próbkach pobranych z konstrukcji obejmuje: pobieranie rdzeni betonowych z konstrukcji i ich przygotowanie do badań, oznaczenie wytrzymałości na ściskanie próbek pobranych

Tab. 2. Metody i techniki pomiarowe stosowane w diagnozowaniu obiektów budowlanych.
Tab. 2. Measurement methods and techniques used in diagnosing buildings.

Metody i techniki badań	Geometria			Właściwości materiału							Uszkodzenia					
	Ukształtowanie przestrzenne	Wymiary elementów	Identyfikacja zbrojenia	Rodzaj materiału	Wytrzymałość/jednorodność	Moduł odkształcalności	Porowatość/nasiąkliwość	Mrozoodporność	Wilgotność	Skład chemiczny	Deformacje	Destrukcja materiału	Ubytki materiału	Utrata ciągliwości materiału	Zanieczyszczenia	Zmiany położenia
CZYNNIKI FIZYCZNE																
Badania wizualne	•	o		•					o		•	o	•	•	•	•
Metody geodezyjne	•	•									•		o			•
Metody laserowe	•	•									•					•
Metody termograficzne			o						o			o	o	o		
Metody radiograficzne			•									o	•	•		
Tomografia komputerowa			•									o	•	•		
Metody impulsowe		•					•	•				o	•	•		
Metody ultradźwiękowe		•					•	•				o	•	•		
Tomografia ultradźwiękowa			o									o	•	•		
Emisja akustyczna														•		
Metody magnetyczne			•													
Metody radarowe	o	o	•									o	•	•		
Metody indukcji elektromagnetycznej			•													
Pomiary potencjału elektrycznego									o			•	•			
Pomiary oporności elektrycznej									o			•	•			
Bezpośrednie pomiary geometryczne	•	•	o								•	o	•	•	•	•
Metody penetracyjne					•							o				
Metody sklerometryczne					•	o						o				
Metody badań cech fizycznych				•	•	•	•	•	•			•				
CZYNNIKI CHEMICZNE																
Metody analizy chemicznej				•						•		•			•	
CZYNNIKI BIOLOGICZNE																
Metody makroskopowe												•			•	
Metody mikroskopowe												•			•	
Oznaczenie: • – mechanizm podstawowy; o – mechanizm dodatkowy																

z konstrukcji, opracowanie zestawienia wyników badań wytrzymałości tych próbek wraz z opracowaniem raportu z badań. Z kolei procedura oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji na próbkach pobranych z konstrukcji obejmuje m.in.: obliczanie wartości średniej i odchylenia standardowego wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji, oszacowanie niepewności obliczonej wartości średniej, ocenę charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie betonu w konstrukcji.

Bezpośrednia ocena parametrów stali zbrojeniowej zazwyczaj obejmuje określenie granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, wydłużenia i w tym celu pobierane są z konstrukcji żelbetowych, z miejsc najmniej wyężonych, odcinki prętów konstrukcyjnych danego zbrojenia, które badane są następnie w laboratorium.

Spośród metod stosowanych w laboratorium najnowocześniejsza jest rentgenowska mikrotomografia komputerowa,

pozwalająca na rekonstrukcję trójwymiarowego obrazu próbki betonu pobranej z badanej konstrukcji, na podstawie dwuwymiarowych projekcji uzyskanych w trakcie jej skanowania wiązką promieni rentgenowskich. Metoda ta daje możliwość określenia wielu parametrów charakteryzujących strukturę betonu, m.in. porowatości, rozkładu porów pod względem wielkości, rozmieszczenia ziaren kruszywa, rozmieszczenia mikrouszkodzeń, rozmieszczenia zbrojenia rozproszonego, dla betonu skarbonatyzowanego również określenia wartości modułu sprężystości. Wyniki badań uzyskane tą metodą mogą być bardzo przydatne na przykład w interpretacji przyczyn powstania uszkodzeń konstrukcji.

Obciążenia próbne konstrukcji

W uzasadnionych przypadkach obciążenia próbne są stosowane do wiarygodnej oceny bezpieczeństwa i niezawodności elementów konstrukcji żelbetowych. Wykonuje się je

z reguły w sytuacji, gdy zachodzi potrzeba upewnienia się co do aktualnego stanu granicznej nośności albo stanu granicznej użyteczności elementu konstrukcyjnego, a nie można tego - z różnych przyczyn - dokonać wiarygodnie na drodze badawczej i obliczeniowej. Przyczyną tego może być na przykład pożar, któremu obiekt uległ w przeszłości. Zazwyczaj obciążenia próbne mają charakter nieniszczący i mogą być realizowane w warunkach polowych lub w laboratorium na elementach pobranych z konstrukcji.

Obciążenia próbne, ze względu na cele i sposoby prowadzenia badań, mają m.in. za zadanie [5, 13]:

- wykazanie czy elementy lub konstrukcje zostały wykonane prawidłowo i zachowują się zgodnie z założeniami projektów;
- sprawdzenie zachowania się konstrukcji pod obciążeniami projektowymi z tym, że nośności określone są na podstawie pomiaru odkształceń;
- ocenę możliwości przenoszenia obciążeń przez testowany element konstrukcyjny lub też przez inne współpracujące z nimi elementy konstrukcyjne;
- ocenę zachowania się całej konstrukcji.

W trakcie realizowanych obciążeń próbnych przedmiotem pomiarów mogą być ugięcia badanych elementów żelbetowych, szerokości rozwarcia rys lub też rozwój procesów destrukcyjnych w betonie i na styku betonu z prętami zbrojeniowymi, powodowany narastającym obciążeniem próbnym. W zależności od przedmiotu pomiaru należy dobrać odpowiednią metodę badawczą (aparaturę), zapewniającą taki pomiar. Przykładowo do „śledzenia” rozwoju ww. procesów destrukcyjnych przydatna jest metoda emisji akustycznej.

Planując obciążenia próbne żelbetowego elementu konstrukcyjnego, należy w dużej mierze polegać na własnej wiedzy inżynierskiej, gdyż brak jest szczegółowych wytycznych ustalania wartości tych obciążeń. Pewne praktyczne wskazówki w tej kwestii można znaleźć w pracach [3, 5, 13] oraz normach zagranicznych. Obciążenia próbne powinny być poprzedzone szczegółową diagnostyką elementów lub konstrukcji m. in. w zakresie: określenia charakterystyk materiałowych betonu i stali zbrojeniowej, otulenia zbrojenia betonem, ustalenia rzeczywistych wymiarów geometrycznych, rozpoznania warunków podparcia, połączenia itd.

5. Wnioski

Przedstawiona w artykule tematyka, dotycząca zasad wykonywania ocen (diagnostyk) konstrukcji budowlanych za pomocą metod nieniszczących i seminieniszczących, kwalifikuje się - zdaniem autorów - do kluczowych starań o zapewnienie należytego bezpieczeństwa, niezawodności i trwałości tych konstrukcji. Prawidłowe postępowanie diagnostyczne jest bardzo ważne, niezbędne i konieczne do należytego sporządzenia opracowania ekspertyzowego, przydatnego do celu, któremu ma służyć.

6. Literatura/References

- [1] L. Czarnecki, P. Łukowski, A. Garbacz, "Naprawa i ochrona konstrukcji z betonu. Komentarz do PN-EN 1504", Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2017.
- [2] J. Bień, "Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych", Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010.
- [3] L. Runkiewicz, "Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych. Poradnik", Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2016.
- [4] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 roku. Prawo budowlane (Dz. U. nr 89 z 1994 r. z późniejszymi zmianami).
- [5] Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk, "Diagnostyka konstrukcji żelbetowych", tom 1, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- [6] J. Hoła, K. Schabowicz, "Diagnostyka obiektów budowlanych" Materiały Budowlane, 2015, 5, 3 – 7.
- [7] L. Runkiewicz, "Badania konstrukcji żelbetowych", Biuro Gamma, Warszawa 2002.
- [8] L. Brunarski, L. Runkiewicz L, "Instrukcja stosowania metody ultradźwiękowej do nieniszczącej kontroli jakości betonu w konstrukcji", Instrukcja nr 209, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1997.
- [9] PN-EN 12504-4:2005. Badania betonu. Część 4. Oznaczanie prędkości fali ultradźwiękowej.
- [10] PN-EN 13791:2008. Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych.
- [11] L. Runkiewicz, J. Sieczkowski, "Ocena wytrzymałości betonu w konstrukcji na podstawie badań sklerometrycznych. Poradnik" Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2018.
- [12] PN-EN 12504-2:2013-03. Badania betonu w konstrukcjach. Część 2. Badania nieniszczące. Oznaczenie liczby odbicia.
- [13] B. Lewicki, "Obciążenia próbne konstrukcji istniejących budynków", Prace Naukowe Instytutu Techniki Budowlanej, ITB, Warszawa 1997.

REKLAMY NA OKŁADCE

TÜV Rheinland	1
OLYMPUS	2
TELEMOND HOLDING	3
EVEREST POLSKA	4

REKLAMY W NUMERZE

Instytut Spawalnictwa	2
CASP	12
EVEREST POLSKA	24
NDT Systems	35
TÜV SÜD Polska	52

Mickael Messaoudi*, Bruno Pouet
Sound & Bright, Los Angeles, USA

Recent development in all-optical ultrasonic shear wave inspection

Niedawne odkrycie w całkowicie optycznej ultradźwiękowej inspekcji fal poprzecznych

ABSTRACT

A laser-based technique for efficiently generating and detection ultrasonic shear-wave is described. For the detection, a new laser interferometric scheme was recently developed in order to measure the three components of the ultrasonic field. This scheme takes advantage of the large étendue achieved with interferometer based on two-wave mixing in photorefractive crystal. Detection of the out-of-plane component as well as the two orthogonal in-plane components of the surface displacement is achieved using a single laser probe beam and a single, large aperture, collecting optic combined with detector arrays. With this interferometer, all wave types can be detected. The detection of the in-plane component allows efficient detection of shear waves, particularly when the direction of ultrasound propagation is normal to the surface of inspection. However, for remote shear wave inspection, one must also be able to efficiently generate normal incidence shear waves. With laser-based generation, shear waves are mainly generated off the normal incidence. In this paper, in addition to presenting the tri-component interferometer, an improved method for normal-incidence shear wave generation is described. The combination of shear-wave LU generation with a multi-component laser receiver makes LU pulse-echo shear-wave inspection possible. Results from characterization of the receiver and of the generation are shown.

Keywords: laser ultrasound, in-plane displacement, three dimensional, directivity pattern, shear waves

STRESZCZENIE

Opisano technikę laserową do wydajnego generowania i wykrywania ultradźwiękowych fal poprzecznych. W celu detekcji opracowano nowy laserowy układ interferometryczny do pomiaru trzech składników pola ultradźwiękowego. Schemat ten wykorzystuje dużą wartość uzyskaną przy pomocy interferometru opartego na mieszaniu dwóch fal w fotorefrakcyjnym kryształ. Wykrywanie elementu poza płaszczyzną, jak również dwóch ortogonalnych elementów w płaszczyźnie przemieszczenia powierzchni, uzyskuje się za pomocą pojedynczej wiązki sondy laserowej i pojedynczej, dużej apertury, zbierającej układ optyczny połączonej z układami detektorów. Za pomocą tego interferometru można wykryć wszystkie typy fal. Wykrywanie elementu w płaszczyźnie umożliwia skuteczne wykrywanie fal poprzecznych, szczególnie gdy kierunek propagacji ultradźwięków jest normalny do powierzchni kontroli. Jednak w przypadku zdalnej inspekcji fali poprzecznej ważne jest również by móc wydajnie generować padające fale poprzeczne. W przypadku generowania laserowego fale poprzeczne są wzbudzane głównie poza normalną. W niniejszej pracy, oprócz prezentacji interferometru trójskładnikowego, opisano ulepszoną metodę generowania padających fal normalnych. Połączenie generatora LU fali padającej z wieloskładnikowym odbiornikiem laserowym umożliwia inspekcję falą poprzeczną z wykorzystaniem trybu LU pulse-echo. Przedstawiono wyniki charakterystyki odbiornika i generatora.

Słowa kluczowe: ultradźwięki wzbudzane laserowo, przesunięcie w płaszczyźnie, trójwymiarowy, wzorec kierunkowy, fale poprzeczne

1. Introduction

Conventional laser-ultrasonic inspection is based on the detection of one component of the ultrasonic field, predominantly out-of-plane displacement of the inspected surface [1], [2]. A couple years ago, we developed a two wave mixing (TWM) interferometer capable of measuring two components of the surface displacement simultaneously, using a single laser probe [3]. Recently, our technology has been extended to develop a tri-component TWM interferometer, still relying on a single laser probe and with a 20 MHz detection bandwidth. The system simultaneously detects the out-of-plane, vertical and horizontal in-plane components of the surface displacement. Measurement of the in-plane component is very useful for the detection of shear waves. When generated with a laser, the far-field directivity pattern of the shear wave shows a zero at normal incidence, for generation in both the thermoelastic and ablation regimes. This weak shear-wave generation at normal incidence is due to the laser beam symmetry. Therefore, by altering the beam geometry, the amplitude of shear waves can be increased at normal incidence.

2. Tri-component interferometer

2.1 Principle

When ultrasounds reach the surface of inspection, they induce a small phase change of the backscattered laser beam. These small phase variations are converted into intensity variation after interference with reference beam in the two wave mixing (TWM) interferometer. We take advantage of the diffuse reflection, caused by the optical roughness of the surface when the incident receiver beam hits the sample, to collect the light backscattered at various angles, using a large collecting aperture. The large collection angle of scattered light is divided in elementary angles Θ_i which information contributes to the ultrasonic field reconstruction (Fig. 1). By imaging the collecting lens onto the detector we can separate each angular contribution. Each elementary angle carries phase information of both in-plane and out-of-plane contributions. The wider the angle is, the higher the in-plane sensitivity becomes.

The depth-of-field of the incident beam is very small due to the large collecting optic. To overcome this limitation, the collecting optic is mounted on a motorized translation, which can easily adjust the distance to the sample and compensate for variation in the sample flatness during scan. The light

*Corresponding author. E-mail: mickael.messaoudi@soundnbright.com

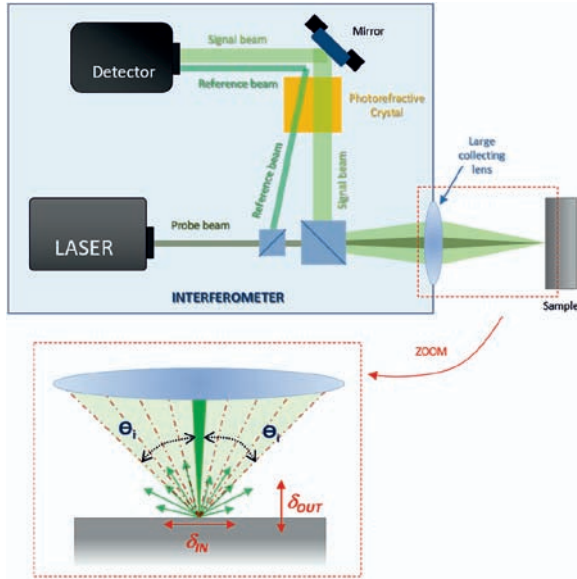


Fig. 1. Schematic of the interferometer with zoom on the reflection of single beam illumination on the sample.

Rys. 1. Schemat interferometru z powiększeniem odbicia pojedynczej wiązki na próbce.

collected by the front aperture is then separated into small angles, resulting in an $N \times N$ matrix of elements, each containing a fraction of the ultrasonic field information. A direct approach to data processing could be to decompose each of the N^2 elements but the large number of channels to process is challenging. Rather than using a N^2 matrix of photodiodes, the optical beam is divided in two: half of the collected light is focused on a vertical linear array of N elements using a vertical cylindrical lens, while the other half is focused on a horizontal linear array of N elements using a horizontal cylindrical lens. The vertical array provides information about the out-of-plane and the vertical in-plane, the horizontal array provides information about the out-of-plane and the horizontal in-plane, reducing the number of processed channels from N^2 to $2N$. Each array is composed of 16 elements. Each element of the detector array corresponds to a small area of the entrance pupil and thus corresponds to light backscattered along well defined incidence angles (Fig. 2).

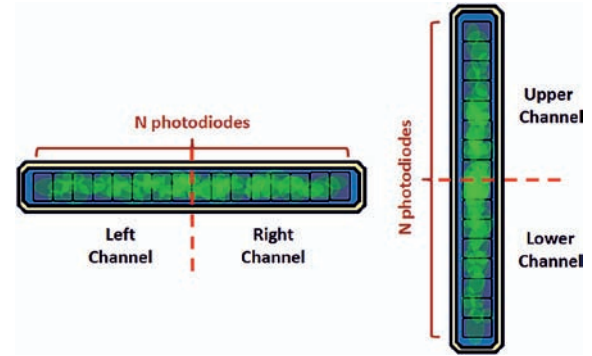


Fig. 2. Matrix $N \times N$ vs 2 linear arrays $N + N$.
Rys. 2. Macierz $N \times N$ vs 2 liniowe tablice $N + N$.

The light backscattered by the sample may not be uniformly distributed, therefore each channel must be normalized prior to calculating the two in-plane and the out-of-plane components of the surface displacement. Normalization is achieved by introducing a small, low-frequency phase change in the reference beam and using automatic gain controlled (AGC) amplifiers which monitor the low frequency signal and normalize each channels (Fig. 3). For each linear array, after amplitude normalization, the signals are processed in pairs of the same incidence angle. For each pair, the two normalized signals are added to each other in order to obtain the elementary out-of-plane component, while their subtraction yields the elementary in-plane component.

However, the contribution in the final in-plane signal of each elementary in-plane component depends on the angle. A weight is thus applied depending on the angle contribution of the in-plane as show equation (1) for the elementary in-plane and in equation (2) for the out-of-plane components.

$$I_i - I_{-i} \propto \left(\frac{4\pi\delta_{IN}}{\lambda} \right) \sin(q_i) \quad (1)$$

$$I_i + I_{-i} \propto \left(\frac{4\pi\delta_{OUT}}{\lambda} \right) \cos(q_i) \quad (2)$$

I_i is the intensity on one photodetector corresponding to the angle q_i of detection and I_{-i} its symmetric. δ_{IN} and δ_{OUT} are respectively the in-plane and out-of-plane displacement.

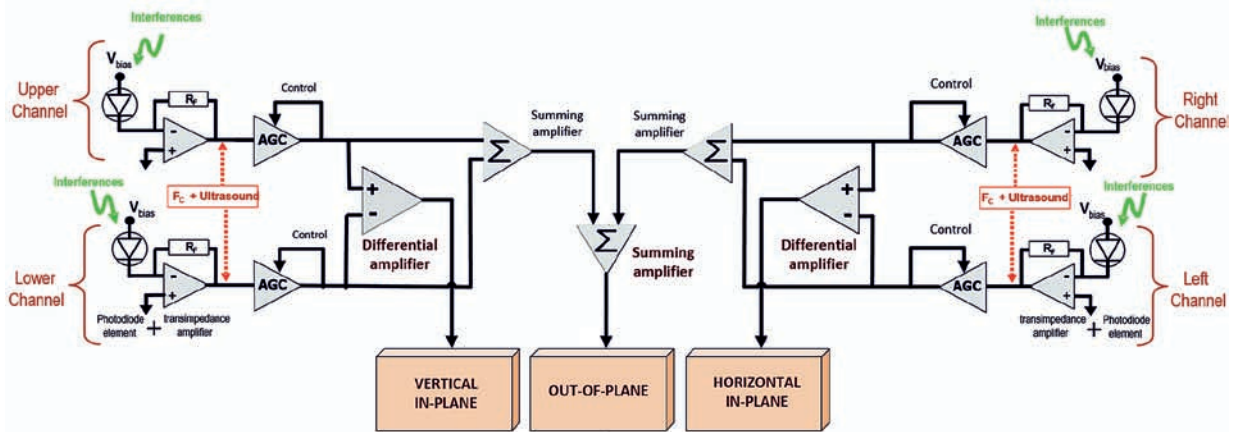


Fig. 3. Principle of the electronic demodulation circuitry.

Rys. 3. Zasada elektronicznego obwodu demodulacyjnego.

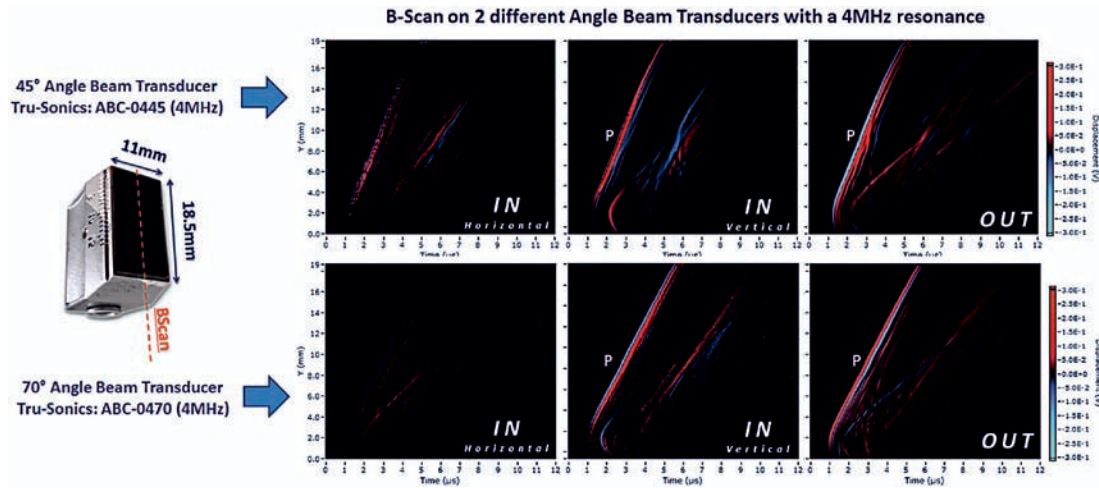


Fig. 4. B-scan results for Horizontal In-plane, Vertical In-plane and Out-of-plane measurement.

Rys. 4. B-skan dla pomiarów poziomych w płaszczyźnie, pionowych w płaszczyźnie i poza płaszczyzną.

2.2 Experimental results

Measurements were carried out using a 45° and a 70° angle beam transducers (Tru-sonics: ABC-0445 (4MHz) and Tru-sonics: ABC-0470 (4MHz)), generating compressional waves with an angle relative to the surface of inspection. In both cases, the surface was scanned along an 18.5 mm line across the transducer. The B-scan results for the three component contributions are shown in Fig. 4.

The measurements for each component were carried out with a calibration coefficient of 100mV/nm. Due to transducer geometry, the system should not detect any signal from the horizontal in-plane component. However, a very small signal is visible, probably due to the leakage of the strong out-of-plane component. A strong compressional wave is clearly visible in the vertical In-plane and Out-of-plane B-scans. Many reflected and converted wave arrivals are also visible.

3. Thermoelastic generation of shear waves

3.1 Principle

In the thermoelastic regime, the rapid absorption of the laser beam leads to a strong thermal gradient at the edge of the laser beam spot [4]. For a metal sample with a free surface, the thermal gradient induces stress which direction is parallel to the surface. Because of the source symmetry, the thermal expansion leads to a bipolar stress field (Fig. 5.a). If the symmetry of the beam is broken, the thermal expansion leads to a quasi-unipolar stress field (Fig. 5.b). In this case, the directivity of S-waves is changed and the amplitude increases at epicenter. Fig. 5c shows a simple arrangement for generating a dissymmetric thermal gradient with a very sharp edge on one side and a quasi-smooth edge on the other. The generation laser (pulsed Nd:YAG, $\lambda = 1.064 \text{ nm}$) used for the demonstration is highly-multimode and includes some hot spots. Because of the not very smooth beam profile, the generation spot (Fig. 5c) still induces a strong temperature gradient of the curved tail edge, acting as a secondary (parasitic) ultrasonic source. The ultrasonic “ghost” signal due to the curved tail edge contribution can be easily separated from the signal of interest because of its different arrival time. It must be noted that a Gaussian

beam intensity profile would be preferred as it would generate a smoother beam profile, reducing the “ghost” generation.

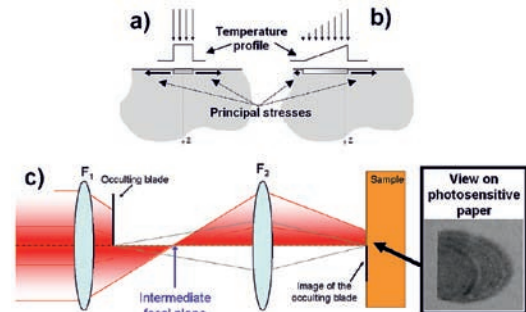


Fig. 5. Acoustic source formed by: A - a symmetrical illumination (bipolar) and B - an asymmetrical illumination (Unipolar); and C - Setup used for generating asymmetrical illumination.

Rys. 5. Źródło akustyczne utworzone przez: A - symetryczne oświetlenie (bipolarne) i B - asymetryczne oświetlenie (Unipolarne); i C - Konfiguracja używana do generowania asymetrycznego oświetlenia.

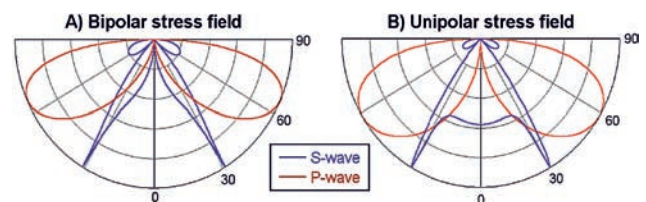


Fig. 6. Directivity for S-wave and P-wave calculated assuming: A - Bipolar stress field; B - Unipolar stress field.

Rys. 6. Kierunkowość dla fali S i P obliczona przy założeniu: A - bipolarnego pola naprężeń; B - jednobiegunowego pola naprężeń.

Fig. 6 shows the directivity patterns of P-waves and S-waves calculated using a half-cylinder of aluminum for a bipolar stress and for a unipolar stress [5]. The P-wave radiation patterns are very similar, with maximum around 60° incidence for both sources, the bipolar source being a little more directive. For both sources, the S-wave radiation patterns are at maximum near 30° incidence. As expected, the main difference is at normal incidence, where the unipolar source generates a strong S-wave and the bipolar source generates no S-wave.

3.2 Ultrasonic bulk waveforms in plates

Through-transmission measurements are carried out on an aluminum plate, 7.9 mm thick. The three orthogonal components of the surface displacement, the horizontal in-plane, the vertical in-plane and the out-of-plane were recorded over a [1MHz to 20 MHz] bandwidth (Fig. 7).

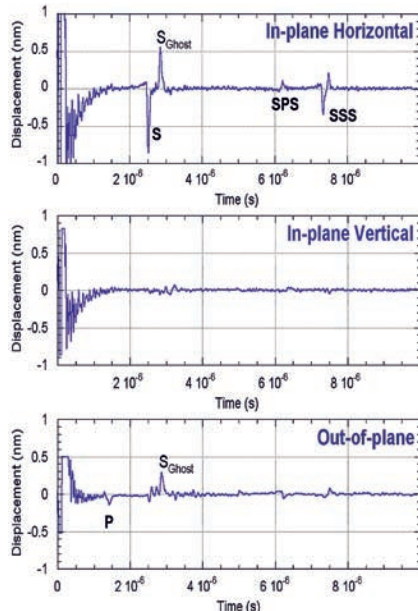


Fig. 7. The three components of the surface displacement generated by the asymmetrical source and measured at the epicenter (centered on the sharp edge).

Rys. 7. Trzy składowe przemieszczenia powierzchni generowane przez źródło asymetryczne i mierzone w epicentrum (wyśrodkowane na ostrych krawędziach).

As expected, we see a strong in-plane displacement corresponding to the on-axis S - wave arrivals. We used the following notation: S - direct transmitted S-wave, P - direct transmitted P-wave, SSS - 1st reflected S-wave (3 thicknesses) and SPS - converted wave. The in-plane displacement is mostly in the horizontal plane due to the symmetry of the source. The S-wave generated by the unipolar source corresponds to the sharp negative pulse (arriving at 2.5 μ s). The smaller and not as sharp positive pulse arriving later (at 2.85 μ s) corresponds to the parasitic effect from the curved tail edge. The amplitude of the P-wave is also very weak at the epicenter, as expected with thermoelastic generation.

Recording only the horizontal in-plane component, we carry out two B-scans by moving the detection along a line centered on the epicenter of the source (Fig. 8). The first B-scan shows the result obtained for a bipolar source by the horizontal in-plane component whereas the second one shows the result obtained for a unipolar source by the horizontal in-plane. Black color corresponds to negative displacement and white color corresponds to positive displacement. E -> indicates the position at epicenter. EG -> indicates the position centered on the curved tail edge, responsible for the "ghosts". The results are well in agreement with the bipolar and unipolar assumptions. For the unipolar source, the in-plane displacement direction does not change with the sign of the incidence angle. At the opposite, for the

bipolar source, the in-plane displacement direction depends on the sign of the incidence angle and cancels out at the epicenter. The ghost arrivals for the unipolar source, due to curved tail edge, are clearly visible.

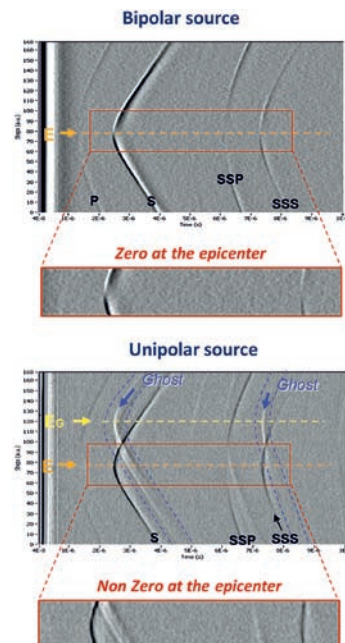


Fig. 8. Horizontal In-plane B-scans for a bipolar source and for a unipolar source after transmission through a 7.9 mm thick aluminum plate.

Rys. 8. B-skany w płaszczyźnie poziomej dla źródła dwubiegowego i źródła unipolarnego po przejściu przez płytę aluminiową o grubości 7,9 mm.

4. Conclusions

The TEMPO 3D system was proven capable of measuring three components simultaneously using a single laser probe and a single collecting optic, providing data on the ultrasonic field. We have also presented an optical arrangement for improved thermoelastic generation of shear-waves, generating strong shear waves in the direction normal to the sample surface and opening up many possibilities for remote shear-wave inspection.

5. References/Literatura

- [1] R.J. Dewhurst, Q. Shan, 'Optical remote measurement of ultrasound', Meas. Sci. Tech., 10 (11), pp.R139-R168, 1999.
- [2] Monchalin, J.-P., Optical detection of ultrasound, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control (ISSN 0885-3010), vol. UFFC-33, Sept. 1986, p. 485-499
- [3] A. Wartelle et al., "Non-destructive testing using two component/two wave mixing interferometer", AIP Conference Proceedings. Eds. Donald O. Thompson, and Dale E. Chimenti. Vol. 1335. No. 1. AIP, 2011.
- [4] B. Pouet, N. Lefaudeaux, P. Clemenceau, S. Breugnot, "Laser Ultrasonic Inspection Based on In-Plane Detection and Shear Wave Generation", 1st International Symposium on Laser Ultrasonics: Science, Technology and Applications. July 16-18 2008, Montreal, Canada
- [5] G.F. Miller and H. Pursey, 'the field and radiation impedance of mechanical radiators on a free surface of a semi-infinite isotropic solid', Proc. R. Soc. London, Ser. A 223, pp 521-541, 1954.

Sprawdzaj z najlepszymi



NDTSystem
Rok założenia firmy 1991.

01-643 Warszawa
ul. Twardowskiego 21
tel. +48 22 832 50 30
ndt-eyes@ndt-system.com.pl

AGFA Agfa
NTF Europe
GE
MAGNAFLUX
TOERSTER
LABINO
D

Magdalena Rucka*

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Badania nieniszczące i monitoring elementów konstrukcji budowlanych w warunkach laboratoryjnych

Non-destructive testing and health monitoring of structural elements in laboratory conditions

ABSTRACT

The paper presents the results of diagnostics of structural elements in laboratory conditions using the mechanical wave propagation method. The tests were carried out on a steel plate, an adhesive lap joint and a bolted flange joint. The research was focused on acquiring and recognizing damage patterns for elements with defects of known geometry and controlled failure. The laboratory tests made it possible to test the effectiveness of the analysed methods and to select diagnostic indicators.

Keywords: non-destructive testing; structural health monitoring; damage detection; wave propagation; laboratory testing

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki przykładowych badań diagnostycznych elementów konstrukcji inżynierskich w warunkach laboratoryjnych metodą propagacji fal mechanicznych. Testom poddano płytę stalową, zakładkowe połączenie klejone oraz czołowe połączenie śrubowe. Badania ukierunkowano na pozyskiwanie i rozpoznawanie wzorców uszkodzeń dla elementów i defektów o znanej geometrii oraz kontrolowanym sposobie zniszczenia. Przeprowadzone badania laboratoryjne umożliwiły przetestowanie efektywności analizowanych metod oraz wytypowanie wskaźników diagnostycznych.

Słowa kluczowe: ocena techniczna, metody nieniszczące, metody seminieniszczące

1. Wstęp

Podstawowym warunkiem bezpiecznego użytkowania obiektów infrastruktury technicznej jest efektywne wykrycie uszkodzeń na jak najwcześniejszym etapie ich rozwoju oraz wskazanie ich lokalizacji. Najprostsza metoda oceny stanu konstrukcji polega na diagnostyce wizualnej wykonywanej in-situ przez doświadczonych inżynierów. Wraz z rozwojem technik pomiarowych, rozwinęła się nowa dziedzina wiedzy, jaką jest ocena nieniszcząca (ang. non-destructive evaluation – NDE). Można ją zdefiniować jako proces oceny aktualnego stanu technicznego konstrukcji bez naruszania jej integralności [1]. Ocena nieniszcząca może być przeprowadzana na dwa sposoby: jako badania nieniszczące (ang. non-destructive testing – NDT) oraz jako monitoring techniczny konstrukcji (ang. structural health monitoring – SHM). Testowanie nieniszczące NDT polega na wykorzystaniu metodologii NDE w badaniach okresowych, stosowanych lokalnie do elementów konstrukcji w trybie offline, natomiast w zagadnieniach monitoringu konstrukcji metody NDE wykorzystywane są w trybie online.

Gwałtowny rozwój metod nieniszczących nastąpił w latach 60. XX wieku (np. [2], [3]) i był związany z postępem w konstruowaniu urządzeń pomiarowych. Istnieje wiele technik badań nieniszczących (zob. [4], [5], [6]). W budownictwie szczególne znaczenie mają metody wykorzystujące drgania konstrukcji [7], metody bazujące na propagacji fal ultradźwiękowych (np. metoda fal Lamba [8], [9], metoda

młoteczkowa [10], [11], metoda odpowiedzi na impuls [6]) oraz metody bazujące na propagacji fal elektromagnetycznych, takie jak metoda georadarowa [12], termograficzna [13] czy też radiologiczna [14]. Metody NDT są powszechnie wykorzystywane do badań konstrukcji budowlanych, np. mostowych [10], posadzek [15] czy też przemysłowych [16]. Obiekty inżynierskie o szczególnym znaczeniu (np. mosty, hale widowiskowe) są wyposażane w systemy monitoringu technicznego, za pomocą w sposób ciągły można dokonywać oceny stanu technicznego (np. [17], [18], [19], [20], [21]).

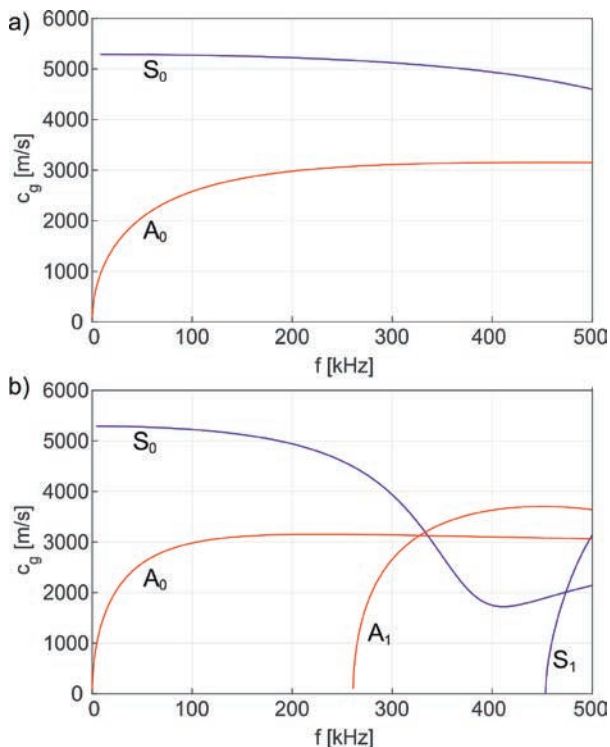
Główną trudnością w efektywnym wykorzystywaniu metod nieniszczących w diagnostyce rzeczywistych obiektów jest interpretacja danych pomiarowych. W celu sprawdzenia zakresu stosowalności danej metody oraz jej wrażliwości na rozwijające się uszkodzenie, często pierwszym krokiem jest jej przetestowanie na obiektach wzorcowych w skali laboratoryjnej. Niniejsza praca poświęcona jest przedstawieniu wybranych przykładów badań nieniszczących oraz monitorowania stanu technicznego. Testy przeprowadzono z wykorzystaniem technik propagacji fal mechanicznych na modelach konstrukcji inżynierskich w warunkach laboratoryjnej.

2. Podstawy teoretyczne metody propagacji fal mechanicznych

Fala mechaniczna jest to zaburzenie rozchodzące się w ośrodku sprężystym. W przypadku fal o częstotliwościach większych niż 20 kHz, mówimy o falach ultradźwiękowych. Fale mechaniczne w ośrodkach przestrzennie nieograniczonych mogą propagować jako podłużne

*Autor korespondencyjny. E-mail: magdalena.rucka@pg.edu.pl

i poprzeczne. W praktyce ośrodek możemy traktować jako nieograniczony, jeżeli najmniejszy wymiar elementu jest dużo mniejszy niż długość fali. Natomiast w ośrodkach przestrzennie ograniczonych w wyniku nakładania się fal podłużnych i poprzecznych powstaje nowy rodzaj fal, tzw. fale prowadzone (ang. guided waves). Mogą one propagować w prętach, płytach, powłokach, których grubość jest rzędu długości fali. Fale prowadzone są falami silnie dyspersyjnymi. Oznacza to, że prędkość ich rozchodzenia zależy od częstotliwości. Dlatego w analizie sygnałów propagujących fal ultradźwiękowych kluczowe są krzywe dyspersji, przedstawiające zależność prędkości grupowej (lub fazowej) od częstotliwości.



Rys. 1. Krzywe dyspersji modów symetrycznych i antysymetrycznych fal Lamba dla płyty stalowej o grubości 3 mm (a) oraz 6 mm (b).
Fig. 1. Dispersion curves for symmetric and antisymmetric Lamb wave modes for a steel plate with a thickness of 3 mm (a) and 6 mm (b).

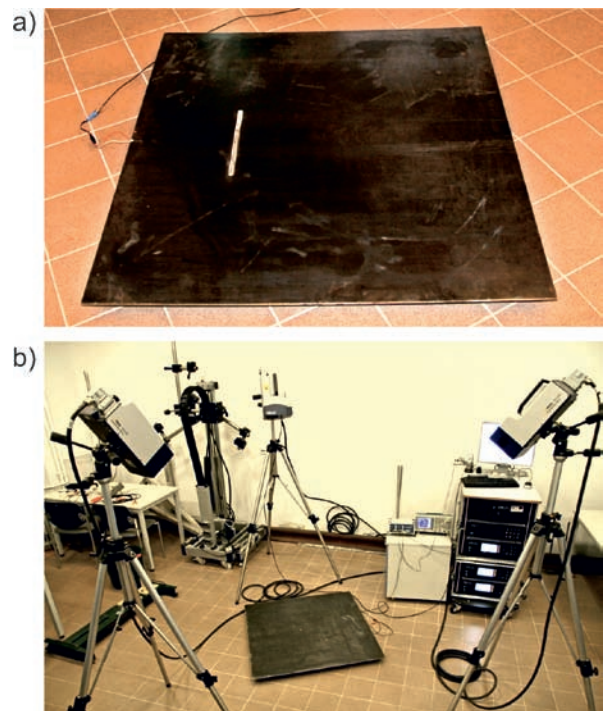
Krzywe dyspersji uzyskuje się w wyniku rozwiązania równania Pochhammera-Chree (dla prętów kołowych) lub równania Rayleigha-Lamba (dla płyt) [8]. Na rysunku 1 pokazano przykładowe krzywe dyspersji dla płyty stalowej o grubości 3 mm oraz 6 mm. Widoczne jest, że nawet dla najniższej częstotliwości mogą wystąpić dwa tryby: symetryczny (S) oraz antysymetryczny (A). W przypadku płyty o grubości 3 mm, w analizowanym zakresie do 500 kHz występują jedynie tryby podstawowe: S0 oraz A0. Wraz ze wzrostem grubości płyty, pojawiają się wyższe tryby (A1, S1). W diagnostyce konstrukcji najczęściej pożądane jest wzbudzenie wyłącznie trybów podstawowych, z uwagi na fakt, iż propagacja większej liczby trybów wiąże się ze znaczną komplikacją procesu wykrywania uszkodzeń. Na podstawie krzywych dyspersji można zatem dokonać wyboru częstotliwości wzbudzenia fali w badanym obiekcie.

3. Przykłady badań laboratoryjnych

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań doświadczalnych przeprowadzanych z wykorzystaniem metod ultradźwiękowych. Obiektami badawczymi były modele konstrukcji inżynierskich, takie jak płyta stalowa, połączenia klejone oraz połączenia śrubowe. Badania ukierunkowano na pozyskiwanie i rozpoznawanie wzorców uszkodzeń dla elementów i defektów o znanej geometrii oraz kontrolowanym sposobie zniszczenia.

3.1 Lokalizacja uszkodzeń w płycie stalowej

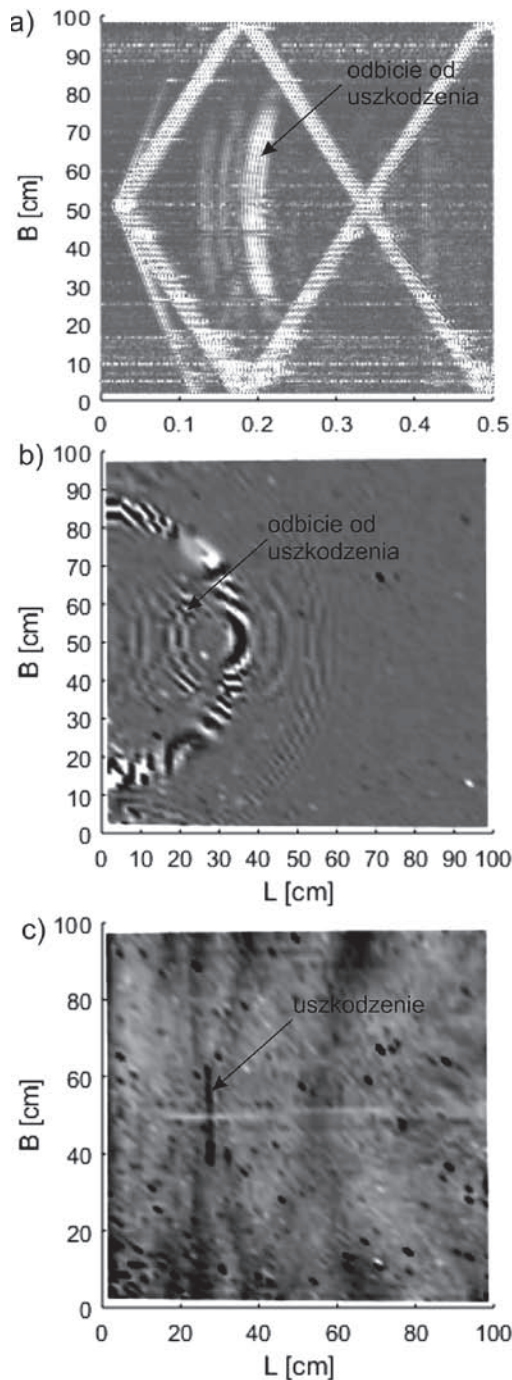
Badania przeprowadzono na płycie stalowej (rysunek 2a) o wymiarach 100 cm x 100 cm i grubości 5 mm, w której wycięto uszkodzenie o wymiarach 25 cm x 1,25 cm i głębokości 2,5 mm [9]. Do wzbudzenia fal użyto aktuator piezoelektryczny Noliac CMAP11. Wymuszenie w postaci paczki falowej o 5 cyklach sinusoidy częstotliwości 200 kHz modulowanej oknem Hanninga przyjęto jako prostopadłe do powierzchni płyty w celu wzbudzenia głównie trybu antysymetrycznego A0 i zminimalizowania wpływu trybu S0. Pomiar propagacji fal wykonano wibrometrem laserowym skanującym Polytec PSV-3D-400-M (rysunek 2b) w dwóch ustawieniach. W pierwszym z nich mierzono sygnały wzdłuż pionowej linii umieszczonej przy lewej krawędzi płyty (161 punktów pomiarowych), natomiast w drugim – na całej powierzchni płyty (65x65 punktów pomiarowych).



Rys. 2. Badana płyta stalowa z uszkodzeniem (a) oraz stanowisko pomiarowe (b).

Fig. 2. Tested steel plate with defect (a) and experimental setup (b).

Wyniki pomiarów pokazane są na rysunku 3. Analizując skan liniowy (rysunek 3a), można dostrzec wyraźne odbicie od uszkodzenia. Odbicie zawiera czoła dwóch fal, tj. propagujących z niższą prędkością tryb A0 (dominujący) oraz z wyższą prędkością tryb S0. Bazując na danych prędkości



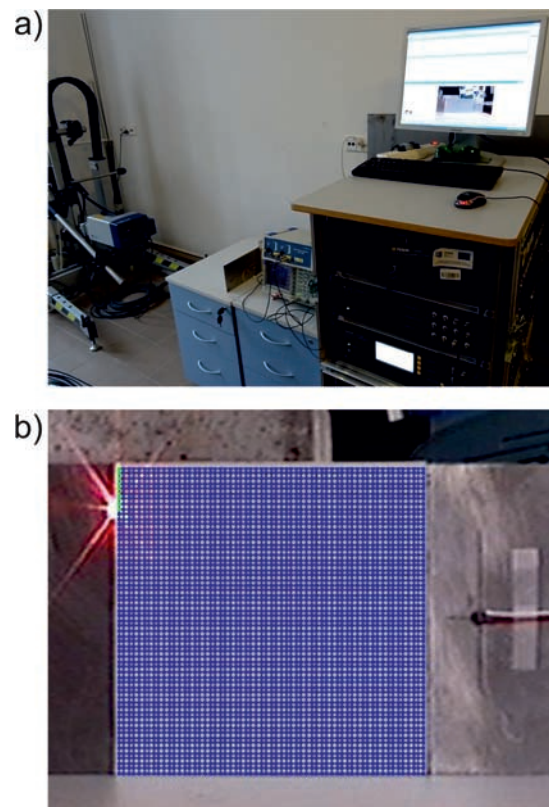
Rys. 3. Zobrazowanie uszkodzenia w płycie stalowej w postaci planu czasowo-przestrzennego (a), pola fal sprężystych dla $t = 0,12$ ms (b) oraz ważonej średniej kwadratowej (c).
Fig. 3. Damage identification in steel plate in the form time-position plane (a), guided wavefield at $t = 0.12$ ms (b) and weighted mean root square (c).

grupowej fali oraz czasie odbicia, możliwe jest określenie położenia defektu w stosunku do lewej krawędzi. Dodatkowo z obserwacji planu czasowo-przestrzennego możliwe jest oszacowanie długości uszkodzenia na podstawie rozmiaru fali odbitej. Na rysunku 3b widoczne jest pole fal sprężystych (tj. dwuwymiarowy obraz konstrukcji) w wybranej chwili czasowej ($t = 0,12$ ms). Na podstawie czoła fali propagującej i odbitej można zidentyfikować miejsce położenia uszkodzenia. Najlepsze zobrazowanie lokalizacji i rozmiarów defektu

uzyskano za pomocą ważonej średniej kwadratowej (rysunek 3c) obliczonej dla 4225 sygnałów pomierzonych na całej powierzchni płyty.

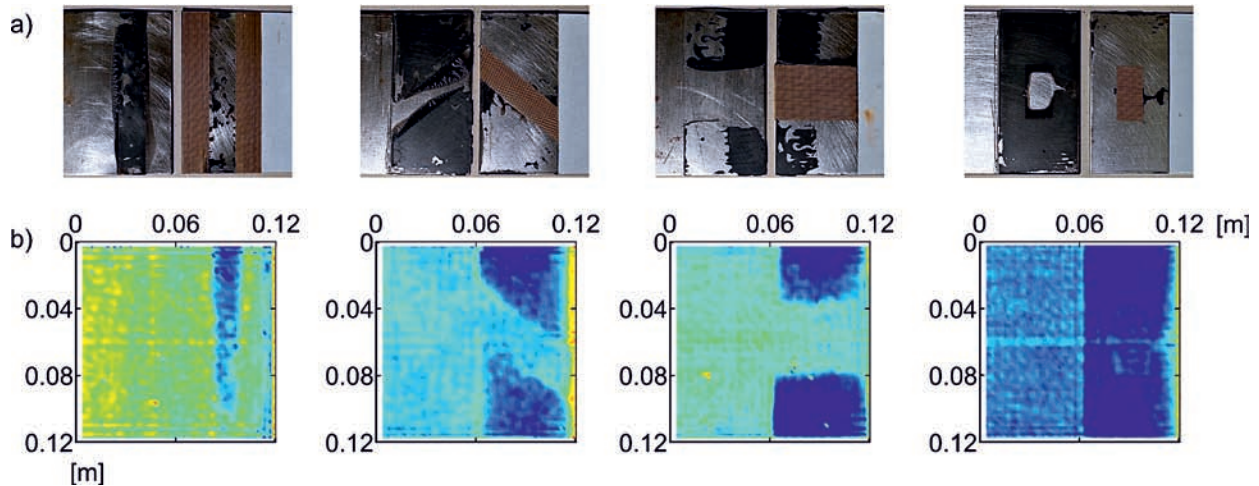
3.2 Lokalizacja uszkodzeń w połączeniu klejowym dwóch blach

Przedmiotem badań było zakładkowe połączenie dwóch blach stalowych o wymiarach 12 cm x 27 cm i grubości 3 mm [22]. Blachy zostały połączone na długości 6 cm przy użyciu kleju epoksydowego Loctite EA 9461. Badanie polegało na wzbudzeniu fal Lamba za pomocą przetwornika piezoelektrycznego Noliac NAC2024 oraz pomiarze sygnałów w punktach rozłożonych na powierzchni złącza za pomocą laserowego wibrometru skanującego PSV-3D-400-M. Wzbudzenie miało postać paczki falowej o 5 cyklach i częstotliwości 200 kHz. Stanowisko pomiarowe oraz widok na próbkę przez kamerę wibrometru pokazano na rysunku 4. Badaniom poddano złącza z różnymi wariantami uszkodzenia wprowadzonego w postaci braku kleju na zadanych powierzchniach. W miejscach planowanych defektów na jednej z blach przyklejono taśmę teflonową (rysunek 5a).



Rys. 4. Stanowisko pomiarowe (a) oraz widok na próbkę przez kamerę wibrometru (b).
Fig. 4. Experimental setup (a) and view of the sample through a vibrometer camera (b).

Pomierzone sygnały poddano przetwarzaniu z użyciem ważonej średniej kwadratowej. Wartości średniej kwadratowej uzyskane w obszarach defektów mają wartości zbliżone do pojedynczej płyty, co świadczy o braku kontaktu między blachami w tych miejscach. Na podstawie analizy uzyskanych map (rysunek 5b) możliwe było zidentyfikowanie zarówno położenia, jak i rozmiarów defektów.



Rys. 5. Fotografie badanych próbek po otwarciu blach (a) oraz mapy uszkodzeń wskazujące położenie defektów (b).
Fig. 5. Photographs of tested specimens after separation (a) and damage maps indicating localization of defects (b).

3.3 Monitorowanie siły sprężającej w połączeniu czołowym

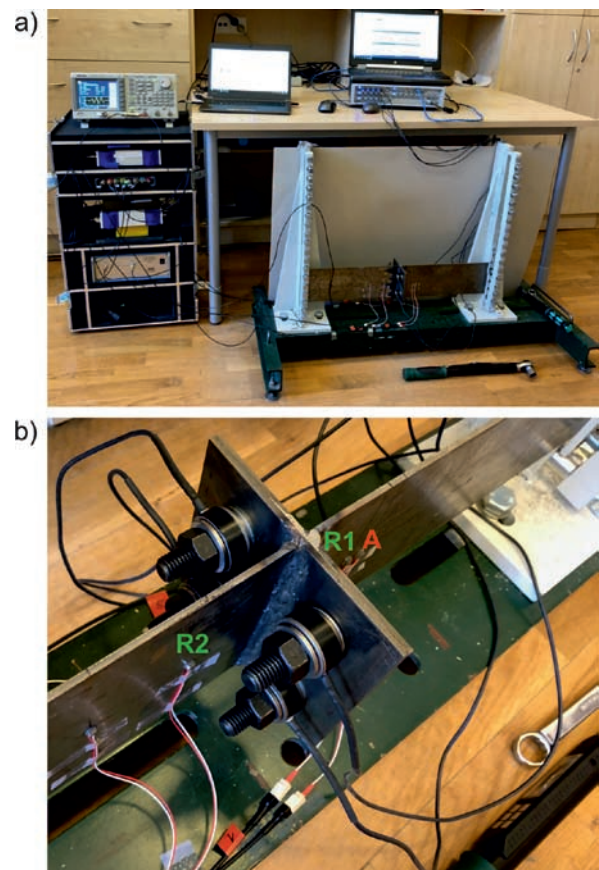
Testom poddano złącze czołowe składające się z dwóch płaskowników o wymiarach 12 cm x 24 cm i grubości 3 mm oraz dospawanych do nich blach doczołowych o wymiarach 12 cm x 12 cm. Blachy doczołowe połączone ze sobą przy użyciu czterech śrub klasy 10.9 o średnicy 12 mm. Śruby zostały sprężone za pomocą klucza dynamometrycznego. Do pomiaru siły sprężającej w każdej ze śrub użyto czujnik siły PCB model 054212-01084. Na rysunku 6 pokazano stanowisko pomiarowe. Do wzbudzenia i pomiaru fal Lamba użyto przetworniki piezoelektryczne Noliac NAC2024 (A – akuator, R1 oraz R2 – odbiorniki zamocowane po obu stronach połączenia). Wzbudzenie przyjęto jako paczkę falową o 5 cyklach i częstotliwości 100 kHz.

W trakcie eksperymentu stopniowo zwiększano wartość momentu dokręcającego, powodując wzrost siły sprężającej. Dla poszczególnych wartości siły dokonywano pomiarów fal Lamba. Następnie obliczono wartość energii dla każdego z sygnałów. Na rysunku 7 zobrazowano rozkład energii w zależności od siły w śrubie. Na podstawie analizy wyników stwierdzono, że wartość energii na odbiorniku R1 maleje wraz ze wzrostem wartości siły. Spowodowane jest to faktem, iż wraz ze wzrostem siły sprężającej, większa część energii sygnału jest transmitowana do drugiej części połączenia. Odwrotną zależność zaobserwowano dla odbiornika R2. W tym przypadku, wraz ze wzrostem wartości siły sprężającej, następował wzrost energii sygnału rejestrowanego po drugiej stronie połączenia.

3.4 Monitorowanie rozwoju uszkodzeń w połączeniu klejonym

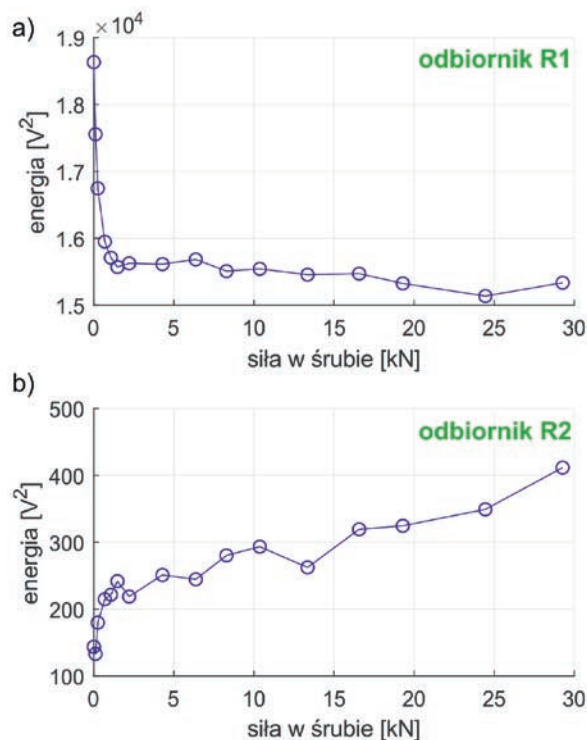
Doświadczenie przeprowadzono na klejonym połączeniu dwóch blach stalowych o wymiarach 12 cm x 27 cm i grubości 3 mm. Celem badania był monitoring połączenia (przeprowadzony w trybie ciągłym) poddanego degradacji mechanicznej. Próbkę została umieszczona w maszynie wytrzymałościowej Zwick Roell Z100 i rozciągana z prędkością 2 mm/min, aż do zerwania spoiny klejonej. Stanowisko pomiarowe oraz rozmieszczenie punktów pomiarowych

pokazano na rysunku 8. W trakcie rozciągania, fale ultradźwiękowe były automatycznie wyzwalane i zapisywane co 1 s. Łącznie pomierzono 180 sygnałów.

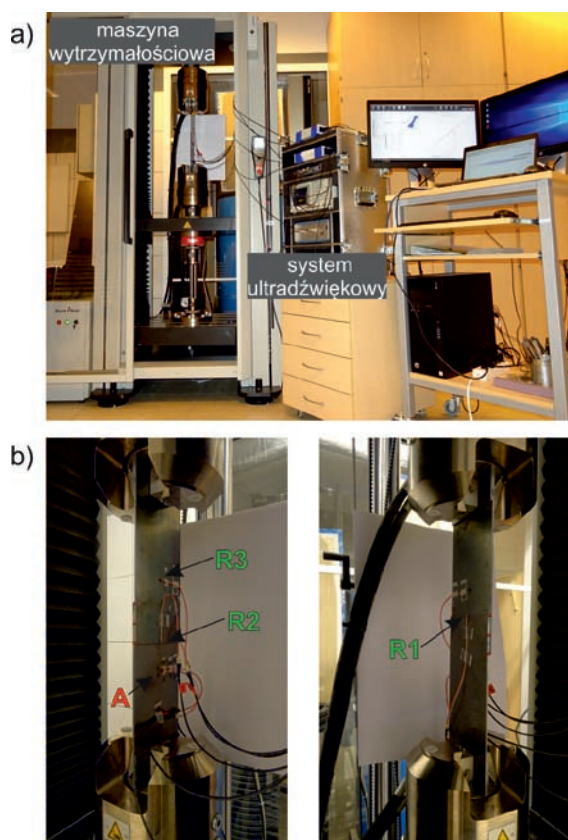


Rys. 6. Stanowisko pomiarowe (a) oraz lokalizacja punktów pomiarowych (b) w śrubowym połączeniu czołowym.
Fig. 6. Experimental setup (a) localization of measurement points (b) in bolted flange joint.

Na rysunku 9 zobrazowano wyniki przeprowadzonego doświadczenia. Relacja siła-czas uzyskana z maszyny wytrzymałościowej (rysunek 9a) ma charakter quasi-liniowy. W celu sprawdzenia, czy nie występują w niej lokalne nieciągłości, sygnał ten poddano transformacie falkowej.

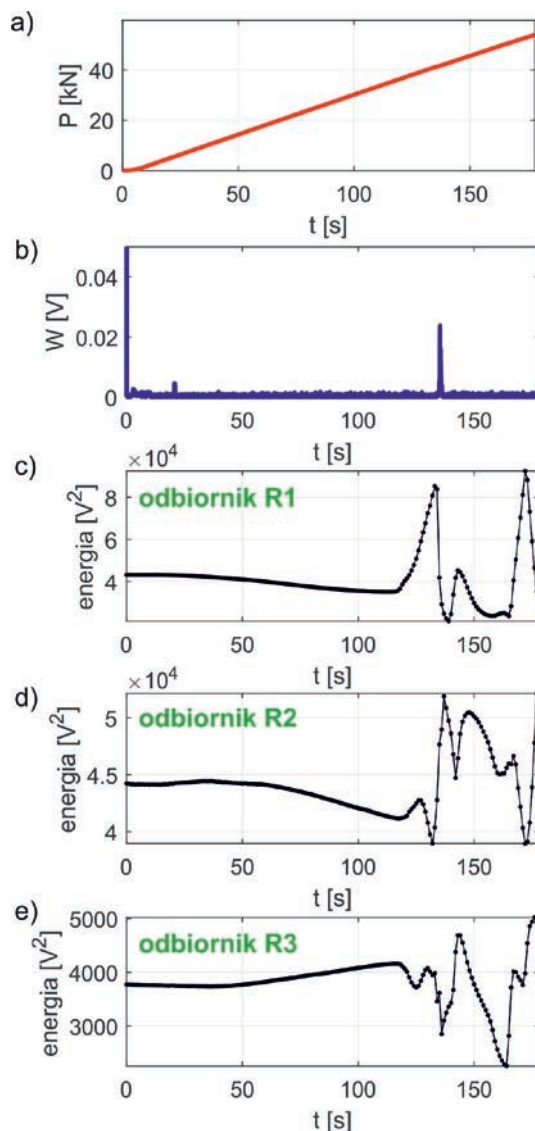


Rys. 7. Energia sygnałów zarejestrowana podczas monitoringu siły sprężającej przez odbiornik R1 (a) oraz R2 (b).
Fig. 7. Signal energy recorded during the monitoring of the pre-tension force by receiver R1 (a) and R2 (b).



Rys. 8. Stanowisko pomiarowe (a) oraz lokalizacja punktów pomiarowych (b) w klejonym połączeniu zakładkowym.
Fig. 8. Experimental setup (a) localization of measurement points (b) in adhesive lap joint.

Stwierdzono, że w wyniku otrzymano dwa piki wskazujące na czas wystąpienia dwóch zjawisk powodujących lokalny skok w relacji siła-czas (rysunek 9b). Pierwszy z nich, na początku procesu rozciągania, związany jest z poślizgiem próbki w szczękach maszyny, natomiast drugi z uszkodzeniem próbki. Na rysunkach 9c-e pokazano energię sygnałów zarejestrowanych przez poszczególne odbiorniki. Można zaobserwować, że na początku procesu degradacji wartość energii utrzymuje się na zbliżonym poziomie. Po wystąpieniu pierwszego pęknięcia w próbce, zaobserwowano skok, a następnie gwałtowne zmiany energii aż do rozerwania połączenia.



Rys. 9. Zależność siła-czas (a), współczynnik transformaty falkowej (b) oraz energia sygnału zarejestrowana podczas monitoringu połączenia klejonego przez odbiornik R1 (c), R2 (d) oraz R3 (e).
Fig. 9. Force-time relation (a), wavelet transform coefficient (b) and signal energy recorded during the monitoring of the adhesive joint by receiver R1 (c), R2 (d) and R3 (e).

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki przykładowych badań nieniszczących oraz monitoringu obiektów testowych warunkach laboratoryjnych. W rezultacie przeprowadzonych

badan stwierdzono, że pomiar sygnałów fal Lamba na powierzchni obiektu oraz ich dalsze przetwarzanie przy użyciu ważonej średniej kwadratowej umożliwiają identyfikację zarówno lokalizacji, jak i rozmiaru uszkodzenia. Analizując dane z monitoringu, zaobserwowano, że zmiany energii sygnałów fal Lamba mogą skutecznie wskazywać na wzrost lub spadek siły sprężającej oraz rozwój uszkodzeń. Przeprowadzone badania laboratoryjne umożliwiły przetestowanie efektywności analizowanych metod oraz wytypowanie wskaźników diagnostycznych.

Podziękowania

Praca została wykonana w ramach projektu nr 2015/19/B/ST8/00779, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

5. Literatura/References

- [1] D. Adams, *Health Monitoring of Structural Materials and Components: Methods with Applications*. John Wiley & Sons, 2007.
- [2] D. C. Worlton, "Experimental confirmation of Lamb waves at megacycle frequencies," *J. Appl. Phys.*, vol. 32(6), pp. 967–971, 1961.
- [3] L. Brunarski, J. Basin, and R. Makarow, "Określenie jakości betonu w konstrukcjach przy zastosowaniu kompleksowej metody ultradźwiękowo-radiologicznej," *Przegląd Bud.*, vol. 3, pp. 373–376, 1960.
- [4] L. Runkiewicz, "Application of non-destructive testing methods to assess properties of construction materials in building diagnostics," *Archit. Civ. Eng. Environ.*, no. 2, pp. 79–86, 2009.
- [5] Ł. Drobiec, R. Jasiński, and A. Piekarczyk, *Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2010.
- [6] J. Hoła and K. Schabowicz, "State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 5–18, 2010.
- [7] M. Rucka and K. Wilde, "Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beams and plates," *J. Sound Vib.*, vol. 297, no. 3–5, pp. 536–550, 2006.
- [8] J. L. Rose, *Ultrasonic Guided Waves in Solid Media*. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [9] M. Rucka, *Guided Wave Propagation in Structures. Modelling, Experimental Studies and Application to Damage Detection*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2011.
- [10] M. Rucka and K. Wilde, "Non-destructive diagnostics of concrete cantilever beam and slab by impact echo method," *Diagnostyka*, vol. 3, no. 55, pp. 63–68, 2010.
- [11] A. Garbacz, T. Piotrowski, L. Courard, and L. Kwaśniewski, "On the evaluation of interface quality in concrete repair system by means of impact-echo signal analysis," *Constr. Build. Mater.*, vol. 134, pp. 311–323, 2017.
- [12] J. Lachowicz and M. Rucka, "3-D finite-difference time-domain modelling of ground penetrating radar for identification of rebars in complex reinforced concrete structures," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 18, pp. 1228–1240, 2018.
- [13] A. Katunin, "A concept of thermographic method for non-destructive testing of polymeric composite structures using self-heating effect," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 1, 2018.
- [14] K. Schabowicz, Z. Ranachowski, D. Józwiak-Niedźwiedzka, Ł. Radzik, S. Kudela, and T. Dvorak, "Application of X-ray microtomography to quality assessment of fibre cement boards," *Constr. Build. Mater.*, vol. 110, pp. 182–188, 2016.
- [15] J. Hoła, Ł. Sadowski, and K. Schabowicz, "Nondestructive identification of delaminations in concrete floor toppings with acoustic methods," *Autom. Constr.*, vol. 20, no. 7, pp. 799–807, 2011.
- [16] Ł. Drobiec, "Diagnostyka konstrukcji przemysłowych," *Mater. Bud.*, vol. 2, pp. 32–34, 2015.
- [17] K. Wilde et al., "System ciągłej obserwacji stanu technicznego hali 'Olivia' w Gdańsku," *Inżynieria i Bud.*, vol. 10, pp. 552–556, 2009.
- [18] M. T. Yarnold and F. L. Moon, "Temperature-based structural health monitoring baseline for long-span bridges," *Eng. Struct.*, vol. 86, pp. 157–167, 2015.
- [19] M. Miskiewicz, L. Pyrzowski, J. Chroscielewski, and K. Wilde, "Structural Health Monitoring of Composite Shell Footbridge for Its Design Validation," in *2016 Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics)*, 2016, pp. 228–233.
- [20] M. Miśkiewicz, Ł. Pyrzowski, K. Wilde, and O. Mitrosz, "Technical Monitoring System for a New Part of Gdańsk Deepwater Container Terminal," *Polish Marit. Res.*, vol. 24, no. s1, pp. 149–155, 2017.
- [21] R. Xi, W. Jiang, X. Meng, H. Chen, and Q. Chen, "Bridge monitoring using BDS-RTK and GPS-RTK techniques," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 120, pp. 128–139, 2018.
- [22] M. Rucka, E. Wojtczak, and J. Lachowicz, "Damage imaging in Lamb wave-based inspection of adhesive joints," *Appl. Sci.*, vol. 8, pp. 1–9, 2018.

P. Rioux*, F. Lachance, D. Giguère, J. Turcotte
Sonatest, Québec, Canada

Novel imaging techniques for defects characterisation in Phased Array inspection

Nowe techniki obrazowania dla charakteryzacji wad w badaniach Phased Array

ABSTRACT

Phased Array ultrasonic testing has demonstrated over the years that it has many advantages compared to conventional techniques: fast, reliable, with higher resolution and sensitivity. While it took time to catch up in the field, it is now widely considered as the go-to technique for complex inspections. At the same time, technology has continued to evolve, thus increasing the possibilities of ultrasonic NDT techniques. Due to increased computing power and better capability to manage large data sets of the new generation ultrasonic equipment, advanced imaging techniques like TFM are now available. Unfortunately, these techniques are not yet recognized by standards and can't be used alone during the critical inspection. On the other hand, they can be a big help in improving defects characterisation when used in conjunction with standards-approved methods. In this paper, we will demonstrate that the combination of Phased Array inspection with advanced imaging techniques, can enhance the defects characterisation process for common applications of ultrasonic testing.

Keywords: *ultrasound testing (UT); phased array (PA); sizing; full matrix capture (FMC); Total Focusing Method (TFM)*

STRESZCZENIE

Badania ultradźwiękowe Phased Array wykazały się przez lata wieloma zaletami w porównaniu do konwencjonalnych technik w tym: szybkością, niezawodnością, wyższą rozdzielczością i czułością. O ile zajęło to trochę czasu, aby stała się metodą adekwatną do badań prowadzonych w terenie, obecnie jest powszechnie uważana za technikę kompleksowych inspekcji. W tym samym czasie technologia ta nadal była rozwijana, skutkując zwiększeniem możliwości ultradźwiękowych technik NDT. Zwiększona moc obliczeniowa i lepsze możliwości zarządzania dużymi zbiorami danych uzyskanymi za pomocą urządzeń ultradźwiękowych nowej generacji wpłynęły na udostępnienie zaawansowanych technik obrazowania, takich jak TFM. Niestety, techniki te nie są jeszcze rozpoznawane przez normy i nie mogą być używane samodzielnie podczas krytycznych inspekcji. Z drugiej strony mogą być bardzo pomocne w poprawie charakterystyki wskazań w połączeniu z metodami zatwierdzonymi przez normy. W tym artykule pokażemy, że połączenie kontroli Phased Array z zaawansowanymi technikami obrazowania może poprawić charakterystykę wskazań dla typowych zastosowań badań ultradźwiękowych.

Słowa kluczowe: *badanie ultradźwiękowe (UT); phased array (PA); wymiarowanie; pełne przechwytywanie macierzy (FMC); metoda pełnego ogniskowania (TFM)*

1. Introduction

While the phased array ultrasonic equipment has not changed a lot in the past few years, the software advances on signal processing have had breakthroughs. One of the last improvements in the NDT world is the full matrix capture (FMC) and total focusing method (TFM). A new generation of portable devices equipped with these features has followed the industrial systems.

The FMC is the ultrasonic acquisition of the area and the TFM applies an algorithm on this acquisition to create an image, where each pixel is a sum of the resulting delays at every coordinate. With this technique, the ultrasonic emission only requires one element, but all elements contribute to the reception. This enhances the focusing capability and the extracted images can show different travel paths and velocities. These transmitted and received patterns are referred to as modes.

The NDT community is currently trying to standardise this new approach which has advantages and disadvantages compared to phased array.

This paper compares the two techniques and shows how they can become complementary to enhance inspection results where applicable.

2. Basic Principles

2.1 Phased Array

Phased array ultrasonic is based on real A-scans; the amplitude along the propagating beam is predictable according to the laws of physics. The ray tracing area is simple but usually part of a mandatory inspection plan. The UT data recorded will remain the same unless the inspector changes the gain or some other filtering effects. Once a beam inside a phased array scan is generated, this A-scan is defined by the same properties (aperture, frequency, and focal distance) as conventional UT. The criteria of calibration and rejection of this technique are more or less an adaptation of the conventional UT. It is now widespread across the NDT world as the go-to ultrasound technique for complex inspections.

2.2 FMC / TFM

For the full matrix capture (FMC) technique, the raw A-scan data is collected by using a single element as transmitter and all elements as receivers [1]. The TFM imagery is based on coloured pixel representations of a specific area inside the part [2]. This image is based on huge matrices of ultrasonic A-scan obtained through the FMC acquisition process. The TFM result is an image that is not necessarily predictable according to conventional ultrasonic physics. By itself, it does not have the signal information once generated.

*Corresponding author. E-mail: sales@sonatest.com

However, different image outputs could be extracted from the FMC depending on the chosen analysis mode: longitudinal to longitudinal waves (L-L), longitudinal to transversal waves (L-T), longitudinal to transversal to transversal waves (L-T-T) or simply a suite of transversal waves (T-T and T-T-T). The amplitude and delay of the A-scans are summed, on an X-Y coordinate (with a given resolution), and the colour signature indicates a "presence" regardless of its direction or amplitude. Also, the extracted image would be focused in every point, and because of that, the sizing accuracy should be better compared to a single focusing point, while using the same phased array transducer. While calibration and rejection criteria are not yet defined by standards for these techniques, being able to stock all the FMC A-scans during the acquisition should allow the TFM image to be analyzed on different modes. For example, one of the main advantages of stocking this raw FMC information is that a TFM image can be altered afterwards using different processing tools while the FMC information remains unchanged.

The first section of the paper shows the results comparing a standard linear scan at a 0 degree longitudinal wave (L-wave) with an FMC where L-L TFM images are computed. The second section of the paper shows the results comparing a standard sectorial scan transversal wave (S-wave) with an FMC where T-T-T-T TFM images are computed.

3. Results – Phased Array Linear Scan & TFM

For this section, the phased array linear scan data has been recorded at the same time as the FMC data using the multiscan function of the Sonatest Veo+ instrument. All the phased array linear and TFM imaging data analysis have been performed using Sonatest UTstudio+ software (TFM images are computed over 32 x 32 and 64 x 64 FMC apertures).

3.1 Instrument Sensitivity

To begin with, Figure 1 shows amplitude measurements of A-scans extracted from a linear pulse echo (PE) phased array setup (L-scan) and TFM images. The extracted A-scans from the phased array setup have been generated using active apertures of 1, 8, and 16 elements. Six reference holes have been used for the measurement. Diameters are ranging from 2.38 mm SDH at 80% FSH to 0.4 mm SDH. For every acquisition, the signal from the reflector was brought to 80% FSH. For the FMC acquisition, the TFM image is from an L-L mode algorithm, and the amplitude value was taken from the binary digital pixel value, which was converted into the full digital scale of the 16-bit ADC (analogue digital converter) of the equipment and then normalised to 80% FSH.

Figure 1 illustrates four necessary gains in dB: three PE phased array data sets (1, 8, and 16 active elements) and a TFM image, to bring the corresponding SDH to 80% FSH. As one could have expected, the TFM image requires higher gain to bring the defects to the desired amplitude. Figure 2 shows results over the 0.4 mm.

Generally speaking, for the phased array images, the more elements used for the acquisition, the less amplification is needed; as the laws of physics would predict. The principal

advantage of using an aperture of many elements with phased array is the noise reduction; there is an average improvement of 24 dB using an aperture of 16 instead of 1 elements. This is mainly because the more elements are used, the more energy is transmitted into the part for one acquisition.

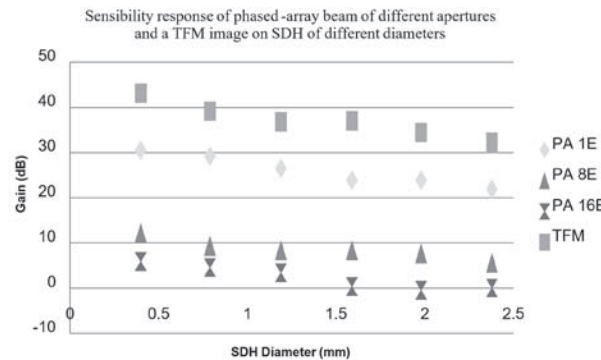


Fig. 1. Necessary gain on ASTM block to get SDH from 0.4 mm to 2.4 mm at 80% FSH.

Rys. 1. Konieczne wzmacnienie na wzorcu ASTM by uzyskać SDH od 0,4 mm do 2,4 mm przy 80% FSH.

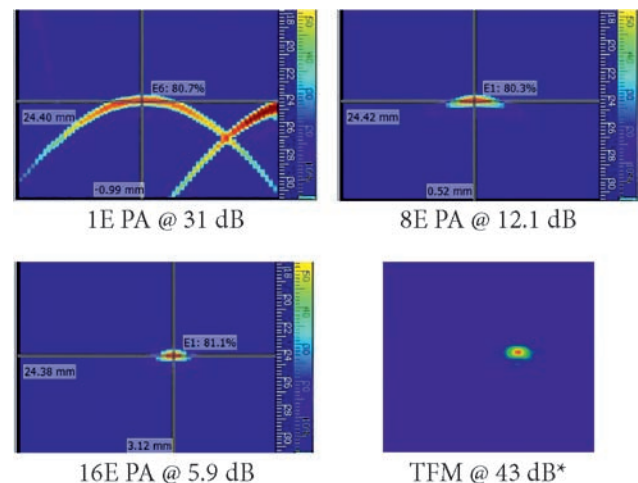


Fig. 2. Sensitivity of a 0.4mm SDH, according to the compared techniques. *Reference to the sampled image peak value then converted into FSH and dB.

Rys. 2. Czułość dla SDH 0,4 mm, zgodnie z porównanymi technikami. * Odniesienie do wartości szczytowej obrazu próbkowanego, następnie przekształcone w FSH i dB

For the TFM image on the right of Figure 2, the FMC acquisition was produced with the same gain as the 1 element phased array scan (31 dB) and an equivalent gain of 43 dB was found. The colour palette of the TFM image is set automatically using an equivalent palette as standard phased array. Interestingly, even if the equivalent gain used for the TFM image is higher (43 dB) compare to PA (31 dB), the signal-to-noise ratio of the TFM image is much better than the 1 element phased array scan. This signal-to-noise ratio enhancement can also be observed besides the SDH compared to other images (8E and 16E phased array) as seen in Figure 2. The total focusing effects of TFM enhance the signal and build the image by positive interference. Since the UT noise is everywhere and random, its contribution is destroyed by the algorithm and significantly reduced in the TFM images.

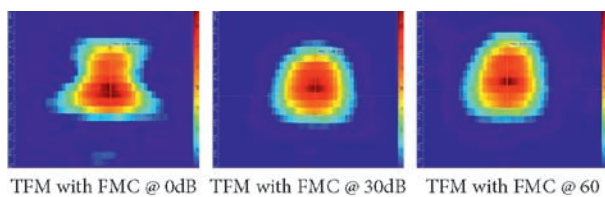


Fig. 3. Sensitivity of a 0.4mm SDH, according to the FMC gain sensitivity.

Rys. 3. Czułość dla SDH 0,4 mm w odniesieniu do czułości wzmacnienia FMC.

Another advantage, derived from the positive interference technique applied in the TFM solution, is that instrument gain applied during the FMC acquisition is far less critical for sizing a defect when compared to phased array. While computing the TFM images over a defective zone, the maximum will be automatically normalised to 100% FSH. Then the user can compensate using software gain with minimal impact on induced noise, regardless of the original instrument gain sensitivity setting. These low noise and high resolution TFM images are possible because the selected instrument, the Sonatest Veo+, records over 16-bit and has a very low noise chain of acquisition. On Figure 3, TFM images of the same SDH have been computed from FMC acquisitions done at three different gain levels to show this behaviour, i.e. that over a 60 dB gain span for FMC acquisition, the same 0.4 mm SDH can be characterised using the TFM algorithm.

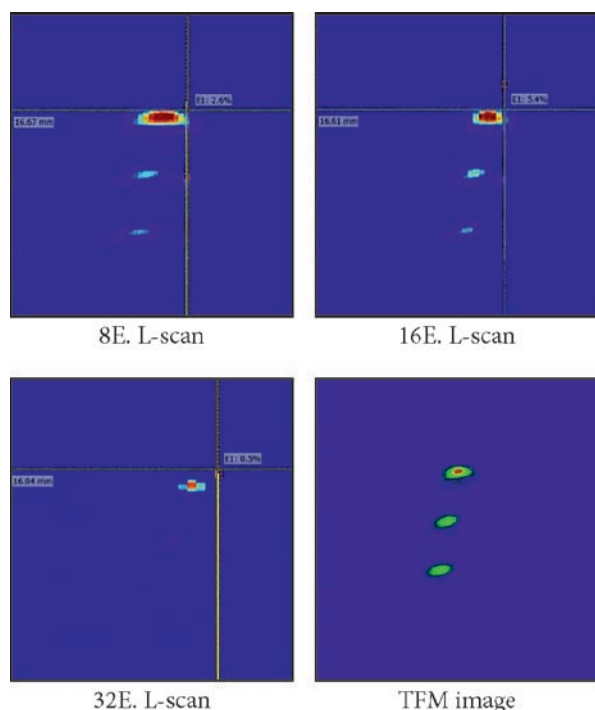


Fig. 4. AWS resolution block with three SDH vertically aligned.

Rys. 4. Wzorec rozdzielczości AWS z trzema SDH ułożonymi w pionie.

3.2 Sizing Capabilities

Because of the total focusing advantage, the TFM shows an advantage that can be used to help size critical indications. The AWS resolution block has been selected for the next demonstration because it has three SDHs close to one

another. The diameter of the SDH is 1.5 mm, and the distance between each of them is 4 mm. Figure 4 compares the linear scan phased array and TFM techniques from the same probe position and SDHs:

For the linear scan, the focal distance was set on the first SDH, and the results show the presence of the three SDHs but the first hole is getting smaller and the beam divergence after the focal point increases as the number of active elements increases. Indeed, the 32 elements aperture (0.8 mm pitch) configuration, hardly shows the last SDH because of that phenomenon but the SDHs can be detected via the other more common linear scanning configurations (16E and 8E). From those results, it is however observed that properties like the number of elements per focal law and the focusing depth, if not properly understood by the user, can affect sizing capabilities of the second and third SDHs. With the FMC acquisition and subsequent TFM imaging, one can successfully size all three SDHs with more precision, even if the amplitude is also lower on second and third SDHs (there is no TCG option in TFM imaging). It also shows that this technique is again less dependant on the scan or probe properties.

3.3 Probe Resolution Parameters

The spatial resolution in the probe axis (lateral resolution) can be considerably improved by recording the FMC and subsequently computing TFM images as well. Figure 5 presents results of both techniques on a standard test block having diameter 1 mm SDHs with 3 mm between each of them.

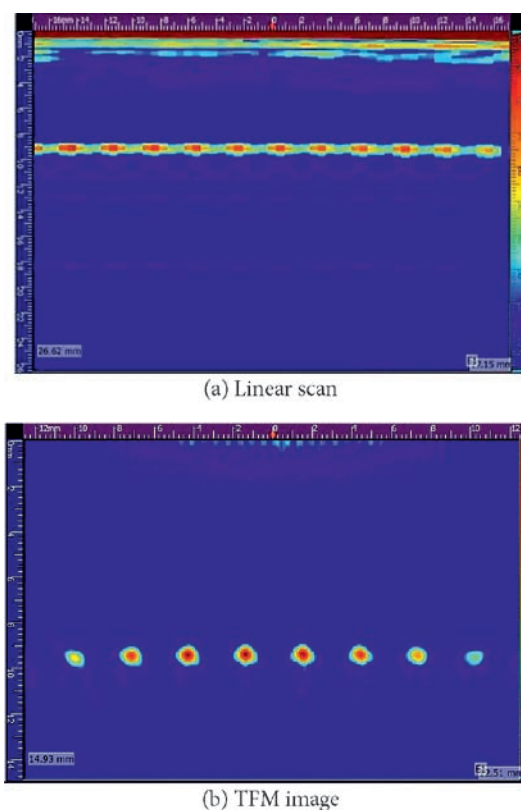


Fig. 5. Lateral resolution.

Rys. 5. Rozdzielczość boczna.

In Figure 5a, we can see that the linear scan will detect the presence of these SDHs properly, but will hardly distinguish the size of these individual SDHs because the amplitude drop between each SDH is less than 6 dB (A-scan amplitude is comprised between 50% and 80% FSH in the holes region). In the case of the FMC acquisition and TFM imaging, the algorithm triangulates the position of all beams which has the effect of improving the lateral resolution limitation from the physical size of the probe elements to the wavelength of the ultrasound beam. We can see in Figure 5b that the TFM image can size the SDHs properly, with a clear amplitude drop between each of them. The focusing ability of this imaging technique proves again that when required, it can become a real improvement to a standard linear scanning solution where resolution is critical.

3.4 Signal Processing Resolution Parameters

The resolution chosen in the TFM algorithm is a critical parameter which can create errors on the output images. Starting from a matrix that has 1024 A-scans (32 x 32 FMC), you can extract an image of 256 by 256 pixels. Using a resolution of 0.1 mm² represents a region of 25 x 25 mm. Increasing to a 4096 A-scans matrix (64 x 64 FMC) will simply increase the region of interest, not the resolution. On the other hand, decreasing the pixel resolution does not change the centre position, but the software gain needs to be increased to achieve the same result.

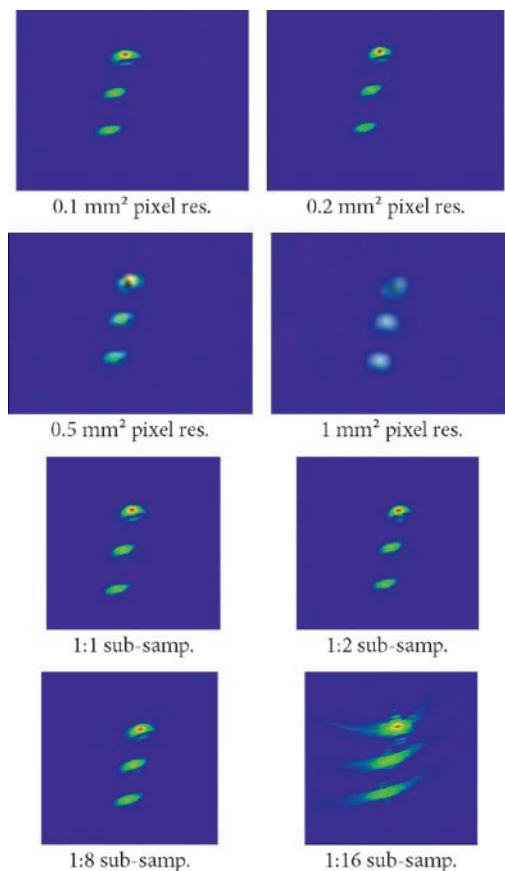
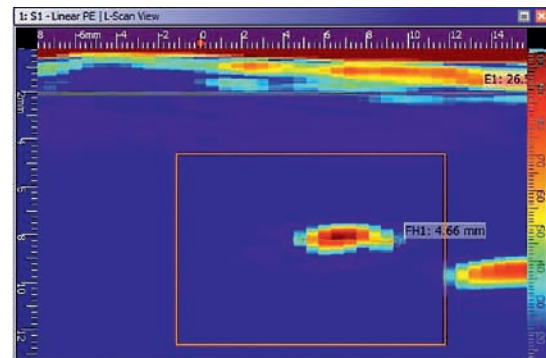
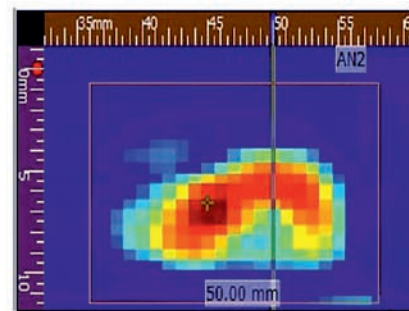


Fig. 6. Pixel resolution and sub-sampling the A-scan comparison.
Rys. 6. Porównanie wyników dla różnych rozdzielczości i dla różnych stopni pod-próbkowania sygnału czasowego typu A.

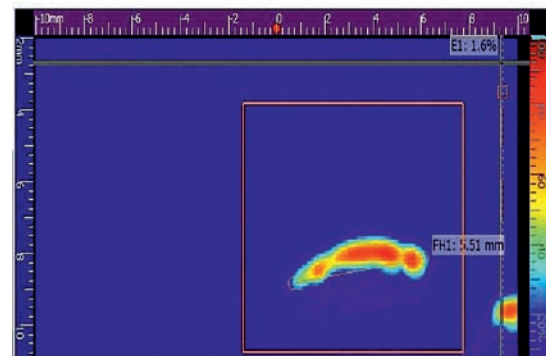
We can see in Figure 6 that both detection and sizing are not affected if the resolution is increased from 0.1 mm² to 0.2 mm². The wavelength in this setup being 1.2 mm, a 0.3 mm² resolution could be used without affecting the amplitude too much, as predicted by the Nyquist theorem. However, as presented in Figure 6, going over that threshold of 0.3mm² resolution affects the TFM sizing capabilities. Having access to such resolution software tools is important for precise TFM image analysis.



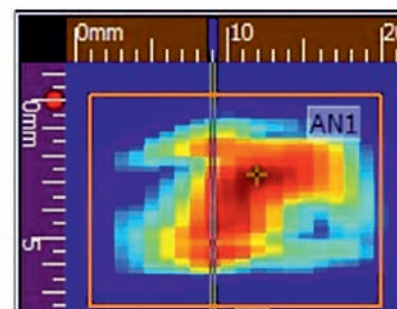
(a) Linear scan - 4.66 mm long



(b) Linear scan - encoded top view



(c) TFM L-L image - 5.51 mm long



(d) TFM L-L image - encoded top view

Fig. 7. Linear scan (8E) and TFM L-L imaging comparison.
Rys. 7. Porównanie obrazowania liniowego (8E) i TFM L-L.

A similar comparison can be made by removing samples directly from the raw A-scans. In the next example, the size of a frame could be cut in half to save memory space, without affecting the result. We can see in Figure 6 that the amplitude is not so different from the first subsampling 1:1 compared to the 1:2 but the image is considerably altered for the 1:16 subsampling. In numbers here, using a subsampling of 1:2 for a 50.8mm range will reduce the sample density from 42 samples/mm to 21 samples/mm. It still respects the 5 to 1 ratio of the acquisition frequency to the probe frequency. This sampling rate has virtually no impact at this wavelength of 1.2 mm. The FMC frame size is smaller by 2 MB (4 to 2 MB). For a 300 mm long encoded scan, this represents 600 MB of memory instead of 1.2 GB, which is not negligible.

3.5 Encoded Real Crack Sizing Comparison

We can now compare a fairly optimised linear scan to an FMC scan on a real defect. Both techniques use an encoder with a 1mm step resolution over a crack that is 100 mm long. In Figures 7, the linear scan uses an 8 elements aperture, and TFM images are computed in L-L mode algorithm. As expected, both techniques detect the crack and can fairly characterise it.

However, the convex shape of the defect is not showing up in the linear scan view and, consequently, seems to appear smaller in Figure 7 (a) and (b). In Figure 7 (c) and (d), the left portion of the crack is better represented as the crack orientation respond at different angles which are caught by the TFM algorithm. The analysis through time is a critical action where the growth rate is a major threshold parameter for repair. The absolute measurements, such as flaw length, are almost the same since the passive aperture is identical but the projected top view does not render the same dynamic profile. The defect zone measurement at the -6 dB amplitude is 33 mm² for the TFM and 37 mm² for the linear scan.

4. Results – Phased Array Sectorial Scan & TFM

For this section, the phased array sectorial scan data has been recorded at the same time as the FMC data using the multiscan function of the Sonatest Veo+ instrument. All the phased array linear and TFM imaging data analysis have been performed using Sonatest UTstudio+ software (TFM images are computed over 32 x 32 and 64 x 64 FMC apertures).

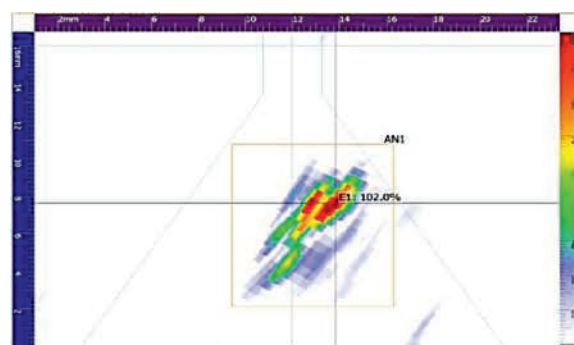
Since conclusions of the sections 3.1 to 3.4 similarly apply to a sectorial scan comparison, the next section will focus on presenting the results of real weld defects characterisation.

4.1 Real Weld Porosity and Crack Sizing Comparison

Two defects have been scanned using a 55° shear wave wedge and a phased array sectorial scan of 32 elements apertures. Simultaneously, the instrument was recording a 64 x 64 FMC data set. The Figure 8 presents resulting sectorial scan and high-resolution 0.1mm² TFM images.

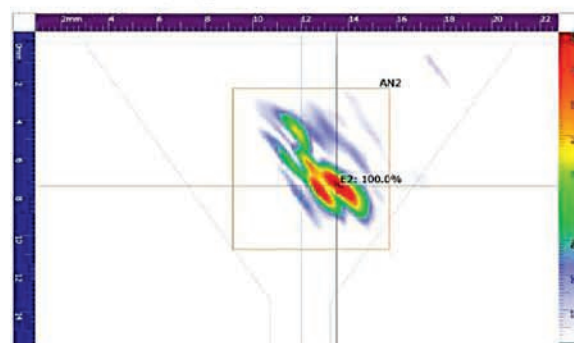
Again, it can be seen that the sectorial scan caught both defects accurately as per the depth and sizing because scan has been done using high energy and precise 32 element aperture focused in the defect area. However, as expected the

TMF imaging technique shows some improvements in the sizing capability. TFM is especially good to show the shape of the defects. The signal-to-noise ratio is also a slightly better on the TFM images.



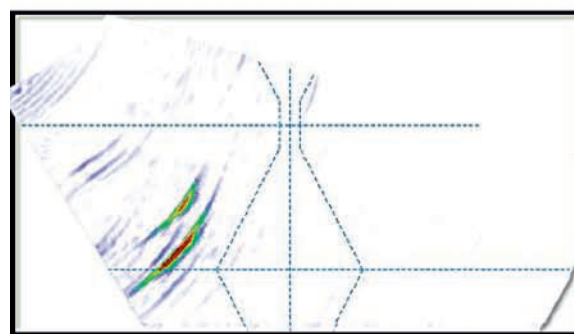
(a) Sectorial scan

Porosity depth at 4.13 mm and 20.3 mm²



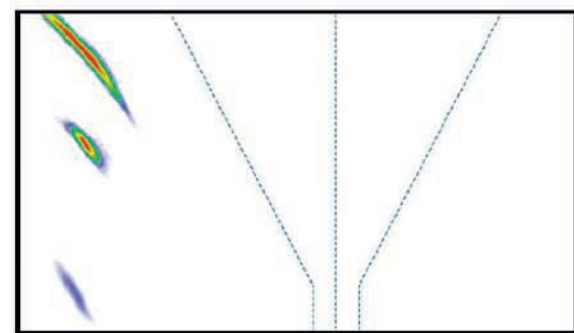
(b) TFM TTTT image

Porosity depth at 4.17 mm and 20.1 mm²



(c) Sectorial scan

Crown Crack depth at 10 mm



(d) TFM TTTT image

Crown Crack depth at 8 mm

Fig. 8. Sectorial scan (32E) and TFM imaging comparisons.
Rys. 8. Porównania obrazowania sektorowego (32E) i TFM.

It is interesting to explain that multiple trials with different TFM algorithms have been tested before generating these images. The LL, LT, TT, LLL, LLT, LTL, LTT, TTT, LLLL and TTTT modes have all been tested using the raw FMC data set in the Sonatest UTstudio+ analysis software, and the TTTT showed the best results. For weld inspection, when using transversal waves, mode conversion is an important factor to consider. Because of the different defect orientation and geometry characteristics, the TFM algorithms will generate different results. Longitudinal wave inspection mode is less dependant on this behaviour, and the TMF L-L algorithm is mainly used for this one. Because the instrument was simultaneously recording the full FMC raw data set during the recording, data is available for further analysis anytime. This approach is interesting not only for improving sizing capabilities but also to ensure traceability and monitoring defect propagation over time since a data can be re-open any time after the acquisition.

5. Conclusion

Fast, reliable and with higher resolution and sensitivity; ultrasonic phased array technique offers many advantages compared to conventional ones. Also, being now widely accepted in codes and standards phased array remains a very powerful ultrasonic NDT solution to detect and size defects in many different applications efficiently.

This paper has shown that the TFM imaging technique can bring valuable sizing benefits to complement or assist phased array inspection technique. For example, an improved signal-to-noise ratio can become important to discriminate small indications from the noise, and better geometry details can help understanding the potential behaviour of the defect. Sometime, to achieve similar results using phased array technique, apertures of 32 elements with a focus on the defective zone needs to be implemented. Such technique proved to work on many occasions, but it also puts more pressure on the technician to correctly set the acoustic parameters of his instrument. On the other hand, it has been demonstrated in this paper that recording FMC data presents an inferior risk of error than phased array; moreover, it opens the door to a multitude of TFM analysis options.

In conclusion, the approach proposed in this paper supports the methodology of using ultrasonic phased array technique for detection and sizing of defects as it remains today a very efficient and code compliant NDT inspection technique. Using FMC recording and TFM imaging as a detection and sizing technique would also be compliant, but would generate a large amount of data and this data management is still today a concern in the industry. Since the phased array technology proved to cover detection, sizing and traceability requirements, performing FMC/TFM technique only if required over critical defective zones represents a much more efficient solution. According to this approach, an NDT technician can scan with confidence using an approved phased array technique that generates manageable data sets all day long. Then, if he feels challenged by the presence of a defect in a critical zone of his job task, high resolution (down to 0.1 mm²) TFM imaging and analysis tools are subject to help making that call with confidence. This being said, it has been observed in this paper that the TFM image resolution processing must respect a certain threshold in order to avoid potential sizing errors. Taking this observation into account, performing a TFM analysis over a set of raw FMC recorded data will ensure the inspection decision can be tracked back for future assessment, as it is required by the traceability concept.

Since the usage of this novel FMC/TFM approach gets more and more mainstream, standard procedures are being reviewed by different NDT committees to help NDT technicians work with this new technology. Finally, it is clear that the trend for innovative NDT ultrasonic manufacturer is to invest in this technology; this shall also contribute to making this technology more accessible to NDT professionals.

6. References/Literatura

- [1] C. Holmes, B.W. Drinkwater, P.D. Wilcox, "Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation," *NDT & E International*, pp. 38:701-11, 2005.
- [2] F. Reverdy, G. Benoist, L. Le Ber, "Advantages and Complementarity of Phased-Array Technology and Total Focusing Method," in *19th World Conference on Non-Destructive Testing*, Munich, 2016.

Krzysztof Schabowicz*

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska

Najnowsze metody nieniszczące wykorzystywane w badaniach w budownictwie

The latest non-destructive methods used in research in construction

ABSTRACT

This paper presents the latest non-destructive methods used in research in construction. The classification of the methods are included. The most interesting of the methods are described. A focus is on the latest non-destructive. Today the development of test methods is oriented towards the evaluation of the characteristics of structures and structural components other than strength. The development of equipment enabling one to obtain an accurate image of the inside structure of the tested element in macro, micro and nano scale. An extensive survey of the literature on the subject, which researchers and experts in the diagnostics of civil structures may find useful, is included.

Keywords: civil structures; diagnostics; test methods; nondestructive methods; seminondestructive methods

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono najnowsze metody nieniszczące wykorzystywane w badaniach w budownictwie. Zamieszczono przegląd i opis wybranych metod. Pokazano przede wszystkim przydatne do tego celu najnowsze metody nieniszczące. Można zaobserwować, iż rozwój metod badawczych jest ukierunkowany na ocenę w elementach i konstrukcjach innych cech niż wytrzymałość. Następuje on w kierunku konstruowania aparatury badawczej pozwalającej uzyskiwać precyzyjne dane odnośnie do struktury badanego elementu zarówno w skali makro, jak i mikro, a czasem i nano. Daje to możliwość pełniejszej oceny jakości wykonania poszczególnych elementów w obiekcie budowlanym i jego konstrukcji.

Słowa kluczowe: obiekty budowlane; diagnostyka; metody badawcze; metody nieniszczące

1. Wstęp

Najnowsze metody nieniszczące wykorzystywane w badaniach w budownictwie dotyczą głównie elementów i konstrukcji budowlanych. Są to zazwyczaj konstrukcje wykonane z betonu i poddaje się je badaniom z różnych przyczyn i w różnym czasie, zarówno na etapie wznoszenia, jak i użytkowania. Przydatnych może być do tego celu wiele metod badawczych, które ze względu na stopień ingerencji w konstrukcję można podzielić w budownictwie na niszczące, seminieniszczące i nieniszczące. Badaniom niszczącym są poddawane przede wszystkim próbki pobierane z konstrukcji, rzadziej całe elementy lub konstrukcje.

Badaniom seminieniszczącym i nieniszczącym poddaje się również próbki i elementy, ale także całe konstrukcje. Badania seminieniszczące charakteryzują się tym, że podczas nich następuje niewielka lokalna i zazwyczaj przypowierzchniowa ingerencja w strukturę materiału. Z kolei w badaniach nieniszczących nie dochodzi do takiej ingerencji i można je wykonywać na dużej powierzchni i na znaczną głębokość, a ponadto umożliwiają powtarzanie pomiarów. Natomiast, gdy badana konstrukcja jest jednostronnie dostępna, bo styka się np. z gruntem lub z wodą, niektóre z nieniszczących metod stają się do tego celu nieprzydatne. Jako przykłady takich konstrukcji można podać fundamenty i ściany garaży podziemnych, ściany tuneli i kolektorów, elementy konstrukcyjne obiektów hydrotechnicznych. W takich przypadkach pojawia się konieczność skorzystania z nieniszczących metod badawczych, które nadają się do wykorzystania w konstrukcjach dostępnych jednostronnie.

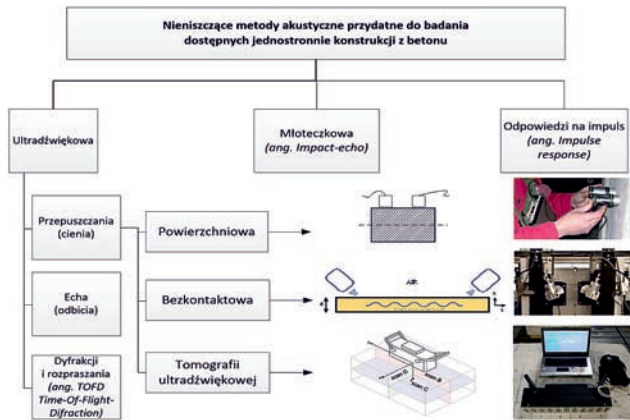


Rys. 1. Metody nieniszczące przydatne w diagnostyce obiektów budowlanych [4].

Fig. 1. Non-destructive methods in the diagnosis of building objects [4].

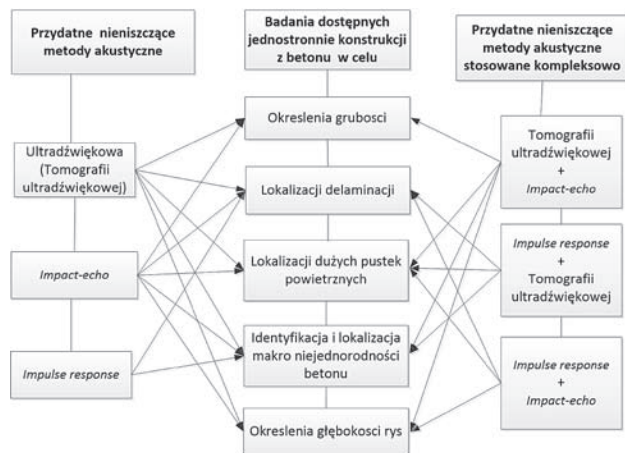
*Autor korespondencyjny. E-mail: k.schabowicz@pwr.edu.pl

Na rysunku 1 pokazano charakterystyczny podział metod nieniszczących przydatnych w diagnostyce obiektów budowlanych za [4]. Z kolei na rysunku 2, za [5], przedstawiono zmodyfikowaną klasyfikację nieniszczących metod akustycznych przydatnych w badaniach dostępnych jednostronnie konstrukcji z betonu. W artykule [11] zaprezentowano tę klasyfikację szerzej. Natomiast na rysunku 3, za [11], przedstawiono nieniszczące nowoczesne metody akustyczne stosowane pojedynczo lub kompleksowo przydatne do badania dostępnych jednostronnie konstrukcji z betonu.



Rys. 2. Klasyfikacja nieniszczących metod akustycznych przydatnych do badania dostępnych jednostronnie konstrukcji z betonu [5], [11].

Fig. 2. Classification of non-destructive acoustic methods useful for testing of single-sided concrete structures [5], [11].



Rys. 3. Przydatność nowoczesnych nieniszczących metod akustycznych stosowanych pojedynczo lub kompleksowo do badania dostępnych jednostronnie konstrukcji z betonu [11].

Fig. 3. The usefulness of modern non-destructive acoustic methods used individually or comprehensively for testing of concrete structures available on one side [11].

Należy zwrócić uwagę, że w badaniach dostępnych jednostronnie konstrukcji z betonu ekspert dokonujący badania musi podjąć decyzję dotyczącą wyboru właściwej metody, aparatury i zastosowania odpowiedniej metodyki umożliwiającej wykrycie i identyfikację ewentualnych wad.

2. Klasyfikacja wybranych imperfekcji

W sytuacji braku informacji, w tym o rodzaju badanej

imperfekcji, należy wykonać badanie wstępne wybraną metodą i aparaturą, aby na podstawie przeprowadzonej heurystycznie analizy otrzymanych rezultatów zastosować odpowiednią metodę, aparaturę i, co ważne, metodykę badań. Sytuacja jest prostsza, gdy na podstawie informacji uzyskanych na przykład od zleceniodawcy wiadomym jest, jaka imperfekcja występuje. Do dalszej analizy przydatna jest wiedza na temat lokalizacji (położenia), rozległości (wielkości obszaru występowania) i intensywność (zaawansowania zmiany zależnej od rodzaju wady) zidentyfikowanej (rozpoznanej) imperfekcji.

Tab. 1. Klasyfikacja wybranych imperfekcji geometrycznej i materiałowych wraz z zaproponowanymi pojęciami dotyczącymi ich opisu w dostępnych jednostronnie konstrukcjach z betonu badanych nowoczesnymi nieniszczącymi metodami akustycznymi i z przyporządkowaniem metod przydatnych do ich badania [11].

Tab. 1. Classification of selected imperfections occurring in unilaterally accessible concrete structures, together with terms proposed for their description and assigned state-of-the-art non-destructive acoustic methods suitable for testing such structures [11].

Rodzaj/opis imperfekcji		Metoda badania					
		Ultradźwiękowa (Tomografia ultradźwiękowa)	Impact-echo	Impuls response	Tomografia ultradźwiękowa + Impact-echo	Impuls response + Tomografia ultradźwiękowa	Impuls response + Impact-echo
Nieprawidłowa grubość elementu	identyfikacja	•	•	-	•	-	-
	lokalizacja	•	•	-	•	-	-
	rozległość	•	•	-	•	-	-
Delaminacja	identyfikacja	•	•	•	•	•	•
	lokalizacja	•	•	o	•	•	•
	rozległość	•	•	•	•	•	•
Duże pustki powietrzne	identyfikacja	•	•	-	•	•	•
	lokalizacja	•	•	-	•	•	•
	rozległość	•	•	-	•	•	•
Strefy makro-niejednorodności betonu	identyfikacja	•	•	•	•	•	•
	lokalizacja	•	•	•	•	•	•
	rozległość	•	•	o	•	•	•
Rysy	identyfikacja	•	•	-	•	-	•
	lokalizacja	•	-	-	•	-	-
	rozległość	-	•	-	•	-	•
intensywność	intensywność	-	•	-	•	-	•

Oznaczenia: • – metoda przydatna, o – metoda częściowo przydatna, - – metoda nieprzydatna, nd – nie dotyczy

W tabeli 1 za [11] podano klasyfikację wymienionych wyżej imperfekcji, geometrycznej i materiałowych, podając pojęcia dotyczące ich opisu w dostępnych jednostronnie konstrukcjach z betonu badanych wymienionymi wcześniej nowoczesnymi nieniszczącymi metodami akustycznymi i z przyporządkowaniem metod przydatnych do ich badania.

Z kolei w tabeli 2, na przykładzie imperfekcji materiałowej

– delaminacji objaśniono zaproponowane pojęcia doprecyzowujące na podstawie przeprowadzonych badań opis tych imperfekcji, a mianowicie: identyfikację, lokalizację, rozległość, intensywność.

Tab. 2. Przykładowe objaśnienie zaproponowanych pojęć dotyczących opisu imperfekcji materiałowej – delaminacji płyty włókno-cementowej badanej metodami nieniszczącymi.

Tab. 2. Explanation of proposed terms for describing geometric imperfection in unilaterally accessible concrete structures tested by means of non-destructive acoustic methods.

Opis imperfekcji	Ilustracja opisu imperfekcji	
	Widok	Przekrój
1. Identyfikacja Rozpoznanie, stwierdzenie, że występuje imperfekcja - delaminacja płyty		
2. Lokalizacja Określenie położenia imperfekcji w przekroju płyty z dokładnością na jaką pozwala zastosowana aparatura		
3. Rozległość Określenie wielkości obszaru występowania imperfekcji - pole pow., objętość, - z dokładnością na jaką pozwala aparatura		
4. Intensywność Określenie zaawansowania imperfekcji - rozkład delaminacji w rozumieniu lokalnym, ale na całym obszarze		

Tab. 3. Opis wybranych metod badawczych [1-3, 6-10, 12].

Tab. 3. Description of selected research methods [1-3, 6-10, 12].

Metoda	Zestaw badawczy	Przykładowe wyniki	Zasada działania	Zakres częstotliwości pracy i głębokość pomiaru
Metoda ultradźwiękowa [1]			Pomiar czasu rozchodzenia się fali podłużnej w ośrodku. Zestaw badawczy składa się z miernika oraz z dwóch przetworników: nadajnika i odbiornika. Nadajnik wysyła sygnał – falę podłużną – która propaguje się przez badany element betonowy i jest odbierana w odległości L, przez odbiornik.	Główce walcowe: 25-100 kHz 50-3000 mm
Metoda odpowiedzi na impuls [3, 7, 8, 10]			Wykorzystuje się impuls wytworzony za pomocą gumowego młotka, jako źródła fal sprężystych rozchodzących się w badanym elemencie. Uderzenie wprowadzania element w wibrację, podczas gdy specjalny przetwornik (geofon) znajdujący się w pobliżu miejsca uderzenia, mierzy amplitudę drgań.	0-800kHz 100-500 mm
Metoda echa [2]			Mierzy się czas przejścia fal sprężystych, które ulegają odbiciu od wady lub powierzchni ograniczających wewnątrz elementu	20-300 kHz 25-400 mm
Metoda młoteczkowa [2, 3, 7, 8, 10]			Wykorzystuje się zjawisko propagacji fal mechanicznych. Fala wzbudzana jest uderzeniem metalowej kulki w powierzchnię badanego obiektu. Po uderzeniu energia rozchodzi się przestrzennie w obiekcie w postaci fal mechanicznych. Odbite fale są rejestrowane za pomocą piezoelektrycznego przetwornika.	2-40 kHz 10-800 mm
Metoda tomografii ultradźwiękowej [9, 12]			Tomografia opiera się na propagacji fali sprężystej w badanym ośrodku. Źródłem wzbudzenia jest zwykle antena wielogłowicowa składająca się z 48 przetworników, która odbiera i przetwarza sygnały ultradźwiękowe.	50-200 kHz 25-2500 mm

3. Wybrane nieniszczące metody badawcze

Z tabeli 1 można wywnioskować, że szczególnie przydatne w rozwiązywaniu problemów związanych z badaniami imperfekcji w dostępnych jednostronnie konstrukcjach z betonu takich jak: nieprawidłowa grubość konstrukcji, delaminacja na styku warstw betonowych, duże pustki powietrzne, strefy makro-niejednorodności betonu, rysy, są metody tomografii ultradźwiękowej i impact-echo. W tabeli 3 przedstawiono opis wybranych metod badawczych. Z kolei w tabeli 4 zamieszczono porównanie metod pod względem wybranych czterech kryteriów: komfort użycia zestawu badawczego, różnorodność zastosowania, sposób prezentacji wyników, wady metody. Należy zwrócić uwagę, że nadal szuka się nowych metod badawczych, które umożliwiają pozyskanie większej ilości danych z badań, a co za tym idzie dokładniejszą analizę konstrukcji budowlanych.

4. Podsumowanie

Z przedstawionego w artykule przeglądu literaturowego, a także na podstawie własnych doświadczeń można stwierdzić, że obecnie poszukiwane są nieniszczące metody badawcze, które będą przydatne w diagnostyce obiektów budowlanych. W szczególności dotyczy to możliwości wykrywania wykonanych z betonu elementach i konstrukcjach różnego rodzaju wad i defektów (imperfekcji). Istotne miejsce zajmują w tym względzie metody zaliczane do akustycznych.

Podobnie jak w medycynie istniejącej potrzeba konstruowania aparatury badawczej umożliwiającej otrzymywanie obrazu

Tab. 4. Porównanie metod pod względem wybranych czterech kryteriów [6].

Tab. 4. Comparison of methods in terms of selected four criteria [6].

Metoda	Komfort użycia zestawu badawczego	Różnorodność zastosowania	Sposób prezentacji wyników	Wady metody
Metoda ultradźwiękowa	Potrzebny środek sprzęgający przy głowicach walcowych; małe i lekkie urządzenie, prosty sposób przeprowadzania badania	Ocena: wytrzymałości betonu, modułu sprężystości, jednorodności, detekcja rys i ubytków, głębokości rys, kontrola jakości betonu	Wyświetlenie czasu przejścia na ekranie miernika	Wpływ właściwości betonu na wynik, problematyczna interpretacja wyników, w przypadku głowic punktowych krótki zasięg pomiaru
Metoda odpowiedzi na impuls	Badanie dużych powierzchni w krótkim czasie; powierzchnia w dowolnym stanie wilgotności	Ocena: jednorodności betonu; lokalizacja stref podejrzanych o występowanie defektów	Wykresy amplitudy w funkcji częstotliwości, parametry charakterystyczne, mapy rozkładu wartości charakterystycznych	Problematyczna interpretacja wyników; nie daje żadnych informacji o głębokości wykrytych defektów, niska dokładność
Metoda echa	Natychmiastowe rezultaty; wystarczający jednostronny dostęp do przeprowadzenia badania; małe urządzenia	Pomiar grubości konstrukcji; wykrywanie wtrąceń, raków, porów, rozsegregowania betonu, rys i innych defektów	A-skan - punktowy pomiar w funkcji czasu	Liniowy defekt zorientowany równolegle do sygnału może zostać nie zauważony, problematyczna interpretacja A-skanu
Metoda młoteczkowa	Małe i lekkie urządzenie; czasochłonne badanie	Wykrywanie defektów: rozwarstwienia, raki, pory, rozsegregowanie kruszywa, rysy, pęknięcia, delaminacje	Wykres amplitudy w funkcji częstotliwości	Defekty o rozmiarze podobnym lub większym niż długość fali nie będą zlokalizowane; potrzeba dokładnego przygotowania powierzchni
Metoda tomografii ultradźwiękowej	Komfort użycia, czasochłonne badanie	Detekcja defektów, pomiar grubości obiektu przy dostępie jednostronnym	Przejrzyste wizualizacje: widok z góry, przekrój poprzeczny i podłużny, obraz 3D	Tomogramy często muszą być interpretowane z wykorzystaniem dodatkowych informacji

“wnętrza” i struktury badanego elementu, wykorzystując przy tym oprogramowanie zbudowane ze złożonych modeli matematycznych i sztucznej inteligencji. Ma to na celu umożliwienie bardziej zaawansowanej analizy zarejestrowanych w trakcie badań rezultatów.

W celu uproszczenia i zautomatyzowania powtarzalnych badań prowadzonych na dużych elementach konstrukcyjnych i obiektach budowlanych budowane są skanery i roboty wyposażone w aparaturę umożliwiającą kompilację kilku metod badawczych stosowanych równocześnie.

5. Literatura/References

- [1] „CMH Ltd - Distributors of Testing Equipment and Labware.” [Online]. Dostępne na: <http://www.cmhtest.co.uk/>. [Udostępniono: 15-sie-2015].
- [2] Ł. Drobiec, J. Jasiński, i A. Piekarczyk, „Metody lokalizacji wad konstrukcji betonowych-metoda młoteczkowa. Cz. 2”, *Przegląd Bud.*, t. 78, ss. 37–42, 2007.
- [3] T. Gorzelańczyk; J. Hoła J.; Ł. Sadowski, K. Schabowicz, “Methodology of nondestructive identification of defective concrete zones in unilaterally accessible massive members”, *Journal of Civil Engineering and Management*, 2013, Vol. 19, No. 6, ss. 775-786.
- [4] J. Hoła; K. Schabowicz, „Nieniszcząca diagnostyka obiektów budowlanych: przegląd wybranych najnowszych metod z przykładami zastosowań”, 56 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Kielce-Krynica, 2010.
- [5] J. Hoła, K. Schabowicz, “State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures - anticipated development trends”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2010, Vol. X, Nr 3, pp. 5-18.
- [6] D. Jawor, Ł. Radzik, K. Schabowicz, “ Analysis of contemporary non-destructive acoustic methods for concrete testing at the construction site”, *Defektoskopie* 2015, pp. 39-46.
- [7] V. M. Malhotra, N. J. Carino, “Handbook on Nondestructive Testing of Concrete”. CRC Press, 2004.
- [8] K. Schabowicz, J. Hoła, “Nondestructive elastic-wave tests of foundation slab in office building”, *Materials Transactions*, 2012, Vol. 53, pp. 296-302.
- [9] K. Schabowicz, V. Suvorov, “Nondestructive testing of a bottom surface and construction of its profile by ultrasonic tomography”, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, Vol. 50, No. 2, pp. 109-119.
- [10] K. Schabowicz, “Methodology for non-destructive identification of thickness of unilaterally accessible concrete elements by means of state-of-the-art acoustic techniques”, *Journal of Civil Engineering and Management*, 2013, Vol. 19, No. 3, pp. 325-334.
- [11] K. Schabowicz; “Modern acoustic techniques for testing concrete structures accessible from one side only”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, DOI: 10.1016/j.acme.2014.10.001.
- [12] K. Schabowicz; Ultrasonic tomography – the latest nondestructive technique for testing concrete members – description, test methodology, application example, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2014, Vol. 14, No. 2, pp. 295-303.



Polska

Większe bezpieczeństwo.
Większa wartość.

Badania Nieniszczące

Kwalifikowanie personelu
wg EN ISO 9712:2012

www.tuv-sud.pl/ndt



Twoje wyzwania

Wiarygodność i skuteczność badań nieniszczących zależy w dużej mierze od wiedzy, umiejętności i doświadczenia personelu, który je wykonuje. Najlepiej, gdy nabywanie wiedzy i umiejętności realizowane jest w niezależnej jednostce szkoleniowej, a proces kwalifikowania personelu zwięźzony zostaje certyfikacją zgodnie z normą EN ISO 9712: 2012 „Badania nieniszczące – Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących”.

Zakres szkoleń NDT

Oferujemy szkolenia z zakresu badań nieniszczących w następujących metodach:

- Badania wizualne (VT)
- Badania penetracyjne (PT)
- Badania magnetyczno-proszkowe (MT)
- Badania ultradźwiękowe (UT, UT.TOFD, UT.PA)
- Badania ultradźwiękowe. Pomiary grubości (UT.TM)
- Badania radiograficzne (RT)
- Badania radiograficzne. Ocena zdjęć radiograficznych połączeń spawanych (RT.FI)

Programy szkoleń spełniają wymagania normy EN ISO 9712: 2012 oraz Dyrektywy Urządzeń Ciśnieniowych.

Wybierz pewność. Dodaj wartość.

TÜV SÜD Polska należy do międzynarodowego koncernu TÜV SÜD AG, który od ponad 150 lat chroni ludzi, środowisko i własność przed niekorzystnymi skutkami technologii. TÜV SÜD specjalizuje się w badaniach, audytach, certyfikacjach, szkoleniach i usługach eksperckich.

Reprezentowany w ponad 800 lokalizacjach na całym świecie posiada potwierdzone akredytacjami kompetencje. Dostarczamy obiektywne rozwiązania naszym klientom, budując konkretną wartość dla biznesu, konsumentów i środowiska.

TÜV SÜD oferuje następujące usługi:

- Badania w Laboratorium Badań Materiałowych
- Certyfikację personelu badań nieniszczących
- Certyfikację personelu spawalniczego
- Certyfikację materiałów dodatkowych do spawania
- Kwalifikowanie technologii spawania
- Odbiory wyrobów hutniczych
- Ocenę zgodności urządzeń ciśnieniowych wg dyrektyw: PED / TPED (znak CE)
- Ocenę zgodności maszyn
- Certyfikację systemów zarządzania ISO 9001, ISO 14001, BS OHSAS 18001

Bogusław Ładecki^{1*}, Łukasz Knysak²

¹AGH w Krakowie, KWZMiK

²BW Engineering Sp. z o.o., Kraków

Badania nieniszczące połączeń lutowanych rur cienkościennych ze stali nieferromagnetycznych

Non-destructive testing of brazing joints of thin walled non-ferromagnetic steel pipes

ABSTRACT

The paper discusses methods used in non-destructive testing of joints of thin walled non-ferromagnetic steel pipe, brazed using binders based on silver and nickel. A comparative study made using the radiographic and ultrasonic method has shown, that it is possible to use ultrasonic technique in defining quality levels for joints of brazing thin walled pipes.

Keywords: non-destructive testing, brazing, thin walled non-ferromagnetic pipes

STRESZCZENIE

W referacie omówiono problematykę badań nieniszczących złączy rur cienkościennych ze stali nieferromagnetycznych lutowanych lutem twarde z wykorzystaniem spoiwa na bazie niklu oraz srebra. Badania porównawcze wykonane z wykorzystaniem metody radiograficznej i ultradźwiękowej, wykazały możliwość wykorzystania techniki ultradźwiękowej przy określaniu poziomów jakości złączy lutowanych na twardo rur cienkościennych.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, lutowanie twarde, rury cienkościenne ze stali nieferromagnetycznych

1. Wstęp

Lutowanie twarde rur cienkościennych ze stali nieferromagnetycznych jest procesem wykorzystywanym min. w przemyśle lotniczym [1,2,3].

Elementy rur cienkościennych do lutowania twardego powinny posiadać szczelinę kapilarną o szerokości w zakresie $0,02 \div 0,08$ mm [1,2].

Materiały łączone są spoiwem o temperaturze topnienia niższej od temperatury topnienia materiału rodzimego, a połączenie następuje w wyniku zjawisk dyfuzji.

Na jakość wykonania złączy istotny wpływ ma proces technologiczny przygotowania części do lutowania. W pewnych obszarach połączeń szczelina może być za mała, powodując utrudnienie płynięcia frontu lutu, lub zbyt duża, czego skutkiem jest zanik tzw. efektu kapilary. Spowodowane jest to niewielkimi odkształceniami elementów cienkościennych w procesie obróbki cieplnej. W efekcie, w obszarze połączenia lutowanego pojawić się mogą liczne niezgodności określone z normie PN-EN ISO 18279:2008 [4], ze względu na rodzaj, kształt i ich położenie w złączu. Norma wprowadza kryteria oceny i poziomy jakości, których wykorzystanie w odniesieniu do złączy lutowanych rur cienkościennych nie jest zweryfikowane odpowiednio obszernym zakresem badań eksperymentalnych.

Praktyka eksploatacyjna wskazuje na różne szczególnie szkodliwe niezgodności dla rozważanych złączy, z których większość usytuowana jest równolegle do powierzchni połączenia [5], a jednymi z najistotniejszych są rozległe braki wypełnienia złącza lutem [2].

2. Badania nieniszczące połączeń lutowanych

Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12799:2003 [6] w badaniach jakości połączeń lutowanych zaleca się stosowanie konwencjonalnych metod badań nieniszczących tj.: metoda wizualna, penetracyjna, radiograficzna, ultradźwiękowa i termograficzna.

Podstawowym kryterium kwalifikacji w ocenie jakości połączeń lutowanych rur cienkościennych ze stali nieferromagnetycznych jest stopień wypełnienia złącza lutem obliczony w odniesieniu do długości złącza, który powinien wynosić co najmniej 80% [2].

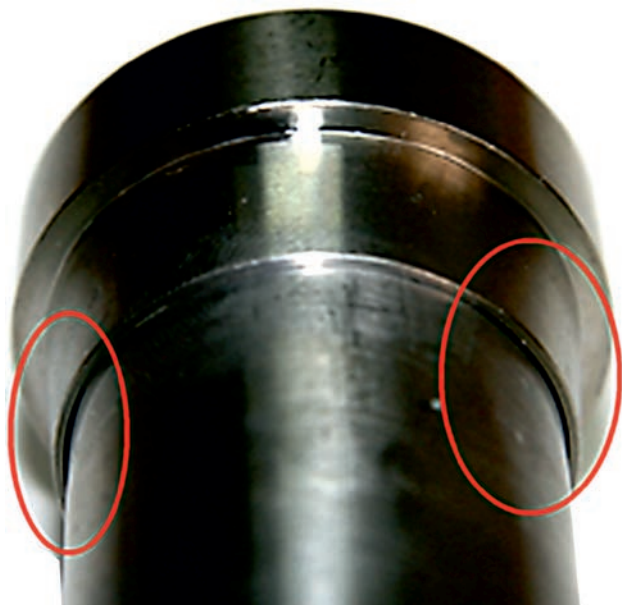
Badania wizualne połączeń lutowanych rur cienkościennych ze stali nieferromagnetycznych, ze względu na ich specyfikę, wykonuje się zwykle dla wszystkich złączy na całej ich długości [1,2]. Jednym z podstawowych wymagań dla tego typu złączy jest całkowite wypełnienie szczeliny lutem i uzyskanie ciągłego menisku lutu wewnątrz i na zewnątrz złącza rurki. Przykładowe braki wypełnienia połączenia lutowanego lutem na bazie srebra pokazano na rys. 1.

Polepszenie wykrywalności niezgodności powierzchniowych tj. porowatość, niepełne wypełnienie, brak zwilżenia czy pęknięcia, w porównaniu do metody wizualnej, daje metoda penetracyjna [9]. Należy zwrócić jednak uwagę na fakt, że całkowite usunięcie pozostałości penetranta może być trudne lub niemożliwe. Obecność penetranta pozostałego w złączu spowodować może utrudnienie rozpylania lutownicy, w przypadku wykonywania kolejnych prac lutowniczych.

W przypadku złączy lutowanych rur o małych średnicach, wykonanie obu wzmiankowanych powyżej badań wnętrza rur może nie być możliwe do wykonania.

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

Podstawową metodą badania stosowaną do oceny jakości złączy lutowanych rur jest metoda radiograficzna. Stosowane aktualnie nowoczesne aparaty rentgenowskie, pozwalają na przeprowadzenie zautomatyzowanej oceny jakości połączeń lutowanych [7].



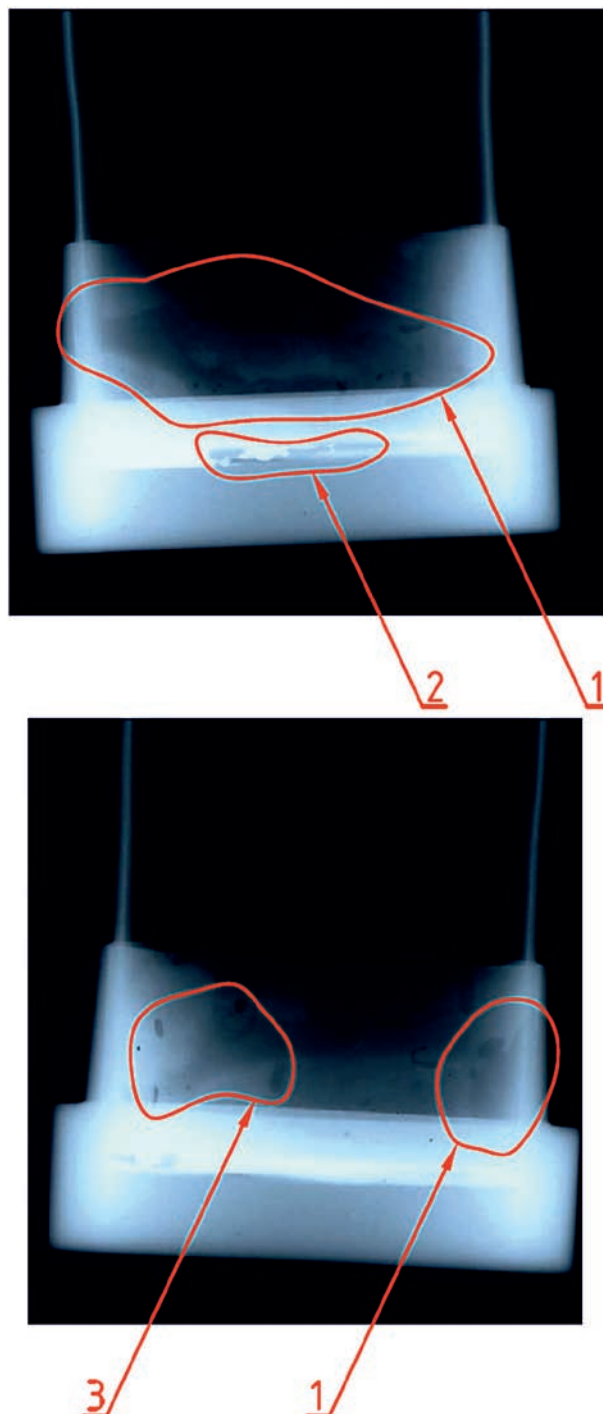
Rys. 1. Widok połączenia lutowanego lutem na bazie srebra z brakiem wypełnienia szczeliny lutem od strony zewnętrznej próbki.
Fig. 1. View of the brazing joints with a silver-based solder with no gap filling with solder from the outside of the sample.

Badania radiograficzne wykonane dla złączy rur cienkościennych ze stali nieferromagnetycznej gatunku 0H18N9T o średnicach $\varnothing 25,4$ mm i $\varnothing 9,5$ mm, lutowanych dla rur o większej średnicy lutem na bazie srebra Bag-13a oraz dla rur o mniejszej średnicy lutem na bazie niklu BNi-2. Przyłutowane końcówki w miejscu występowania połączenia lutowanego mają na powierzchni kształt ściętego stożka o tworzącej nachylonej pod kątem 3° do osi rury. Przykładowe radiogramy wykonane w dwóch różnych pozycjach dla jednej z próbek lutowanych lutem na bazie srebra, z opisem wykrytych niezgodności pokazano na rys. 2.

Znacznie rzadziej w badaniach złączy lutowanych rur cienkościennych stosowana jest technika ultradźwiękowa. Złącza takie składają się zwykle z trzech warstw materiałów o zróżnicowanych własnościach akustycznych. Biorąc pod uwagę konieczność dopasowania głowicy do kształtu badanej powierzchni, jak również duże rozmiary ziarna w obszarze złącza lutowanego rur wykonanych ze stali nierdzewnej [8], interpretacja uzyskanych wskazań oraz wykonanie ich oceny napotkać może na problemy [8,9]. Najnowsze badania wskazują na możliwość dokonywania oceny jakości obwodowych złączy zgrzewanych rur cienkościennych ze stali austenitycznych [8]. Wcześniejsze publikacje również wskazują na możliwość prowadzenia badań takich rur z wykorzystaniem tradycyjnych przetworników ultradźwiękowych [10].

Do wykrycia niezgodności w rozważanych złączach lutowanych wykorzystano miniaturową głowicę podwójną typu DA412 o średnicy przetwornika $\varnothing 5$ mm. Badania wykonane

dla próbek lutowanych lutem na bazie srebra wykazały dobrą zgodność uzyskanych wskazań rozległych w porównaniu do wyników badań metodą radiograficzną.



Rys. 2. Radiogramy złącza lutowanego spoiwem na bazie srebra z obszarami występowania nieciągłości: 1 – obszary niedolutowania, 2 – obszar niedolutowania na powierzchni lutownicy, 3 – obszar niedolutowania z pęcherzami gazowymi.

Fig. 2. X-ray Image of a joint brazed with a silver-based braze with areas of discontinuity: 1 - non-soldering areas, 2 - non-soldering area on the surface of solder, 3 - non-soldering area with gas bubbles.

Badania metodą termograficzną nie są zbyt często stosowane w odniesieniu do połączeń lutowanych, co związane

jest z trudnościami w ilościowej ocenie stopnia wypełnienia złącza lutowanego.

3. Podsumowanie

Spełnienie wysokich wymagań jakościowych stawianych w procesie wykonania połączeń lutowanych lutami twardeymi rur cienkościennych ze stali nieferromagnetycznych związane jest z koniecznością wykonania odpowiednich odbiorczych badań nieniszczących złączy.

Metoda wizualna wykorzystywana jest do kontroli całkowitego wypełnienia szczeliny lutem i uzyskania ciągłego menisku lutu wewnątrz i na zewnątrz rurki na styku z końcówką. Znacznie większą niezawodność wykrywania niezgodności powierzchniowych, w porównaniu do metody wizualnej, daje metoda penetracyjna. Całkowite usunięcie pozostałości penetranta może być jednak trudne lub niemożliwe, co stanowić może problem w przypadku konieczności wykonania powtórnego lutowania, a dla połączeń lutowanych rur o małych średnicach przeprowadzenie zarówno badań wizualnych, jak i penetracyjnych wnętrza rur może być niemożliwe do wykonania.

Podstawową metodą badania złączy lutowanych rur jest metoda radiograficzna, która w wyniku zastosowania nowoczesnych technologii obróbki obrazów pozwala na wykonanie dokładnej oceny poziomu jakości złączy.

Znacznie rzadziej w badaniach złączy lutowanych rur cienkościennych wykorzystywana jest technika ultradźwiękowa. W związku z badaniem struktur wielowarstwowych oraz koniecznością dopasowania głowicy do kształtu badanej powierzchni, interpretacja uzyskanych wskazań oraz wykonanie ich oceny napotkać może na problemy.

Badania wykonane techniką ultradźwiękową, zweryfikowane badaniami radiograficznymi, wskazują na możliwość wykorzystania techniki ultradźwiękowej w ocenie jakości połączeń lutowanych lutem twardym rur cienkościennych ze stali nieferromagnetycznej o określonej geometrii złączy. Zastosowane specjalistycznych miniaturowych głowic

ultradźwiękowych o powierzchni styku dostosowanej do geometrii badanych rur wpłynąć może na podwyższenie dokładności oceny jakości takich połączeń.

Podziękowania

Artykuł powstał w ramach realizacji pracy statutowej Katedry Wytrzymałości Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji WIMiR AGH pt. Wytrzymałość Materiałów i Konstrukcji - praca nr 11.11.130.375.

4. Literatura / References

- [1] T. Babul, J. Baranowski, J. Jakubowski, J. Kopeć, S. Kowalski, J. Senkara: Wpływ czynników technologicznych na lutowanie stali 18-8 spoiwem AgCu42Ni2. Przegląd Spawalnictwa, nr 8-9, s. 53-56, 2004
- [2] J. Baranowski: Lutowanie twarde części w przemyśle lotniczym. Przegląd Spawalnictwa, nr 8-9, s. 57-59, 2004
- [3] J. Baranowski: Lutowanie twarde w wybranych zastosowaniach w produkcji lotniczej. Przegląd Spawalnictwa, nr 9, s. 25-28, 2016
- [4] PN-EN ISO 18279:2008 - Lutowanie twarde – Niezgodności w złączach lutowanych na twardo.
- [5] A. Winiowski: Niezgodności złączy lutowanych spoiwami twardymi i przyczyny ich powstawania. Przegląd Spawalnictwa, nr 6, s. 37-41, 2012
- [6] PN-EN 12799:2003+A1:2005 - Lutowanie twarde – Badania nieniszczące złączy lutowanych na twardo.
- [7] A. Ambroziak, P. Białucki, W. Derlukiewicz, A. Lange, J. Chmielewski: Weryfikacja jakości połączeń lutowanych z miedzi za pomocą badań rentgenowskich. Przegląd Spawalnictwa, nr 9, s. 91-94, 2016
- [8] M. Węglowski: Badania ultradźwiękowe złączy zgrzewanych metodą FST o grubości poniżej 8mm. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, nr 2, s. 13-17, 2018
- [9] A. Łosieczka, L. Sozański: Wybrane aspekty badań ultradźwiękowych miedzianych połączeń lutowanych. Przegląd Spawalnictwa, nr 9, s. 85-88, 2010
- [10] M. Stachurski: Badania ultradźwiękowe cienkościennych elementów i ich połączeń. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, nr 6, s. 29-36, 2006

Marek Śliwowski*
NDTEST, Warszawa

Zwiększanie wiarygodności badania złączy spawanych rurociągów dla cyfrowych technik radiograficznych oraz ultradźwiękowych

Reliability increase of girth welds inspection in view of digital radiography and ultrasonic techniques

ABSTRACT

In validation procedures of equipment's, inspection systems as well as technically advanced digital inspection techniques (high-tech) a lot weight be attached to the repeatability and regeneration of testing result to be obtained. The performed results comparison aimed to reach increased reliability of testing by:

- detection and sizing of imperfections on reference blocks with implemented discontinuities (natural or prepared) of known localization and shape;
- finding repeatability (i.e. the identical or similar results detected on the same object by the same parameters of NDT technique applied);
- finding regeneration (i.e. the identical or similar results detected on the same object) obtained by: different inspection systems; different NDT methods/techniques; by digitization of analogue results to unify the comparisons;
- finding repeatability increasing by automatization/ mechanizing of testing process.

For illustration the digital and mechanized radiographic technique RTA (digital radiographs) and ultrasonic mechanized technique – UTA (digital sonogram TOFD+PE) are presented, as an example of girth welds inspection on pipelines DN 1000 and DN 800.

The comparison process was realized using analogue and digitized radiographs versus digital radiographs from DR system. The ultrasonic results of TOFD+PE technique be evaluated in respect of radiography or manual ultrasonic results.

It was pointed a complementary aspect of both volumetric methods (RTA and UTA) and its influence on the increasing reliability of inspection result.

Keywords: validation; reliability of inspection result; digital radiography; digital ultrasonic; automated inspection systems.

STRESZCZENIE

W procedurach walidacji urządzeń, systemów badawczych a także nowych zaawansowanych technicznie cyfrowych technik badawczych (high-tech) dużą wagę przykłada się do powtarzalności i odtwarzalności uzyskiwanego wyniku badania. Prowadzone są badania porównawcze polegające na uwiarygodnianiu wyniku badania:

- poprzez wykrywanie i wymiarowanie wad na próbkach referencyjnych z wadami sztucznymi lub naturalnymi o znanym położeniu i kształcie;
- powtarzalności wyniku (tzn. uzyskiwania podobnych lub identycznych wyników na tym samym obiekcie, z zachowaniem tych samych parametrów techniki NDT);
- odtwarzalności wyniku (tzn. uzyskiwania podobnych lub identycznych wyników na tym samym obiekcie) wykonywanych: różnymi systemami; różnymi metodami / technikami; poprzez digitalizację wyników analogowych dla ujednolicenia porównań;
- podwyższaniu powtarzalności wyniku przez automatyzację skanowania.

W celu ilustracji procesu uzyskiwania wyników cyfrowych (radiogramów w metodzie radiograficznej zautomatyzowanej - RTA oraz sonogramów w metodzie ultradźwiękowej zautomatyzowanej - UTA) przedstawiono przykładowe wyniki badań obwodowych złączy spawanych gazociągu DN 1000 oraz DN 800, gdzie wymagania kontraktowe narzucają poziom jakości złączy spawanych B lub wyższy wg PN-EN ISO 5817.

Dla celów porównań wykorzystano wyniki standardowych badań radiograficznych na błonach analogowych oraz radiogramy cyfrowe z digitalizacji tych radiogramów analogowych.

W aspekcie cyfrowych badań ultradźwiękowych referacie zwrócono uwagę w szczególności na porównania wyników uzyskiwanych techniką TOFD+PE w konfrontacji z wynikami badania radiograficznego i ręcznych badań ultradźwiękowych.

Zwrócono uwagę na ważny aspekt komplementarności wyników radiografii i ultradźwięków dla tego samego złącza i tym samym podwyższania wiarygodności wyniku badania.

Słowa kluczowe: walidacja; wiarygodność wyniku badania; radiografia cyfrowa; ultradźwięki cyfrowe; systemy badań zautomatyzowanych

1. Wstęp

Przedmiotem działań walidacyjnych w kontekście podwyższania wiarygodności wyniku badania są nowe techniki zmechanizowanego badania złączy spawanych:

- radiografii cyfrowej DR [1] (Direct Radiography), która wykorzystuje do zobrazowania bezpośredniego panele DDA (Digital Detector Arrays), dając cyfrowe

zobrazowanie w całej długości i objętości złącza spawanego;

- ultradźwięków cyfrowych TOFD+PE [2], która wykorzystuje kombinowaną technikę TOFD (dyfrakcyjna technika) oraz PE (klasyczna technika echa – uzupełniająca tzw. „strefy martwe” TOFD) i umożliwia cyfrowe zobrazowanie oraz cyfrowy zapis pełnych wyników badania w całej długości i objętości złącza spawanego.

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

Istotnym argumentem wdrożenia technik cyfrowej radiografii i ultradźwięków na terytorium Polski, w szczególności w przemyśle gazowniczym, jest nowe wydanie normy PN-EN 12732 [3], w której wprowadzono jako preferowane nowe wydania norm europejskich EN ISO, w tym stosowanie normy radiograficznych technik cyfrowych wg - PN-EN ISO 17636-2 [5] oraz norm ultradźwiękowego badania złączy spawanych cyfrową techniką TOFD - PN-EN ISO 10863 [6] oraz techniką PE - PN-EN ISO 17640 [7], zaś kryteria akceptacji przygotowywane są w oparciu o dokumentację projektowo-odbiorczą i dostosowane do nowych technik cyfrowych.

Istotnym elementem badań zautomatyzowanych jest ciągła weryfikacja nastaw systemów zmechanizowanych na próbkach odniesienia (zakres i czułość badania).

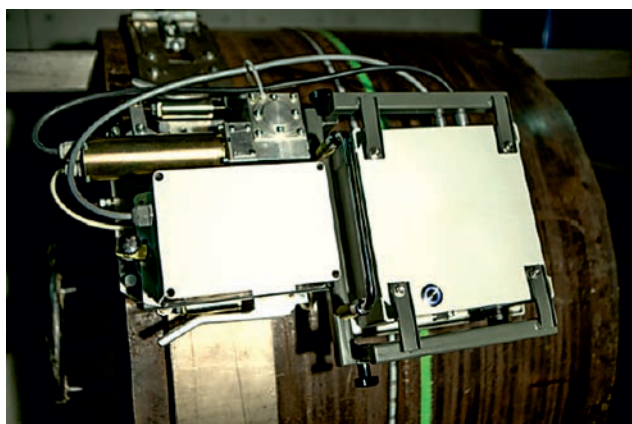
W celu ilustracji procesu uzyskiwania wyników cyfrowych (radiogramów w metodzie radiograficznej RTA oraz sonogramów w metodzie ultradźwiękowej UTA) przedstawiono przykładowe wyniki badań obwodowych złączy spawanych gazociągu DN 1000 [1] oraz DN 800 [2], gdzie wymagania kontraktowe narzucają poziom jakości złączy spawanych B lub wyższy wg PN-EN ISO 5817 [8].

Zwrócono uwagę na wzrost wiarygodności wyników badania wynikających z cyfrowego zapisu i automatyzacji skanowania.

2. Wyposażenie do badań RTA

Zmechanizowany system radiografii cyfrowej – system XPRESS Scan – 3Endt

System został zbudowany z przeznaczeniem do wykonywania połowych badań radiograficznych złączy spawanych na rurociągach o średnicach ϕ 400 ÷ 1420 mm, podczas ich budowy i napraw. Ogólny widok skanera wraz z detektorem przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1. Ogólny widok skanera wraz z detektorem DR prowadzonego na taśmie Crossa podczas badania złączy obwodowych.
Fig. 1. General view of radiographic scanner with DR detector guided on Cross band during testing of girth welds.

Zasadnicze elementy systemu radiografii cyfrowej przedstawiono na Rys. 2. Zapewniają one wykonywanie badań radiograficznych z rejestracją i zobrazowaniem cyfrowym radiogramu na płaskim detektorze krzemowym do zobrazowań bezpośrednich - DR.

Przedstawiony system mobilnej radiografii cyfrowej oznacza

zasadniczą zmianę procesu badania złączy poprzez:

- łatwość operacji - małe rozmiary i waga skanera - 4 kg;
- komunikacja sterowania i akwizycji danych w systemie bezprzewodowym (wi-fi);
- zmniejszenie kosztów badania eliminując stosowanie:
 - błon analogowych;
 - ich obróbki chemicznej;
 - automatów do obróbki filmów;
 - archiwizacji analogowych filmów;
- zwiększenie ochrony środowiska po wyeliminowaniu obróbki chemicznej radiogramów;
- otrzymanie wyniku w czasie rzeczywistym badania;
- możliwość wykonywania pełnego badania 6 ÷ 10 złączy spawanych liniowych na godzinę, w zależności od grubości ścianki;
- systemu zasilania z akumulatorów, który pozwala na ciągłą pracę z możliwością wymiany i szybkiego ładowania zapasowych akumulatorów;
- możliwość korekty na bieżąco parametrów spawania dla eliminacji błędów i wad;
- łatwą i intuicyjną obróbkę obrazu cyfrowego przy pomocy oprogramowania XVu;
- możliwość precyzyjnej oceny wskazań obrazu radiograficznego (zoom, optymalizacja kontrastu, polepszenie zobrazowania);
- łatwe przygotowanie dokumentacji badania przy cyfrowym zapisie wyniku.



Rys. 2. Ogólny widok mobilnego systemu radiografii cyfrowej XPRESS Scan – 3Endt (skaner wraz z detektorem DDA) do badania złączy obwodowych rurociągów.

Fig. 2. Schematic diagram of mobile radiographic digital system XPRESS Scan – 3Endt (scanner with DDA detector) dedicated for girth welds inspection of pipelines.

System zapewnia uzyskiwanie wymaganej klasy badania, określonych dla cyfrowych technik radiograficznych wg normy PN-EN ISO 17636-2:

- klasa A: techniki podstawowe;
- klasa B: techniki ulepszone;

co zostanie potwierdzone w badaniach walidacyjnych.

3. Wyposażenie do badań systemu UTA

Skaner (TOFD+PE) do badań zmechanizowanych ultradźwiękowych

Przy badaniu zmechanizowanym złączy techniką TOFD+PE głowice ultradźwiękowe (nadawcza i odbiorcza lub nadawczo-odbiorcza) muszą być prowadzone równolegle do spoiny w ustalonej odległości od siebie oraz środka spoiny.

Rama skanera zamontowana jest na wózku napędzanym silnikiem elektrycznym i prowadzona precyzyjnie względem

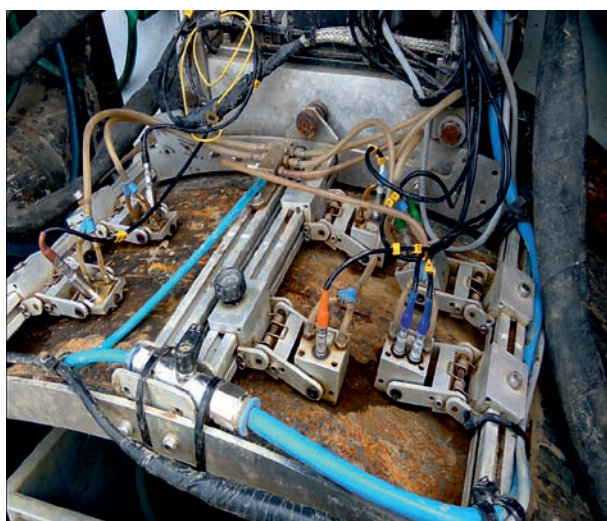
osi spoiny przy wykorzystaniu taśmy prowadzącej Crossa (por. Rys. 3).

Główce ultradźwiękowe montowane są do ramy skanera za pośrednictwem specjalnych wahliwych uchwytów zapewniających dokładne przyleganie głowic do powierzchni rury w czasie ruchu skanera. Konstrukcja ramy umożliwia regulację ustawienia głowic ultradźwiękowych względem siebie oraz względem osi spoiny (por. Rys. 4).



Rys. 3. Zmechanizowany system TOFD + PE z układem prowadzenia na taśmie Crossa.

Fig. 3. Mechanical scanner and guiding layout on the Cross band.



Rys. 4. Układ głowic skanera względem osi spoiny.

Fig. 4. The scanner probe layout versus weld axis.

Ważną funkcją skanera jest dostarczanie do jednostki centralnej informacji o położeniu głowic skanujących na obwodzie spoiny. Do odmierzania przesuwu skanera wzdłuż spoiny służy cyfrowy enkoder położenia, którego impulsy generowane są wskutek obrotu koła przylegającego do powierzchni rury.

Do skanera doprowadzony jest specjalnie zabezpieczony kabel zbiorczy, wewnątrz którego znajdują się przewody

sygnałowe głowic, kabel enkodera, kabel zasilający silnik, oraz przewód doprowadzający wodę. Skaner może poruszać się po obwodzie rury w obu kierunkach z prędkością regulowaną płynnie w zakresie od 0 do 2 metrów na minutę.

Sterowanie ruchem skanera odbywa się za pomocą sterownika umieszczonego w samochodzie terenowym i obsługiwane przez operatora systemu.

4. Nastawianie i kontrola czułości badania

Czułość badania jest podstawowym parametrem nastaw w badaniu NDT, który decyduje o poziomie wykrywalności wskazań a tym samym potwierdzeniu, że przeszką w wyznaczonej zakresie objętości badania zostało wykonane zgodnie z wymaganiami. Dlatego też parametr ten podlega ciągłemu monitorowaniu w procesie badania.

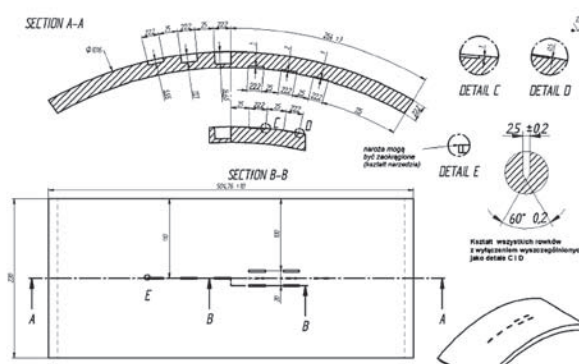
4.1 Badanie ultradźwiękowe cyfrowe – TOFD + PE

W badaniu TOFD+PE nastawianie i kontrola czułości badania zależy od przyjętej/narzuconej klasy badania. Poczynając od podwyższonych klas B, C, D wg PN-EN ISO 10863 wymagane jest przygotowanie specjalizowanych próbek odniesienia, dostosowanych do badanej grubości i geometrii obiektu (por. Rys. 5).

Wzorce kalibracyjne i próbki odniesienia

W badaniu TOFD do oceny wielkości wady wykorzystywana jest informacja o czasie przejścia rejestrowanych impulsów ultradźwiękowych a nie ich amplituda. Stąd też dokładna kalibracja czułości badania systemu TOFD nie jest wymagana. Wzmocnienie to powinno być jednak dostatecznie duże aby zapewnić wykrycie wszystkich impulsów pochodzących od wad nie powodując przy tym nadmiernego wzrostu poziomu szumów.

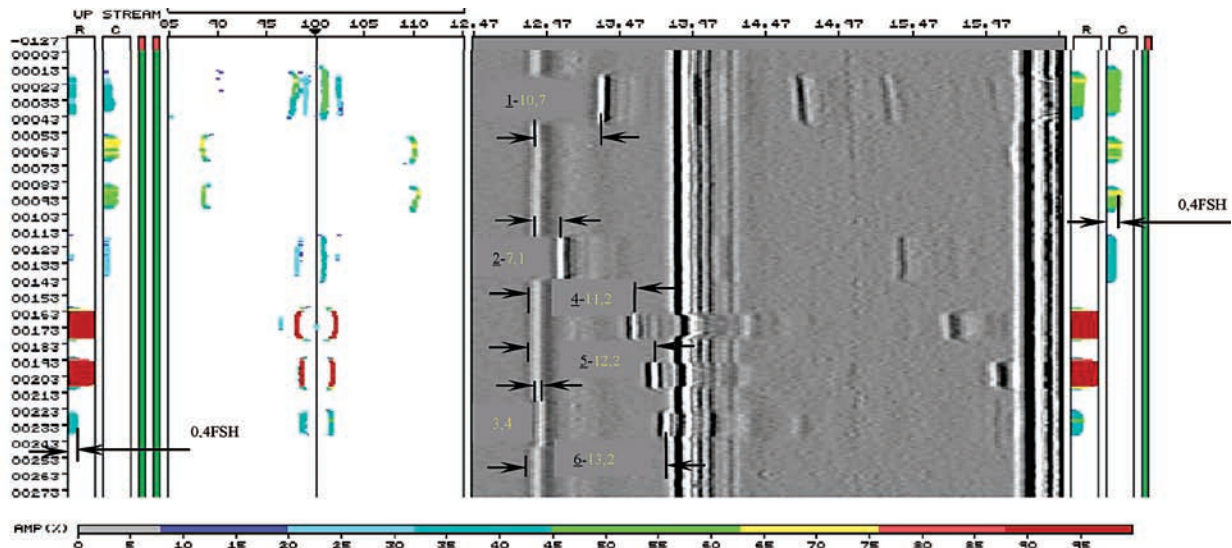
Wzmocnienie dla głowic pracujących w technice echa PE ustawiać należy na nacięciach o głębokości odpowiadającej wielkości rejestrowanych wad.



Rys. 5. Próbka odniesienia do nastaw i kontroli czułości badania systemu ultradźwiękowego TOFD+PE dla DN 1000.

Fig. 5. The reference block for sensitivity setting and checking of ultrasonic system TOFD+PE for pipeline DN 1000.

Do weryfikacji nastawy czułości systemu ultradźwiękowego, wykorzystywana będzie specjalna próbka odniesienia (por. Rys. 5), w postaci wycinka rury o badanej grubości t średnicy DN z nacięciami na powierzchni zewnętrznej o głębokościach 0,5 mm, 1 mm, $t/4$, $2t/4$ oraz $3t/4$ mm a także



Rys. 6. Skan kontrolny na próbce odniesienia wykonany skanerem TOFD+PE na spoinie DN 1000 x 14,2 mm.
Fig. 6. The control scan of reference block done by TOFD+PE scanner on the weld DN 1000 x 14,2 mm.

z reflektorami na powierzchni wewnętrznej - nacięcia o głębokościach 1 mm, 2 mm oraz 3 mm, zgodnie z zaleceniami PN-EN ISO 10863, zał. A oraz wymaganiami kontraktowymi.

Weryfikacja wykrywalności i nastawa czułości na próbce odniesienia

Na Rys. 6 pokazano wykrywalność reflektorów zaimplementowanych próbce odniesienia pokazanej na Rys. 5. Stwierdzono, że na sonogramie kontrolnym uzyskano wskazania od wszystkich dyfraktorów na głowicach TOFD, przy czym dokładność wymiarowania tej techniki ($\pm 0,1$ mm) pozwala na precyzyjne wymiarowanie położenia i rozmiarów wad (dyfraktor: $\underline{1} - h_1 = 10,7$ mm; $\underline{2} - h_2 = 7,1$ mm; $\underline{3} - h_3 = 3,4$ mm; $\underline{4} - t_4 = 11,2$ mm, $h_4 = 3,0$ mm; $\underline{5} - t_5 = 12,2$ mm, $h_5 = 2,0$ mm; $\underline{6} - t_6 = 13,2$ mm, $h_6 = 1,0$ mm).

Jednocześnie na paskach R i C, po obydwu stronach sonogramu, przedstawione są cyfrowe wskazania głowic pracujących w technice echa - PE (R - reprezentują maksymalną amplitudę i czas przejścia głowic „patrzających” na strefę przetopu na długości spoiny; C - reprezentują maksymalną amplitudę i czas przejścia głowic „patrzających” na strefę lica na długości spoiny).

Kalibracja głowic R - przetop, odbywa się na nacięciu $\underline{6} - h_6 = 1,0$ mm, przez ustawienie amplitudy na poziomie 40% FSH w bramce echa przetopu; natomiast kalibracja głowic C - lico, odbywa się na nacięciach $\underline{8}$ powierzchni zewnętrznej - $h_8 = 0,5$ mm, przez ustawienie amplitudy na poziomie 40% FSH w bramce echa na początku lica).

Weryfikacja wykrywalności i nastaw czułości odbywa się systematycznie w czasie procesu badania i jest dokumentowana datowanym sonogramem kalibracyjnym co każde 10 ÷ 20 złączy (por. Rys. 6).

4.2 Badanie radiograficzne cyfrowe - radiografia DR na detektorze płaskim DDA

Dotrzymanie wymaganej czułości badania, w przypadku radiografii analogowej, wymaga zapewnienia klasy

radiogramu wg normy PN-EN ISO 17636-1 [4] poprzez uzyskiwanie wymaganej wykrywalności wskaźnikowej $IQI_{standard,r} = W_{IQI,r}$. Drugim podstawowym parametrem, mającym na celu uzyskanie wystarczającej czułości kontrastowej radiogramu analogowego, jest zapewnienie minimalnej gęstości optycznej $D_{min,r}$.

Analogicznie dotrzymanie wymaganej klasy radiogramu cyfrowego wg PN-EN ISO 17636-2 [5] uzyskiwane jest przez zapewnienie wykrywalności wskaźnikowej $IQI_{standard,r} = W_{IQI,r}$.

Dla radiogramów cyfrowych złączy spawanych norma PN-EN ISO 17636-2 określa dodatkowo wymaganą rozdzielczość przestrzenną $SR_{b,r}$, którą wyznacza się ze zobrażenia na radiogramie wskaźnika IQI - podwójny pręciak (tzw. duplex - wykorzystywany do określania nieostrości geometrycznej obrazu).

Odpowiednikiem parametru, mającym na celu uzyskanie wystarczającej czułości kontrastowej radiogramu cyfrowego, jest zapewnienie minimalnej wartości znormalizowanego stosunku sygnału do szumu oznaczanego symbolem $SNR_{n,min}$, który jest powiązany z rozdzielczością przestrzenną SR_b zależnością:

$$SNR_n = SNR \times \frac{88,6 \mu m}{SR_b}$$

gdzie:

SNR_n - znormalizowany stosunek sygnał-szum;

SNR - mierzony na radiogramie cyfrowym stosunek sygnał-szum

SR_b - podstawowa rozdzielczość przestrzenna detektora cyfrowego.

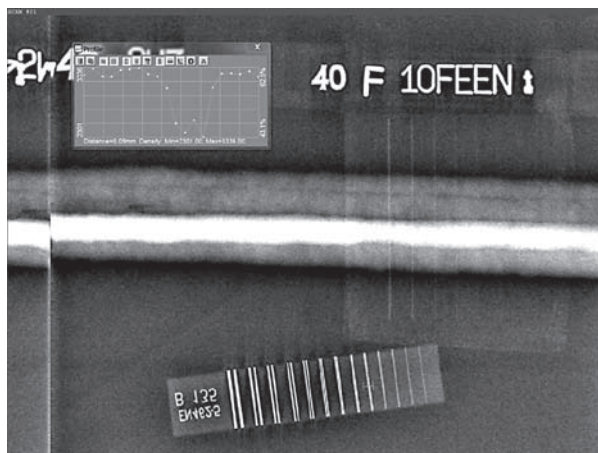
Weryfikacja wykrywalności wskaźnikowej i czułości kontrastowej radiografii DR

Ocena wykrywalności wskaźnikowej

Dostrzegalność nieciągłości należy potwierdzić przez stosowanie wskaźników jakości obrazu IQI oraz dodatkowo

wskaźnik IQI - duplex w przypadku radiografii cyfrowej (por. Rys. 7 - obraz prześwietlenia złącza DN 1000 mm, grubość ścianki $d = 14,2$ mm).

Na radiogramach analogowych oraz cyfrowych przy ekspozycjach lampą rentgenowską w większości przypadków uzyskiwano taką samą wykrywalność wskaźnikową IQI (po zabiegach polepszenia cyfrowego zobrazowania) – $W_{IQI} = w15 = 0,125$ mm - wymaganie dla klasy B wg normy PN-EN ISO 17636-2 narzuca wykrywalność $W_{IQI,r} = w13 = 0,20$ mm.



Rys. 7. Widok wskaźników jakości obrazu IQI (standard i duplex) na kontrolnym radiogramie uzyskanym systemem XPRESS Scan – $IQI_{standard} = w15$, $IQI_{duplex} = D9$.

Fig. 7. View of wire quality indicators IQI (standard i duplex) on control digital radiograph recorded by XPRESS Scan system – $IQI_{standard} = w15$, $IQI_{duplex} = D9$.

Dla radiogramów cyfrowych złączy spawanych określa się dodatkowo rozdzielczość przestrzenną SR_b , stosując obróbkę cyfrową radiogramu referencyjnego a także wyznaczanie profilu liniowego wskaźnika IQI_{duplex} , z którego odczytuje się nr pierwszej nierozdzielonej pary pręcików (por. Rys. 7).

Na kontrolnym radiogramie cyfrowym przy ekspozycji lampą rentgenowską uzyskiwano wykrywalność wskaźnikową duplexową – $IQI_{duplex} = D9 = 0,26$ mm, podczas gdy wymaganie dla klasy B wg normy PN-EN ISO 17636-2 narzuca, dla prześwietlanej grubości ścianki rury – wykrywalność nieostrości $IQI_{duplex,r} = D10 = 0,20$ mm).

Zatem zachodzi tu przypadek, że osiągnięcie wymaganej nieostrości – wyrażonej wykrywalnością duplexową jest utrudnione dla stosowanej techniki cyfrowej DR. W takim przypadku norma PN-EN ISO 17636-2 przewiduje tzw. drugą zasadę kompensacji CP II i w celu wyrównania tego braku można wykorzystać podwyższoną wartość SNRn. Podwyższony SNR musi umożliwić uwidocznienie jednego dodatkowego pręcika wskaźnika $IQI_{standard} = W_{IQI}$ dla każdej brakującej pary pręcików wskaźnika typu IQI_{duplex} .

Oznacza to, że wymagana rozdzielczość duplexowa $SR_{b,r}$ może w tym przypadku być zredukowana do wartości:

$$SR_{b,r} = 0,5 IQI_{duplex,r} = 0,5 D9,$$

ponieważ wykrywalność pręcikowa $IQI_{standard}$ (por. Rys. 6) jest lepsza o co najmniej 1 wartość pręcika od wymaganej.

Ocena czułości kontrastowej poprzez zapewnienie $SNR_{n,min}$

Podstawową regułą przy stosowaniu zasady kompensacji jest utrzymanie odpowiednio wysokiej wartości znormalizowanego stosunku sygnału do szumu $SNR_{n,min}$. Wartość tego ilorazu jest miarą czułości kontrastowej radiogramu cyfrowego. Jeśli pomierzony SNR dla danej cyfrowej techniki radiograficznej po prawej stronie równania, nie spełnia założonych wymagań narzuconych przez normę, można to skompensować przez odpowiednią kompensację (zmniejszenie) wymaganej rozdzielczości przestrzennej $SR_{b,r}$.

Na kontrolnym radiogramie cyfrowym przy ekspozycji lampą rentgenowską uzyskiwano średnią rozdzielczość przestrzenną:

$$SR_b = 0,5 D9 = 130 \mu m$$

i pozwoliło to wyznaczyć – znormalizowany stosunek sygnał-szum:

$$SNR_n = 158 \text{ (pomierzony w SWC w pobliżu wskaźnika IQI)}$$

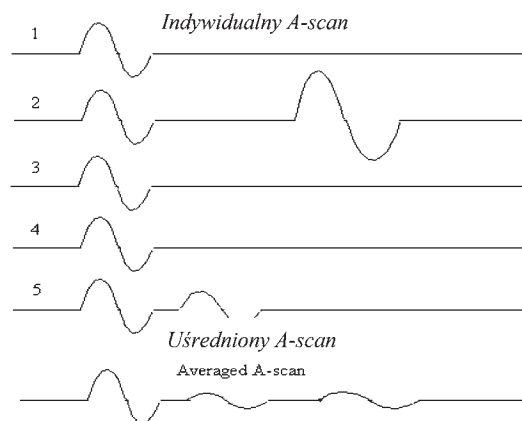
przy zalecanym normą PN-EN ISO 17636-2

$$SNR_{n,min} = 140.$$

5. Obróbka akwizycyjna sygnału cyfrowego – uśrednianie, podwyższanie SNR

Sygnały dyfrakcyjne TOFD zbierane z wierzchołków pęknięcia są bardzo słabe i wymagają dużych poziomów wzmocnienia i przez to często są słabo rozróżnialne w poziomie szumów.

Większość szumów jest generowana przez cyfrowe systemy NDT (zarówno ultradźwiękowe jak też radiograficzne) w postaci losowo rozłożonych sygnałów elektrycznych. Ten rodzaj szumów może być łatwo zredukowany przez uśrednianie sygnału i dotyczy każdej sekwencji sygnałów cyfrowych w badaniu NDT.



Rys. 8. Zasada uśredniania sygnałów na przykładzie TOFD.
Fig. 8. Principle of digital signal averaging by TOFD system.

Uśrednianie sygnału jest to operacja polegająca na n -krotnej akwizycji przebiegu amplitudowo- czasowego (A-scan) dla tego samego odcinka czasowego. Uśrednianie zwiększa SNR poprzez redukcję losowego szumu:

$$SNR_{uśredniony} = n^{0,5} SNR_{losowy}$$

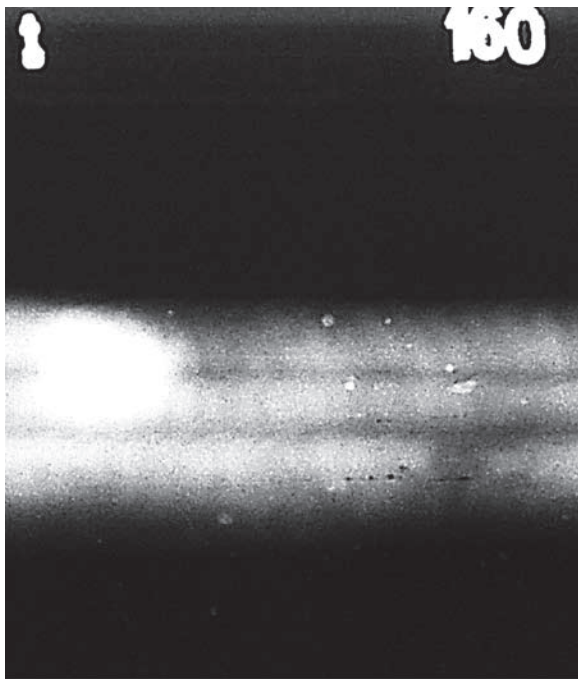
Jeśli n A-scanów, generowanych w danym przekroju obiektu, zostanie dodanych do siebie i wypadkowa suma zostanie podzielona N , wówczas SNR rzeczywistego sygnału wzrasta w stosunku $\sqrt{n}$. Funkcja uśredniania redukuje prędkość akwizycji danych.

Na Rys. 8 pokazano 5 rejestrowanych kolejno w danym miejscu A-scanów, gdzie sygnał rzeczywisty zachowuje swoje położenie i wielkość, natomiast sygnały szumów ujawniają swój przypadkowy rozkład i wielkość w sekwencji kolejnych zapisów. Na dolnym wykresie przedstawiono A-scan, na którym uśredniony sygnał rzeczywisty zachowuje swoje położenie i wielkość natomiast uśrednione losowe sygnały szumu zostały zredukowane w stosunku $\sqrt{5}$.

6. Badania walidacyjne złączy spawanych systemem radiografii analogowej i cyfrowej

W ramach procesu walidacji techniki cyfrowej DR zbadano problem odtwarzalności wyniku (tzn. uzyskiwania podobnych lub identycznych wyników na tym samym obiekcie) uzyskiwanego:

- tą samą metodą radiograficzną, ale różnymi systemami: z jednej strony system radiografii błonowej, z drugiej system radiografii cyfrowej;
- poprzez cyfrową akwizycję końcowego wyniku różnymi technikami: z jednej strony digitalizacja radiogramu analogowego, z drugiej bezpośredni zapis radiogramu na płaskim detektorze scyntylacyjnym.

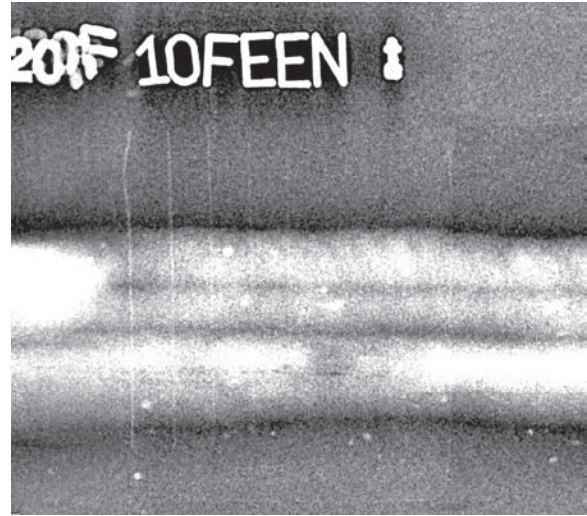


Rys. 9. Digitalizowany radiogram analogowy spoiny W1 – widoczne wskazania przyklejenia + pęcherze (4012 + 2011) $x_1 = 158,5 \div 160$ cm.
Fig. 9. Digitalized analogue radiograph of W1 weld – the LOF+pores indication is visible (4012 + 2011) $x_1 = 158,5 \div 160$ cm.

6.1 Wyniki badania radiograficznego - przykładowe złącza z budowy DN1000

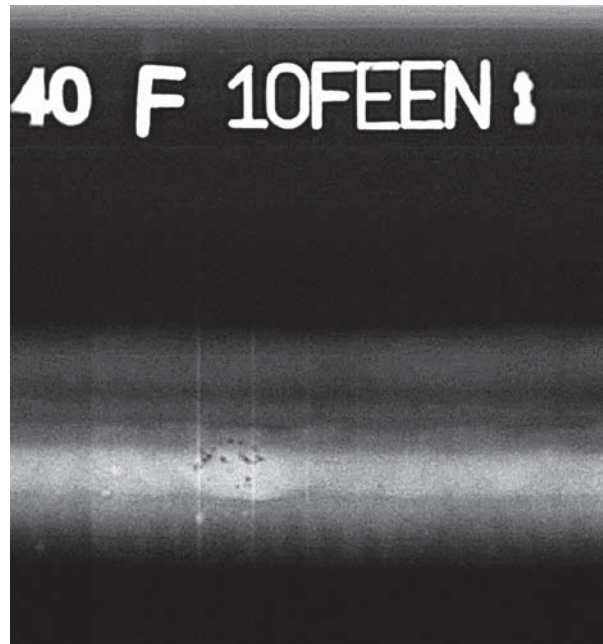
Przedstawiono bardzo spektakularne porównanie przedstawiono dla lokalizacji przyklejenia, które na ogół jest dosyć

trudno wykrywalne metodami radiograficznymi. W obydwu przypadkach (por. Rys. 9 i 10) wskazanie daje dosyć słaby kontrast, ale jest ono wykrywalne.



Rys. 10. Radiogram cyfrowy spoiny W1 – potwierdzone wskazania przyklejenia + pęcherze (4012 + 2011) $x_1 = 123,5 \div 125$ cm (0 taśmy rdg zostało przesunięte o $\Delta x = -35$ cm).

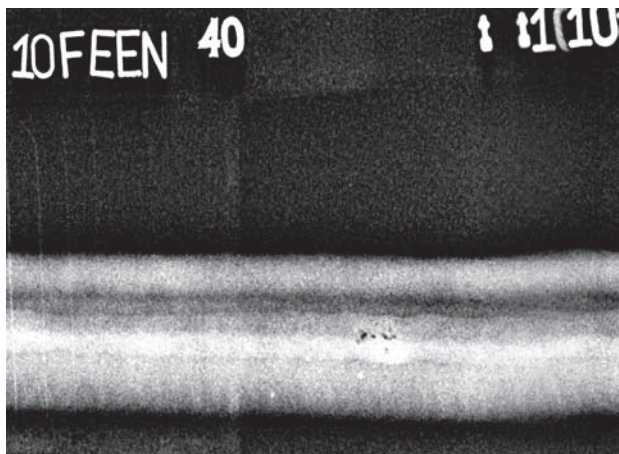
Fig. 10. Digital radiograph of W1 weld – the LOF + pores indication is confirmed (4012 + 2011) $x_1 = 123,5 \div 125$ cm (0 of radiographic meter is moved by $\Delta x = -35$ cm).



Rys. 11. Digitalizowany radiogram analogowy spoiny W2 – widoczne wskazanie pęcherzy gniazda i kanalików (2013 + 2016) $x_1 = 41,5 \div 42,5$ cm.

Fig. 11. Digitized analogue radiograph of W2 weld – the cluster + warm holes is visible (2013 + 2016) $x_1 = 41,5 \div 42,5$ cm.

Na Rys. 11 oraz 12 porównano zobrazowanie gniazda pęcherzy oraz pęcherzy kanalikowych uzyskane techniką radiografii analogowej i cyfrowej – zgodność obrazu wad i ich rozmiarów doskonała. Przy lokalizacji należy uwzględnić przesunięcie „0” metra radiograficznego na radiogramach cyfrowych o wartość $\Delta x = +1$ cm, podczas skanowania złącza W2 techniką DR

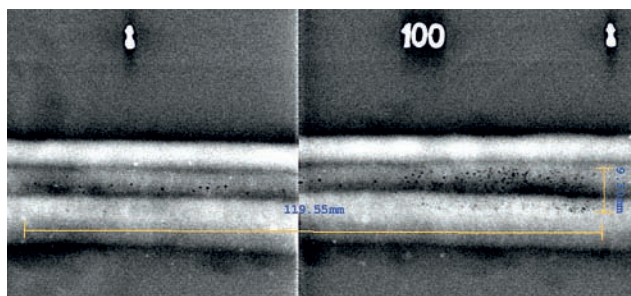


Rys. 12. Radiogram cyfrowy spoiny W2 - potwierdzone wskazanie gniazda pęcherzy i pęcherzy kanalikowych (2013 + 2016) $x_1 = 42,5 \div 43,5$ cm (0 taśmy - $\Delta x = +1$ cm).

Fig. 12. Digital radiograph of W2 weld – the cluster + warm holes is confirmed (2013 + 2016) $x_1 = 42,5 \div 43,5$ cm (0 of RT. meter is moved by $\Delta x = +1$ cm).

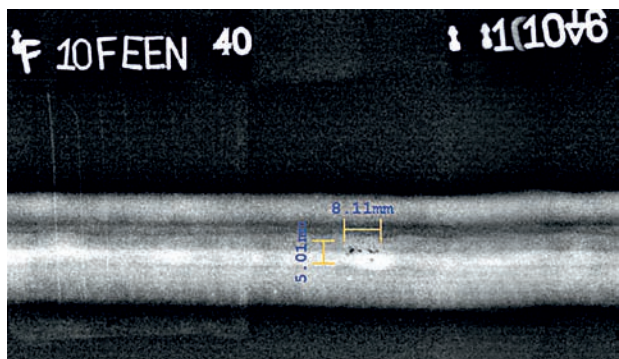
6.2 Ocena możliwości obróbki cyfrowej: lokalizacja i wymiarowanie wskazań

W tym punkcie podano przykłady ulepszanego zobrażenia cyfrowych radiogramów złączy spawanych, uzyskiwanych zarówno systemem cyfrowym DR, jak też analogowych po procesie digitalizacji z dobrą rozdzielczością.



Rys. 13. Radiogram cyfrowy spoiny W1. Przykład wymiarowania gniazda pęcherzy (2013).

Fig. 13. Digital radiograph of W1 weld. An example of cluster porosity (2013) dimensioning.



Rys. 14. Radiogram cyfrowy spoiny W2. Przykład wymiarowania gniazda pęcherzy (2013).

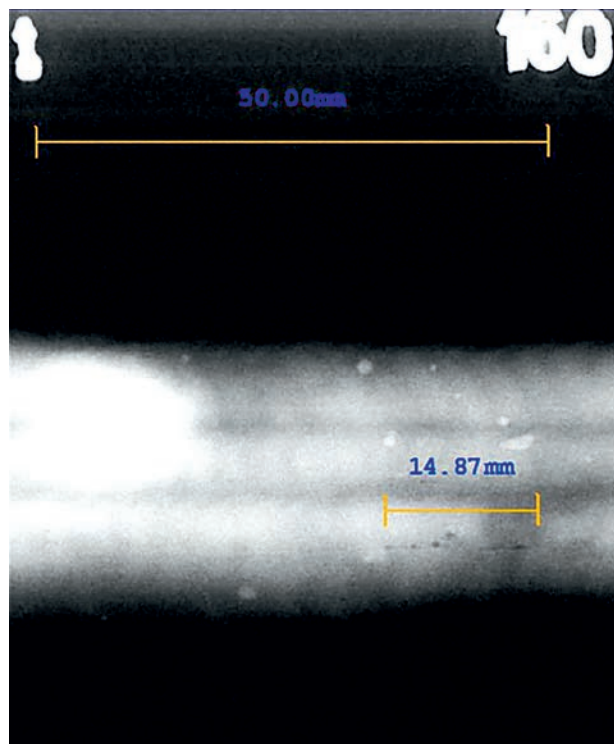
Fig. 14. Digital radiograph of W2 weld. An example of cluster porosity (2013) dimensioning.

Na Rys. 13 i 14 przedstawiono przykłady wymiarowania ulepszanego zobrażenia cyfrowego spoiny W1 oraz W2

(podwyższona czułość kontrastowa), które pozwala precyzyjnie określić rozmiary wad (gniazda pęcherzy) z wykorzystaniem oprogramowania systemowego XVu do obróbki cyfrowych zobrażeń radiograficznych

Proces digitalizacji radiogramów analogowych powinien odbywać się z rozdzielczością zapewniającą klasę DB (wymagania kontraktowe DN 1000) wg normy PN-EN ISO 14096-2 [9] i jest ona odpowiednikiem klasy B wg normy PN-EN ISO 17636-1 dla radiogramów analogowych. Wszystkie radiogramy, digitalizowane w scannerze MII-900 plus firmy Microtek, prezentowane w tym opracowaniu osiągają wymaganą klasę DB co w świetle wymagań normy PN-EN ISO 14096-2 objawia się jako niewielkie pogorszenie jakości w stosunku do oryginalnych radiogramów analogowych (wykrywalność wskaźnikowa radiogramów digitalizowanych - $W_{IQI} = w14 = 0,16$ mm; oryginalnych analogowych - $W_{IQI} = W15 = 0,125$ mm).

Wymaganie dla klasy B wg norm PN-EN ISO 17636-1, -2 narzuca, dla prześwietlanej grubości ścianki $t = 14,2$ mm rury DN 1000 - wykrywalność $W_{IQI,r} = W13 = 0,20$ mm, co oznacza spełnienie warunków digitalizacji.



Rys. 15. Radiogram analogowy zdigitalizowany spoiny W1. Przykład kalibracji kursora liniowego i wymiarowania przyklejenia (4012).

Fig. 15. Digitalized analogue radiograph of W1 weld. An example of linear cursor calibration and LOF (4012) dimensioning.

Na Rys. 15 przedstawiono przykład skalowania kursora liniowego na taśmie radiograficznej (odcinek skalowania 50 mm) oraz wymiarowania digitalizowanego ulepszanego zobrażenia analogowego spoiny W1 (podwyższona czułość kontrastowa), które pozwala precyzyjnie określić rozmiary trudno rozróżnialnej wady (przyklejenie - 4012) z wykorzystaniem oprogramowania systemowego XVu do obróbki cyfrowych zobrażeń radiograficznych.

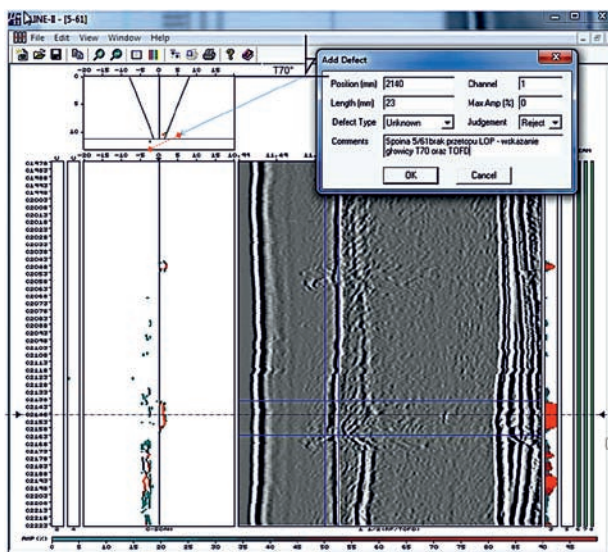
7. Badania walidacyjne złączy systemem zautomatyzowanych ultradźwięków

Poniżej zamieszczono kilka przykładów działań walidacyjnych, które zawsze powinny towarzyszyć wprowadzaniu nowej techniki badawczej (TOFD+PE) na większych przedsiębiorstwach technicznych. Temu celowi służy jednocześnie stosowanie kontroli NDT alternatywnymi metodami/technikami objętościowymi (tu zastosowano radiografię analogową z digitalizacją radiogramów i ręczne ultradźwięki).

Trzeba mieć przy tym na uwadze znane ograniczenia metod/technik objętościowych NDT, gdzie techniki radiograficzne są bardziej czułe na wykrywanie wad objętościowych, podczas gdy metody ultradźwiękowe skuteczniej wykrywają wady płaskie i nie należy oczekiwać pokrywania wyników badania w każdym przypadku.

7.1 Zmechanizowane skanowanie złącza spawanego TOFD+PE – podwyższanie wiarygodności wyniku badania

Podstawowym skanowaniem jakie wykonuje się przy badaniu spoin techniką TOFD+PE jest skanowanie typu nierównoległego, w którym symetrycznie ustawione głowice patrzą poprzecznie na spoinę i przesuwane równoległe do osi spoiny.



Rys. 16. Przykładowy zapis cyfrowy badania złącza DN 800 x 11 wykonany skanerem TOFD + PE – na rysunku pokazano sposób weryfikacji wskazań braku przetopu LOP oraz wskazań geometrii złącza przy pomocy głowic fal poprzecznych o kącie wiązki 70°, penetrujących obszar przetopu (kanały 3 i 4 – na poprzecznym B-scanie orientacyjnie zaznaczono przebieg osi wiązki głowicy i szerokość bramki próbkowania) – na podstawie takiej informacji można również zinterpretować wskazanie z głowicy TOFD jako pochodzące od braku przetopu.

Fig. 16. The exemplary digital scan of DN800 x 11 mm girth weld done by TOFD + PE scanner – on the diagram verification of lack of penetration (LOP) as well as geometrical indications are presented using additional shear wave probe of 70°, penetrated root weld area (channels 3 and 4 – on the upper B-scan scheme of probe beam axis and gate width are shown) – using this additional information one can interpret the TOFD indications of LOP in this area.

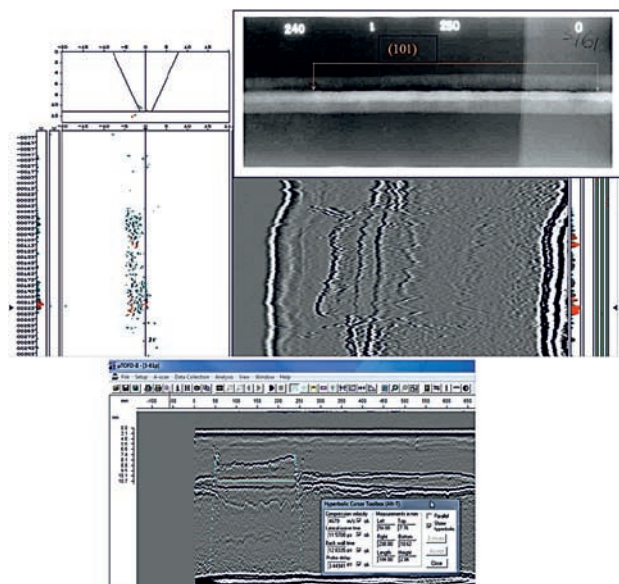
Podczas przesuwu skanera impulsy ultradźwiękowe przechodzące między głowicami (zobrazowania typu A) są

systematycznie próbkowane cyfrowo w zakresie ustawionych bramek i zapisywane w pamięci komputera. Przebiegi te są następnie przekształcane w zobrazowania typu B i C, będące obrazem spoiny w przekroju podłużnym lub poprzecznym po grubości oraz rzutem na powierzchnię obwodu zewnętrznej badanej złącza. Rys. 16 podaje przykładowy zapis cyfrowy badania objętości złącza skanerem TOFD+PE. Zobrazowanie to pozwala na lokalizację wad na obwodzie spoiny oraz na określenie długości, wysokości oraz głębokości zalegania wad w sposób cyfrowy.

Na Rys. 16 pokazano sposób wymiarowania wskazania braku przetopu oraz odróżniania go od wskazań geometrii złącza. Sonogram pokazuje również jak trudna i niejednoznaczna jest interpretacja braku przetopu tylko na podstawie wskazań dyfrakcyjnych głowicy pracującej w modzie TOFD. Podwyższanie wiarygodności badanie odbywa się w klasie badania D poprzez uzupełnienie dodatkową techniką ultradźwiękową PE, która pozwala potwierdzić wskazania ze stref przetopu i lica i krytycznie interpretować wskazania geometryczne oraz rzeczywiste wady.

7.2 Badania walidacyjne TOFD+PE

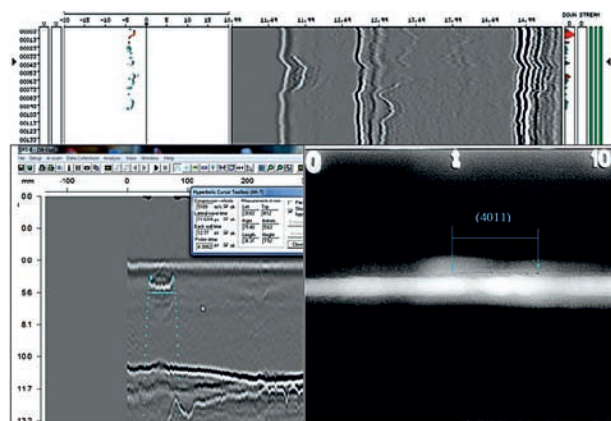
W ramach potwierdzenia odtwarzalności wyniku badania skonfrontowano wyniki kilku badań metodą ultradźwiękową z kontrolą radiograficzną lub na odwrót, ponieważ obydwie metody objętościowe były stosowane, w sposób komplementarny, podwyższający wiarygodność wyniku.



Rys. 17. Badania radiograficzne (Se-75) ujawniły występowanie pęknięcia (101) w linii przetopu o współrzędnych $X + l_x = 2410 + 192$ mm; badania walidacyjne systemem UTA potwierdziły pęknięcie (Crack - 101: $X + l_x = 54 + 184$ mm; $h = 2,86$ mm). Niezgodność początku wskazania wyniku z rozpoczęcia skanowania UTA z przesunięciem około $X_0 = -200$ mm względem „0” radiograficznego.

Fig. 17. In radiographic inspection (Se-75) a longitudinal crack (101) occurs along weld root with coordinate $X + l_x = 2410 + 192$ mm; the UTA scanning confirm an indication – interpreted as a crack - 101: $X + l_x = 54 + 184$ mm; $h = 2,86$ mm. The nonconformity of initial coordinates of both indication implies from delay about $X_0 = -200$ mm in UTA scanning in respect to radiographic coordinates.

Na Rys.17 podano zobrazowanie pęknięcia podłużnego (101) o długości $l_x = 192$ mm, uzyskane w badaniu radiograficznym (radiogram zdigitalizowany), które zinterpretowano jako wadę w przetopie. Obraz UTA - TOFD + PE nie pozostawia wątpliwości co do zgodności lokalizacji i wymiarów pęknięcia, dając dodatkową pełną informację o wysokości i przebiegu wady w przekroju grubości złącza - TOFD-B-scan.



Rys. 18. Badania walidacyjne wskazania przyklejenia wykrytego UTA (LOF: $X + l_x = 39 + 36$ mm; $h \sim 1,5$ mm); weryfikacja badania radiograficznego (Se-75) ujawniła w przyklejenie na wskazanym przez UTA odcinku (4011): $X + l_x = 45 + 35$ mm; (na radiogramie naniesiono informacyjnie początek i koniec wskazania).

Fig. 18. In the UTA has occurred LOF($X + l_x = 39 + 36$ mm; $h \sim 1,5$ mm); Validation by the radiographic inspection (Se-75) confirm an indication (LOF: $X + l_x = 39 + 36$ mm; $h \sim 1,5$ mm - on the film is viewed the course of LOF on original digitized radiograph).

Z kolei na Rys.18 pokazano badania walidacyjne wskazania przyklejenia wykrytego UTA (LOF: $X + l_x = 39 + 36$ mm; $h \sim 1,5$ mm); weryfikacja poprzez badanie radiograficzne (Se-75) ujawniła typowe dla radiografii wskazanie przyklejenia. Dokładna klasyfikacja (4011): $X + l_x = 45 + 35$ mm. Obraz UTA - TOFD + PE nie pozostawia wątpliwości co do lokalizacji i wymiarów, dając dodatkową informację o wysokości i przebiegu wady w przekroju grubości złącza TOFD-B-scan, natomiast ocena radiograficzna wymaga bardzo uważnego przeglądania radiogramu w celu wykrycia wskazania przyklejenia.

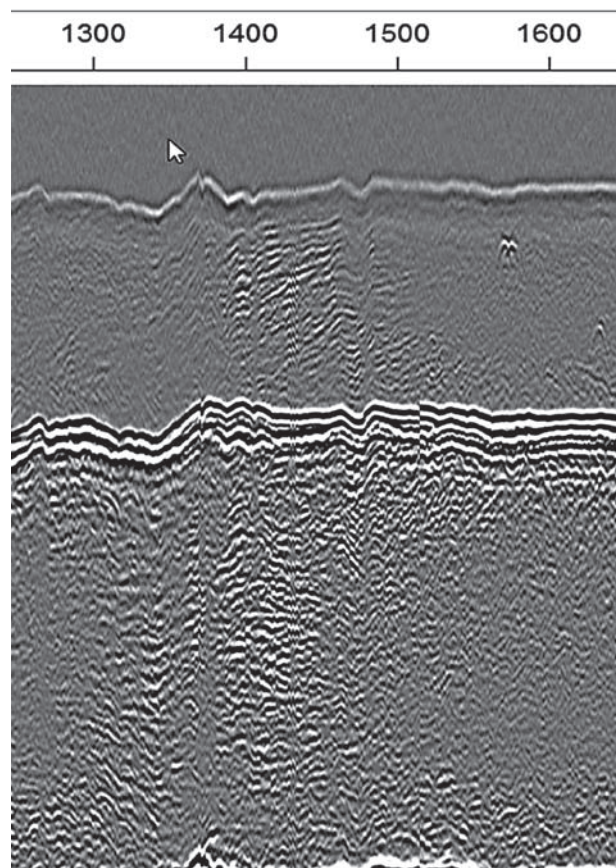
W ramach walidacji wiarygodności wyniku badania pojawił się problem interpretacji wskazań dyfrakcyjnych pojawiających w badaniach TOFD (por. Rys.19)

Stwierdzono następujące cechy charakterystyczne:

- zobrazowaniach głowic TOFD i występowały jako wskazania dyfrakcyjne, charakterystyczne dla rozproszonych wskazań punktowych;
- wskazania występowały z mniejszym lub większym nasileniem i wielkością amplitudy w całym przekroju wzdłuż grubości spoiny;
- miejsce występowania tych wskazań było zawsze związane z sąsiedztwem strefy wpływu ciepła wokół spiralnych spoin hutniczych,

W wyniku przeprowadzonej analizy oraz weryfikacyjnych badań magnetyczno-proszkowych podczas otwierania złącza, stwierdzono że występujące w tych miejscach wskazania

dyfrakcyjne (sugerujące występowanie wad o znaczącej, nieakceptowanej długości i wysokości) wynikają ze zmienionej gruboziarnistej struktury złącza hutniczego. Złącza hutnicze wykonywane są metodą spawania pod topnikiem i w ich strefie wpływu ciepła oraz w samym złączu może dochodzić do znacznego rozrostu ziarna, przy wysokich parametrach spawania.



Rys. 19. Obraz wskazań TOFD na zmienionej gruboziarnistej strukturze złącza hutniczego w strefie HAZ.

Fig. 19. The TOFD image on the coarse grained structure of longitudinal weld & HAZ.

Pokazane przykłady działań walidacyjnych potwierdzają wysoką wiarygodność zastosowanej techniki ultradźwiękowej TOFD+PE, która kumuluje w sobie wszystkie zalety związane z cyfrowym zapisem wyników badania wzdłuż długości złącza. Bardzo istotnym elementem wiarygodności wyniku jest mechanizacja procesu skanowania oraz informacje ze stref przypowierzchniowych uzyskiwane głowicami pracującymi w modzie PE, które stanowią o poprawności interpretacji wyników badania.

8. Podsumowanie

W referacie zaprezentowano niektóre istotne elementy pracy specjalisty NDT 3-go stopnia w procesach przygotowania, rozwiązywania i sterowania nietypowymi zadaniami badawczymi. W tego typu działaniach wymagana jest odpowiednia wiedza inżynierska, jak też doświadczenie w praktycznym stosowaniu wielu metod NDT. Często zdarzają się sytuacje, że badanie jedną metodą/techniką nie daje jednoznacznej odpowiedzi albo uzyskana ilość informacji

jest niewystarczająca, ze względu na znane ograniczenia każdej metody badań nieniszczących.

Zastosowanie, w sposób komplementarny, wielu technik specjalnych NDT np. radiografii i ultradźwięków pozwala w wielu przypadkach uwiarygodnić wynik i pozwolić na wydawanie opinii technicznych o badanym obiekcie.

Niezwykle istotną sprawą jest przygotowanie pisemnych procedur i instrukcji badania, które w przypadku rozwiązywania nietypowych problemów badawczych wymagają poszerzonej wiedzy, popartej często wykonywaniem wstępnych analiz i badań próbnych (porównaj kontrolę czułości badania – p. 2).

Doświadczenia nabyte przez firmę NDTEST podczas stosowania technik cyfrowych:

- radiografii bezpośredniej DR na płaskich detektorach DDA;
- zaawansowanej kombinacji ultradźwięków TOFD+PE, zaimplementowanych w postaci badań zmechanizowanych obwodowych złączy spawanych - potwierdzają, że stanowią one istotny krok naprzód w stosunku do klasycznych technik radiograficznych i ultradźwiękowych.

W procedurach walidacji urządzeń, systemów badawczych a także nowych technik badawczych dużą wagę przykładają do powtarzalności i odtwarzalności uzyskiwanego wyniku badania. Pozytywne wyniki tych procesów przekładają się w prostej linii na potwierdzenie wiarygodności wyniku badania – co jest z kolei głównym wymaganiem procesu walidacji.

Wszystkie procesy porównań zakończyły się wynikiem pozytywnym (bardzo dobra zgodność, w niektórych przypadkach – dobra), czasami informacje z porównań należy traktować jako uzupełniające i podwyższające ogólną wiarygodność wyniku badania.

Pozwala to ocenić prezentowaną technikę obrazowania bezpośredniego DR jako bardzo wiarygodne elementy nowej technologii badania radiograficznego, opartej na technikach cyfrowych.

Jako podstawowe atuty cyfrowej i zmechanizowanej techniki skanowania TOFD+PE, w kontekście podwyższania wiarygodności badania, należy wymienić:

- pełny zapis cyfrowy wyników badania z całej objętości złącza i ocena wyniku badania w czasie rzeczywistym;

- analizę wyników (również zdalnie na odległość) z możliwością dokładnego pomiaru położenia, długości, oraz głębokości i wysokości wad przy pomocy specjalnego oprogramowania;
- zobrazowanie stanu złącza w przekroju podłużnym wzdłuż głębokości, co stanowi komplementarną informację do wyników badania radiograficznego;
- podwyższoną wiarygodność wyników – wynikającą z mechanizacji skanowania oraz zastosowania techniki wielu głowic pracujących w różnych modach do potwierdzania wskazań w tych samych obszarach.

Techniki: radiografii bezpośredniej DR raz ultradźwiękowa TOFD+PE, z użyciem zmechanizowanych skanerów zostały efektywnie wdrożone przez NDTEST na obiektach rurociągowych o dużym zróżnicowaniu średnic i grubości, na różnego rodzaju instalacjach w przemyśle gazowniczym i petrochemicznym i stanowi komplementarną informację w badaniach objętościowych NDT tych obiektów.

9. Literatura/References

- [1] M. Śliwowski: Zmechanizowane badania złączy spawanych techniką radiografii cyfrowej DR, Krajowa Konferencja Badań Radiograficznych, Stary Młyn 2017.
- [2] M. Śliwowski: Zmechanizowane badanie ultradźwiękowe złączy spawanych techniką wielogłowicową TOFD+PE, Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane 2013
- [3] PN-EN12732+A1:2014-06 - Infrastruktura gazowa. Spawanie stalowych układów rurowych. Wymagania funkcjonalne
- [4] PN-EN ISO 17636-1:2013-06 - Badania nieniszczące spoin. Badanie radiograficzne. Część 1: Techniki promieniowania X i gamma z błoną
- [5] PN-EN ISO 17636-2:2013-06 - Badania nieniszczące spoin. Badanie radiograficzne. Część 2: Techniki promieniowania X i gamma z detektorami cyfrowymi
- [6] PN-EN ISO 10863:2011: Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe złączy spawanych. Zastosowanie techniki dyfrakcji fal ultradźwiękowych (TOFD)
- [7] PN-EN ISO 17640:2011: Badania nieniszczące spoin.. Badania ultradźwiękowe złączy spawanych.
- [8] PN-EN ISO 5817:2014-06 – Spawanie. Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką), Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych.
- [9] PN-EN 14096-2:2007 - Badania nieniszczące. Kwalifikacja systemów digitalizacji błony radiograficznej. Część 2: Wymagania minimalne.

Aleksandra Mazurek*

Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa

Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych w diagnostyce technicznej obiektów budowlanych metodami nieniszczącymi

The use of unmanned aerial vehicles in the technical diagnostics of buildings using non-destructive methods

ABSTRACT

The development of technology has caused the emergence of new methods of building objects diagnostics using digital images obtained using unmanned aerial vehicles (BSP). They are mainly used for observation. However, it is easy to equip the drone with additional modules or software that will increase its capabilities. Due to the non-destructive and non-invasive nature, tests can be completed very quickly, with minimal access requirements. The scale of possibilities associated with the use of a drone makes it an extremely helpful tool in the construction industry.

The article discusses the possibilities of using BSP in non-destructive diagnostics of building objects, formal and legal conditions for the use of drones in the Polish airspace, and a review of devices available on the market.

Keywords: validation; reliability of inspection result; digital radiography; digital ultrasonic; automated inspection systems.

STRESZCZENIE

Rozwój technologii spowodował pojawienie się nowych metod diagnostyki obiektów budowlanych z wykorzystaniem obrazów cyfrowych uzyskanych za pomocą bezzałogowych statków powietrznych (BSP). Stosuje się je głównie do obserwacji. Łatwo jest jednak wyposażyć drona w dodatkowe moduły lub oprogramowanie, które zwiększą jego możliwości. Ze względu na nieniszczący i nieinwazyjny charakter, badania mogą być zakończona bardzo szybko, przy minimalnych wymaganiach dotyczących dostępu. Skala możliwości związanych z użyciem drona sprawia, że może on stanowić niezwykle pomocne narzędzie w branży budowlanej.

W artykule omówiono możliwości wykorzystania BSP w diagnostyce nieniszczącej obiektów budowlanych, uwarunkowania formalno-prawne użycia dronów w polskiej przestrzeni powietrznej oraz dokonano przeglądu dostępnych na rynku urządzeń.

Słowa kluczowe: bezzałogowe statki powietrzne, badania nieniszczące, diagnostyka obiektów budowlanych, badania termowizyjne

1. Wstęp

Według badań przedsiębiorstwa analityczno-doradczego Gartner przewiduje się, że rynek fotografii i zdjęć z dronów będzie w 30% wykorzystywany przez branżę budowlaną do 2020 roku [1]. Zdjęcia z drona pozwalają na przygotowanie dokumentacji powstających budynków czy obiektów inżynierskich. Znajdują zastosowanie w czasie audytu inwestycji, rozliczeń między podwykonawcami, czy inwentaryzacji fotograficzno-filmowej terenu budowy. Umożliwiają przeprowadzanie inspekcji i ekspertyz z powietrza. Dron może wyręczać inspektorów budowlanych dokonujących ekspertyz w miejscach niebezpiecznych lub w obiektach, które wymagają dźwigów czy innego specjalistycznego sprzętu do pracy na wysokości. Wpływa to na wzrost bezpieczeństwa i obniżenie kosztów.

Technologie takie jak drony są dojrzałe i gotowe do szybkiego wdrożenia. Wkrótce mogą stać się narzędziem codziennej pracy każdego architekta, projektanta, wykonawcy czy developera.

2. Regulacje prawne

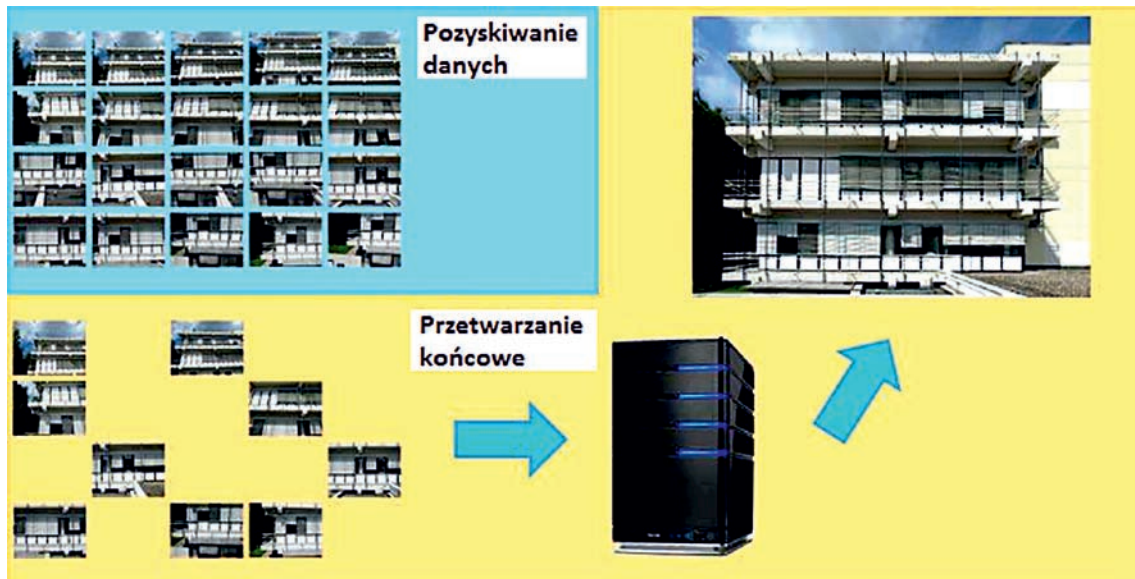
Podstawy prawne wykonywania bezzałogowych lotów powierzanych zawarte są w ustawie z dnia 3 lipca 2002 r.

Prawo lotnicze oraz w przepisach wykonawczych do ustawy. W Polsce szczegółowe zasady zostały opisane w trzech rozporządzeniach Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej:

- z 26 marca 2013 r. w sprawie wyłączenia zastosowania niektórych przepisów ustawy – Prawo lotnicze do niektórych rodzajów statków powietrznych oraz określenia warunków i wymagań dotyczących używania tych statków, które częściowo określa zasady wykonywania lotów (nowelizacja przepisów - 7 września 2016 r.);
- z 3 czerwca 2013 r. w sprawie świadectw kwalifikacji, które określa zasady licencjonowania osób wykonujących loty bezzałogowe;
- z 26 kwietnia 2013 r. w sprawie przepisów technicznych i eksploatacyjnych dotyczących statków powietrznych kategorii specjalnej, nieobjętych nadzorem Europejskiej Agencji Bezpieczeństwa Lotniczego.

Obecnie trwają prace nad projektem rozporządzenia w sprawie szczegółowego sposobu i warunków wykonywania lotów dronami w polskiej przestrzeni powietrznej oraz procedur współpracy operatorów tych statków z instytucjami zapewniającymi służby ruchu lotniczego. Rozporządzenie określi zasady wykonywania lotów poza zasięgiem wzroku osoby sterującej

*Autor korespondencyjny. E-mail: a.mazurek@itb.pl



Rys. 1. Dwuetapowy proces inspekcji elewacji [2].
Fig. 1. A two-stage process of elevation inspection [2].

dronem (aktualnie loty poza zasięgiem wzroku, ze względów bezpieczeństwa, są możliwe jedynie w wydzielonej do tego celu przestrzeni powietrznej) [8].

Wszystkie loty cywilne inne niż rekreacyjne lub sportowe kwalifikowane są jako komercyjne (pomiar, inspekcje techniczne, monitoring z powietrza), dlatego zgodnie z art. 95 ust. 2 pkt 5a [9], osoba pilotująca BSP musi posiadać świadectwa kwalifikacji operatora bezzałogowego statku powietrznego UAVO. Do realizacji lotów w zasięgu wzroku operatora niezbędne są uprawnienia VLOS (Visual Line of Sight operator). Zasady licencjonowania personelu lotniczego, dotyczące operatorów bezzałogowych statków powietrznych, określono w Rozporządzeniu Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 7 czerwca 2013 r. w sprawie świadectw kwalifikacji (Dz. U. 2013, nr 664). Dokument precyzuje zasady i eksploatacyjnych dotyczących statków powietrznych kategorii specjalnej, nieobjętych nadzorem Europejskiej Agencji Bezpieczeństwa Lotniczego (Dz.U. 2013, nr 524). Zgodnie z tym rozporządzeniem, na wykonywanie lotów w kategorii specjalnej dla bezzałogowych statków powietrznych o masie przekraczającej 25 kg konieczne jest uzyskanie specjalnej zgody.

Zagadnienie lotów bezzałogowych jest przedmiotem prac w wielu państwach członkowskich UE. Również Komisja Europejska dostrzegła konieczność harmonizacji przepisów w tej sprawie. W marcu 2015 r. w Rydze przyjęto deklarację dotyczącą dalszego rozwoju systemów bezzałogowych. Trwają prace nad propozycją zmiany przepisów UE, umożliwiających ich rozwój [8].

3. Inspekcja obiektów budowlanych

Kontrolę stanu technicznego obiektów są oparte na wizualnych metodach badawczych. Budynki wielopiętrowe, mosty, tamy, wieże chłodnicze to obiekty o utrudnionym dostępie. Użycie bezzałogowych statków powietrznych jako systemu czujników powietrznych jest wygodnym sposobem przechwytywania wymaganych danych. Zastosowania dronów

w badaniach nieniszczących koncentruje się na wykrywaniu i analizie uszkodzeń oraz monitorowaniu stanu obiektu.

Inspekcję budynku z wykorzystaniem wysokorozdzielczych obrazów cyfrowych można podzielić na dwa etapy [2]: pozyskiwanie danych (podczas lotu) i cyfrowe przetwarzanie (po zakończeniu lotu) (Rys.1.).

Prędkość lotu w czasie inspekcji musi być dość ograniczona, ponieważ szybkie zmiany kąta pochylenia powodują, że obrazy są zmniejszone i nie są wyrównane przez automatyczną stabilizację kamery. W trybie nagrywania danych zintegrowana kamera cyfrowa jest sterowana przez automatyczną sekwencję fotografowania, która może być ustawiona na częstotliwość do 3 obrazów na sekundę. Można również ręcznie sterować aparatem, aby w razie potrzeby ustawić zoom, ostrość i migawkę.

Dane zapisane w kamerze są odczytywane po wylądowaniu. Automatyczne uruchomienie kamery powoduje, że każdy lot generuje dużą ilość danych, np. w 15 minutowym locie uzyskujemy ponad 1200 zdjęć. Jest to ilość o wiele większa niż wymagana, ale spora część fotografii jest bezużyteczna, co wynika z niezupełnie odfiltrowanych wibracji z platformy lub zewnętrznych wpływów takie jak podmuchy wiatru.

Kolejnym etapem jest cyfrowe przetwarzanie końcowe wybranych obrazów przy zastosowaniu dostępnych na rynku oprogramowania. Metody łączenia lub mozaikowania są oparte na technikach rozpoznawania wzorców, które analizują podobne struktury zawartości obrazu, zwane punktami dopasowania, w dwóch lub więcej obrazach i łączą je ze sobą w oparciu o te punkty.

W zakresie kontroli uszkodzeń opracowano oprogramowanie do przetwarzania obrazu, które pozwala na wykrywanie pęknięć i rys oraz ich dalszą analizę. Uzyskane obrazy w wysokiej rozdzielczości pozwalają scharakteryzować rozmiary uszkodzenia z dokładnością do milimetrów [2]. Istnieje możliwość zaprogramowania algorytmów filtrowania w celu automatycznego wyszukiwania defektów.

4. Badania termowizyjne z wykorzystaniem dronów

Termografia to proces obrazowania w paśmie średniej podczerwieni. Pozwala na rejestrację promieniowania ciepłego emitowanego przez ciała fizyczne, które jest wykorzystywane przez kamerę termowizyjną w zakresie pomiędzy promieniowaniem widzialnym i radiowym. Stosując kamerę termowizyjną, możemy ocenić stan izolacji termicznej, szczelność stolarki budowlanej czy ocenić jakości wykonanych prac termomodernizacyjnych budynku. Widoczne na obrazach w podczerwieni ewentualne różnice temperatur mogą zobrazować miejscową nieszczelność lub zawilgocenie. Kamery termowizyjne są w stanie uchwycić nawet bardzo małe różnice temperatury na poziomie $0,1^{\circ}\text{C}$. Obraz przedstawiony za pomocą kamery termowizyjnej jest wielokolorowy, gdzie każdy kolor przedstawia inną temperaturę.

Przeszkodą w wykonaniu pomiaru kamerą termowizyjną jest utrudniony dostęp do poszczególnych elementów obiektu budowlanego ze względu na duże wysokości. Rozwiązaniem jest połączenie kamery termowizyjnej z bezzałogowym statkiem powietrznym. Drony z kamerą termowizyjną umożliwiają dokładną diagnostykę elewacji i dachów. Do tego rodzaju pomiarów zalecane jest użycie kamer radiometrycznych, które pozwalają na odczyt wartości temperatury w dowolnym punkcie zapisanego obrazu w podczerwieni [3].

Drony sprzęgnięte z kamerami termowizyjnymi mogą być wykorzystane również do kontroli obiektów przemysłowych, takich jak kominy, wieże chłodnicze, wieże wodne,

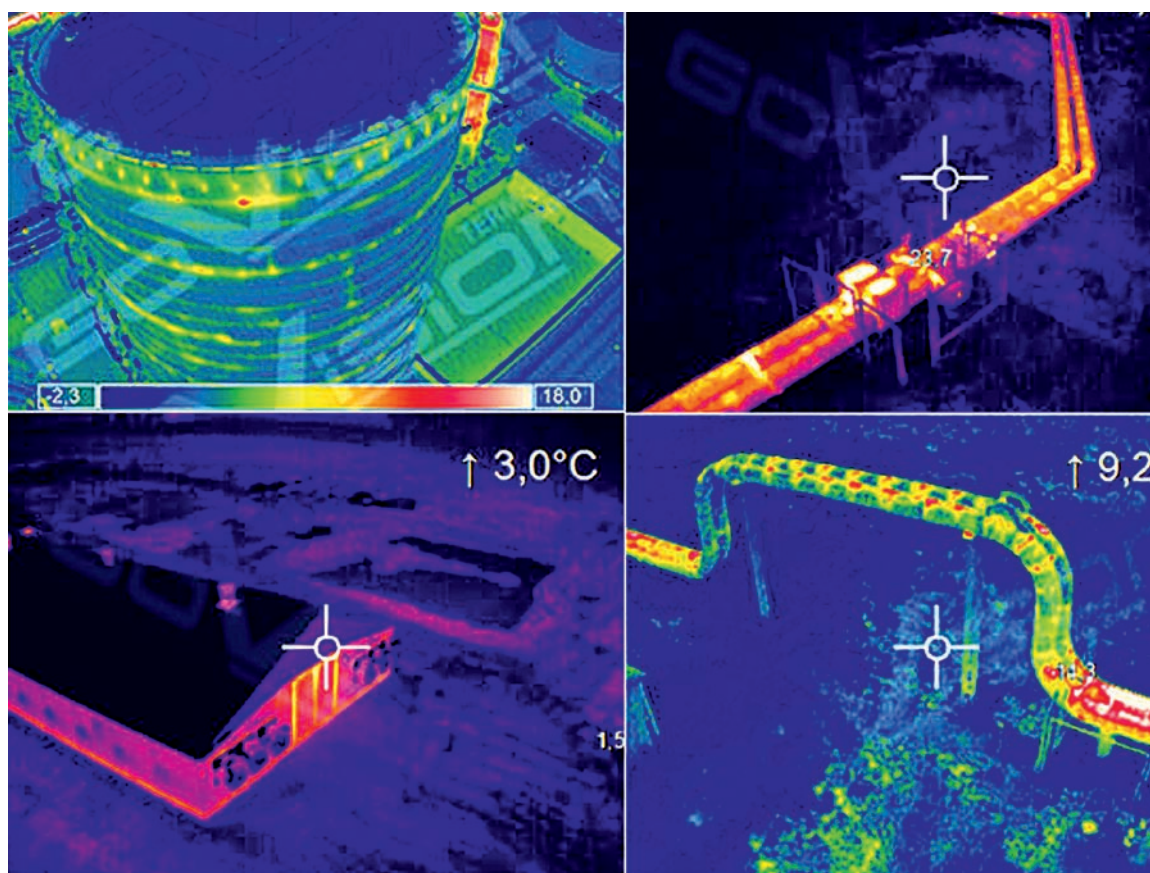
zbiorniki i rurociągi (Rys. 2.). Efekty zastosowania bezzałogowych platform wyposażonych w kamerę termowizyjną przedstawiono w artykule: Krawczyk, Mazur, Sasin, Stokłosa, 2015 [4] dotyczącym badania energochłonności budynków mieszkalnych, Zhang, Jung, Sohn, Cohen, 2015 [5] o kontroli izolacji dachu oraz López-Fernández, Lagüela, Picón, González-Aguilera, 2015 [6] analiza dachu do instalacji paneli słonecznych.

5. Sprzęt dostępny na rynku

Ogólna budowa i wygląd dronów jest podobny. Wyposażone są w śmigła w ilości od trzech do ośmiu (tab. 1), ramiona na których śmigła i silniki są umieszczone, oraz podstawę na której lądują. Różnią się wielkością, masą i siłą nośną, czyli masą ładunku jaki mogą udźwignąć. Najmniejsze drony mieszczą się na dłoni i uniosą najwyżej pojedyncze gramy. Największe przekraczają metr średnicy i mogą unieść kilkanaście kilogramów i więcej.

Zaletą bezzałogowych statków powietrznych jest prosta konstrukcja, co zmniejsza prawdopodobieństwo awarii. Parametry lotu regulowane są wyłącznie prędkością obrotową silników i śmigieł. Wyposażone są w skomplikowaną elektronikę i szereg czujników, takich jak akcelerometr, żyroskop, GPS, czujniki zbliżeniowe i optyczne.

Rozróżniane są dwie metody sterowania dronem. Pierwsza z nich to aplikacja, którą można zainstalować na smartfonie lub tablecie. Mamy wtedy do dyspozycji akcesoria dodatkowe, które polepszą wrażenia i ułatwią obsługę. Druga



Rys. 2. Badania wykonane za pomocą drona z kamerą termowizyjną [7].

Fig. 2. Research carried out using a drone with a thermal imaging camera [7].

Tab. 1. Rodzaje dronów ze względu na ilość śmigieł [11].

Tab. 1. Types of drones due to the number of propellers [11].

Cechy	Tricopter	Quadrocopter	Hexacopter	Octocopter
Ilość śmigieł	3 śmigła	4 śmigła	6 śmigieł	8 śmigieł
Rozmiar	Mały	Średni	Duży	Największy
Udźwig	Bardzo mały	Średni	Duży	Największy
Szybkość	Mała	Średnia	Duża	Największa
Ciężar	Niski	Umiarkowany	Wysoki	Najwyższy
Trudność sterowania	Wysoka	Umiarkowana	Niska	Najniższa
Odporność na złe warunki pogodowe	Niska	Średnia	Wysoka	Najwyższa
Dla kogo?	Dla początkujących/zaawansowanych	Dla początkujących/zaawansowanych	Dla zaawansowanych	Dla profesjonalistów
Cena	Niska	Umiarkowana	Wysoka	Najwyższa

metoda sterowania to osobny nadajnik radiowy dołączony na zestawu, który zaopatrzony jest we wskaźniki m.in. wychylenia, stan baterii, czy prędkości. Większość profesjonalnych dronów może być sterowana przez dwóch operatorów. Jeden z nich steruje dronem, a drugi kamerą. Wpływa to na bezpieczeństwo lotu i lepszą jakość wykonywanych ujęć.

Drony do zastosowań profesjonalnych charakteryzują się doskonałą zwrotnością, co pozwala na szybką zmianę pozycji i wykonywanie płynnych ujęć. Posiadają systemy zmniejszające ryzyko zderzenia z przeszkodą oraz ponadprzeciętną wytrzymałość. Przydatna jest również blokada wysokości (dron unosi się w stałym punkcie nad ziemią), opcja automatycznego lądowania oraz elementy wyposażenia takie jak nadajnik GPS i kamera HD. Sprzęt z czujnikami podczepieniami zapewnia zdolność do obserwacji w nocy, a dzięki radarom z syntetyczną aperturą drony mogą wykonywać zdjęcia o wysokiej rozdzielczości bez względu na aktualne warunki pogodowe [10]. W ofercie rynkowej dostępne są również drony na indywidualne zamówienie. Firmy są w stanie skonfigurować i zbudować prawie każdy sprzęt.

6. Podsumowanie

Dynamiczny rozwój bezzałogowych statków powietrznych pokazuje, że w najbliższym czasie nastąpi wzrost zastosowań dronów w badaniach konstrukcji mostowych, budynków wielokondygnacyjnych, kominów i innych obiektów budowlanych. Stosowanie technologii bezzałogowych wymaga wprowadzenia odpowiednich standardów bezpieczeństwa przy wykonywaniu inspekcji, przeglądów i pomiarów.

Przed wykonaniem bezzałogowych lotów należy uzyskać świadectwo kwalifikacji operatora bezzałogowego statku powietrznego oraz wykupić ubezpieczenie OC. Dodatkowo parametry techniczne bezzałogowego statku powietrznego oraz kamery muszą być odpowiednie dla wykonania nalożonych zadań technicznych, a operator musi przeprowadzić ocenę terenu pod względem bezpieczeństwa lotu oraz uzyskać niezbędne pozwolenia.

W badaniach nieniszczących drony są stosowane do skanowania obiektów budowlanych w celach inspekcyjnych i monitorujących za pomocą kamery cyfrowej o wysokiej

rozdzielczości. Sprawdzają się również w przypadku wystąpienia niewidocznych dla oka uszkodzeń czy awarii (np. na dachach dużych obiektów przemysłowych, mostach). Pozwalają kontrolować na bieżąco stan takich obiektów, a także identyfikować ewentualne pęknięcia i uszkodzenia, ogniska korozji czy inne defekty. Wyposażone w odpowiedni sprzęt mogą być stosowane do inspekcji termicznych budynków i innych obiektów budowlanych. Na podstawie mapy termicznej pozwalają ustalić, jak wiele energii elektrycznej i ciepłej zużywają sfilmowane obiekty budowlane.

Do najważniejszych cech bezzałogowych statków powietrznych zaliczamy: zdolność do wykonywania zdjęć w trudnych warunkach, niskie koszty operacyjne wynikające z możliwości obserwacji dużego obszaru, oszczędność czasu, zdolność do obsługi cyfrowego przetwarzania zdjęć lotniczych i względna niezależność od warunków atmosferycznych.

Przy wyborze profesjonalnego drona warto zwrócić uwagę na kilka czynników, które będą miały wpływ na użytkowanie sprzętu. Istotna jest np. bateria, od której zależy maksymalny czas lotu drona, sposób sterowania – może do tego służyć specjalny kontroler lub smartfon i parametry kamery.

7. Literatura/References

- [1] <http://www.izolacje.com.pl/aktualnosc/id3793,drony-jak-wykorzystac-ich-potencjal> (dostęp na dzień 1.08.2018r.).
- [2] C. Eschmann, C.M. Kuo, C.-H. Kuo, C. Boller, Unmanned Aircraft Systems for Remote Building Inspection and Monitoring. 6th European Workshop on Structural Health Monitoring – Th.2.B.1, 1–8, 2012. Pobrań z: <http://www.ndt.net/article/ewshm2012/papers/th2b1.pdf> (dostęp na dzień 15.07.2018r.).
- [3] P. Kowalski, K. Bielecki, Zastosowanie termowizji z wykorzystaniem dronów w budownictwie, 2014. Pobrań z: http://www.inzynierbudownictwa.pl/technika,narzedzia_i_maszy-ny,artykul,zastosowanie_termowizji_z_wykorzystaniem_dronow_w_budownictwie,7730 (dostęp na dzień 12.06.2018r.).
- [4] J.M. Krawczyk, A.M. Mazur, T. Sasin, A.W. Stokłosa, Infrared Building Inspection with Unmanned Aerial Vehicles. Transactions of the Institute of Aviation, 3 (240), 32–48, DOI: 10.5604/05096669.1194965, 2015.
- [5] L. López-Fernández, S. Lagüela, I. Picón, D. González-Aguilera, Large Scale Automatic Analysis and Classification of Roof Surfaces for the Installation of Solar Panels Using a Multi-Sensor Aerial Platform. Remote Sens, 7, 11226–11248, 2015.
- [6] J. Zhang, J. Jung, G. Sohn, M. Cohen, Thermal Infrared Inspection of Roof Insulation Using Unmanned Aerial Vehicles. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL -1/ W4, 381–386, 2015.
- [7] <https://www.govision.pl/uslugi/pomiary-i-inspekcje-termowizyjne-z-drona-badania> (dostęp na dzień 10.07.2018r.).
- [8] <http://www.ulc.gov.pl/pl/personel-lotniczy/346-departamenty/drony> (dostęp na dzień 10.07.2018r.).
- [9] Ustawa z dnia 3 lipca 2002 r. – Prawo lotnicze (Dz. U. z 2018 r. poz. 1183)
- [10] <http://www.komputerswiat.pl/centrum-wiedzy-konsumenta/hobby-i-edukacja/wszystko-o-dronach/wszystko-co-musisz-wiedziec-o-dronach.aspx> (dostęp na dzień 10.06.2018r.).
- [11] <https://jakdobrzekupic.pl/jakiego-drona-kupic/> (dostęp na dzień 20.07.2018r.).

Marcin Lewandowski*, Mateusz Walczak, Beata Witek, Jakub Rozbicki, Tomasz Steifer
Laboratorium Elektroniki Profesjonalnej, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

Demonstrator przenośnego systemu Phased-Array z funkcją Full-Matrix Capture

A portable Phased-Array system demonstrator with Full-Matrix Capture function

ABSTRACT

Phased-Array (PA) ultrasonic systems enable the detection and evaluation of defects with multi-element electronic scanning heads. Advanced beam steering and visualization make it easy to explore complex geometries. However, it should be remembered that the classic PA method is based on the same physical principles as standard single-element probes and has the very same limitations. In our laboratory we are working on the implementation of a new class of UT imaging methods, namely Full-Matrix Capture (FMC) and Total Focusing Method (TFM) techniques.

These methods provide completely new possibilities for the reconstruction of defect images and allow to obtain a uniform lateral resolution throughout the depth of the test. For this purpose, we have built a portable PA system demonstrator equipped with FMC and TFM functions. Acquisition of a full array of echoes and software processing on the built-in GPU (Nvidia® Tegra) provide great opportunities for signal processing and analysis. The demonstrator is equipped with 32 RX channels in a 32:128 configuration and is compatible with standard Olympus® PA probes.

Keywords: NDT UT; Phased-Array; Full-Matrix Capture (FMC); GPU

STRESZCZENIE

Ultradźwiękowe systemy Phased-Array (PA) umożliwiają detekcję i ocenę wad za pomocą wieloelementowych głowic ze skanowaniem elektronicznym. Zaawansowane metody kierowania wiązki oraz wizualizacji znacznie ułatwiają badania obiektów o skomplikowanej geometrii. Należy jednak pamiętać, że klasyczna metoda PA bazuje na tych samych zasadach fizycznych, co skanowanie standardowymi głowicami jednoelementowymi i posiada te same ograniczenia. W naszym laboratorium pracujemy nad implementacją nowej klasy metod obrazowania UT, które wykorzystują technikę Full-Matrix Capture (FMC) oraz Total Focusing Method (TFM). Metody te dają zupełnie nowe możliwości rekonstrukcji obrazów wad i pozwalają na uzyskanie jednolitej rozdzielczości poprzecznej w całej głębokości badania. W tym celu zbudowaliśmy demonstrator przenośnego systemu PA wyposażony w funkcje FMC i TFM. Akwizycja pełnej macierzy ech oraz przetwarzanie software na wbudowanym procesorze GPU (Nvidia® Tegra) zapewniają duże możliwości przetwarzania i analizy sygnałów. Demonstrator jest wyposażony w 32-kanalną akwizycję w konfiguracji 32:128 i współpracuje ze standardowymi głowicami PA firmy Olympus®.

Słowa kluczowe: UT; Phased-Array; akwizycja pełnej macierzy; GPU

1. Wstęp

Technika UT Phased-Array powoli wypiera klasyczne aparaty defektoskopowe z głowicami jednoelementowymi. Sukces tej metody, to przede wszystkim jej niewątpliwe zalety tj. wyższa jakość inspekcji poprzez różne tryby obrazowania wad, zwiększona prędkość badania i nowe możliwości skanowania obiektów (skany liniowe, kątowe), ale także standaryzacja procedur i coraz większa dostępność sprzętu.

Dostępne obecnie na rynku systemy PA pozwalają na wizualizację w czasie rzeczywistym obrazów 2D za pomocą skanowania wiązką ultradźwiękową i rekonstrukcji obrazu metodą beamformingu (tzw. prawa ogniskowania). Trzeba pamiętać, że taki sposób działania opiera się na tych samych prawach i podlega tym samym ograniczeniom, co dla standardowej głowicy jednoelementowej o analogicznym rozmiarze i ogniskowaniu [1].

W pracach naukowych coraz chętniej do rekonstrukcji stosuje się metody syntetycznej apertury (ang. SAFT – Synthetic Aperture Focusing Technique), a w szczególności metody akwizycji pełnej macierzy (ang. FMC – Full Matrix Capture) i metoda pełnego ogniskowania (ang. TFM – Total Focusing Method) [2, 3]. Te metody otwierają zupełnie nowe możliwości obrazowania wad oraz zaawansowanego przetwarzania sygnałów ech w.cz.. Implementacja metod FMC/TFM w aparaturze wymaga nowych, znacznie bardziej wydajnych

systemów akwizycji i przetwarzania cyfrowego sygnałów.

W 2014 w naszym laboratorium opracowaliśmy w pełni uniwersalną i programowalną ultradźwiękową platformę badawczą – USPlatform [4], która umożliwia podłączenie standardowych głowic PA firmy Olympus® oraz wspiera metody FMC/TFM. W platformie tej po raz pierwszy zastosowaliśmy przetwarzanie w czasie rzeczywistym na GPU (Graphics Processing Unit). Wewnętrzna architektura przesyłania danych zapewnia przepustowość do 6GB/s, a wbudowany klaster kart GPU zapewniał niemal nieograniczone możliwości obróbki sygnałów.

O ile duże platformy badawcze sprawdzają się w laboratorium, to do realnych zastosowań przemysłowych potrzebne są urządzenia przenośne i zasilane bateryjnie. Rozwój mobilnych procesorów GPU spowodował, że wymagana moc obliczeniowa jest już dostępna w rozwiązaniach zasilanych bateryjnie. Po przeprowadzeniu analizy wykonalności opracowaliśmy demonstrator przenośnego systemu Phased-Array z technologią FMC.

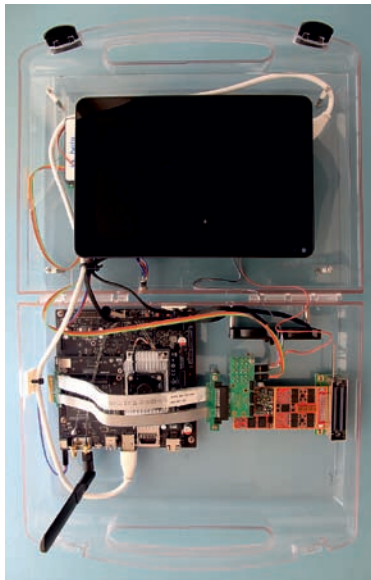
2. Demonstrator przenośnego systemu Phased-Array z funkcją FMC

Na zdjęciu (Rys. 1) widoczny jest opracowany demonstrator przenośnego defektoskopu Phased-Array. Urządzenie zostało zbudowane w oparciu o wysoko zintegrowany moduł ultradźwiękowy US-OEM (produkcji us4us sp. z o.o.) – czerwony moduł po prawej stronie na Rys. 1. Moduł ten jest kompletnym

*Autor korespondencyjny. E-mail: mlewa@ippt.pan.pl

rozwiązaniem nadawania i akwizycji sygnałów ultradźwiękowych obsługującym 128 kanałów nadawczych i 32 kanały odbiorcze (konfiguracja 128:32). Moduł OEM jest podłączony przez interfejs PCIe do modułu ewaluacyjnego z procesorem Nvidia® Tegra X2 (widoczny na dole po lewej stronie). Do wizualizacji wykorzystywany jest panel LCD (widoczny w górnej części). Obecnie całość rozwiązania jest zasilana ze źródła niskiego napięcia, ale docelowo możliwe jest wyposażenie go w zasilanie akumulatorowe. System współpracuje ze standardowymi głowicami PA firmy Olympus®.

Surowe sygnały ech z 32 kanałów odbiorczych trafiają do procesora GPU, gdzie realizowane jest pełne przetwarzanie sygnałów i rekonstrukcja obrazu. Ponieważ całość obliczeń jest wykonywana w algorytmie softwarowym na GPU (implementacja w CUDA), możliwa jest realizacja dowolnej metody rekonstrukcji obrazu – tj. zarówno klasycznego beamformingu, jak i nowych metod syntetycznej apertury.



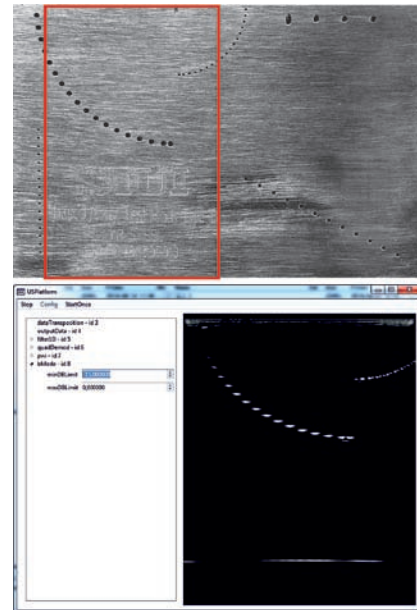
Rys. 1. Widok opracowanego demonstratora przenośnego systemu Phased-Array.

Fig. 1. View of the developed Phased-Array mobile demonstrator.

Przykładowo, zaimplementowano metodę obrazowania falą płaską (ang. PWI – Plane Wave Imaging) [5] dla nadawania pod 11 kątami. Do testów użyto głowicy Olympus 5L128 i częstotliwość nadawczą 5 MHz. Wynik obrazowania B-mode bloku testowego (model: SIUI Phased-Array Type-B, 1018 Steel) pokazano na (Rys. 2). Otwory $\varnothing = 2$ mm (po lewej stronie) są dobrze widoczne, i rozdzielają się, natomiast otwory $\varnothing = 1$ mm (po prawej stronie) są gorzej widoczne, co wynika ze zbyt niskiej częstotliwości nadawczej (dla 5 MHz długość fali dla stali 1018 wynosi $\lambda \sim 1.2$ mm).

Należy podkreślić, że metoda PWI wymaga znacznie krótszego czasu akwizycji, co pozwala na zwiększenie prędkości skanowania. Klasyczne skanowanie dla 128 elementowej głowicy wymaga wykonania 128 nadań, dla zastosowanego PWI tylko 11 nadań. W tym wypadku ograniczeniem prędkości odświeżania obrazu nie jest czas akwizycji (jak to zwykle bywa w aparatach Phased-Array), tylko czas przetwarzania. Dla tej metody obrazowania na procesorze Tegra X1 uzyskano

odświeżanie 5 obrazów/sek. Dostępność nowych bardziej wydajnych procesorów GPU będzie stopniowo zwiększać prędkość rekonstrukcji i odświeżania obrazu.



Rys. 2. (na górze) Blok testowy Phased-Array (model: SIUI Phased-Array Type-B, 1018 Steel); (na dole) zrekonstruowany obraz B-mode, zaznaczonego fragmentu wzorca, metodą PWI.

Fig. 2. (top) The Phased-Array test block (model: SIUI Phased-Array Type-B, 1018 Steel); (bottom) The reconstructed B-mode image using the PWI method.

3. Podsumowanie

Implementacja metod FMC/TFM w systemach Phased-Array wymaga nowej klasy aparatów. Zastosowanie softwarowych metod przetwarzania i rekonstrukcji obrazów z wykorzystaniem procesorów GPU pozwala uzyskać obrazowanie w czasie rzeczywistym. Opracowany demonstrator pokazuje, że już dzisiaj możliwe jest także wdrożenie zaawansowanych metod przetwarzania w sprzęcie przenośnym z wykorzystaniem mobilnych procesorów GPU.

Podziękowanie dla firmy Olympus Polska Sp. z o.o. za wypożyczenie bloku testowego do badań.

4. Literatura/References

- [1] M. Lewandowski, „Systemy głowic wieloprzetwornikowych – podstawy fizyczne”, XVII Seminarium NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW, Zakopane, 8-11 marca 2011.
- [2] C. Holmes, B. W. Drinkwater, P. D. Wilcox, “Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation”, *NDT&E International* 38(2005):701–711.
- [3] M. Lewandowski, „Nowe metody i zastosowania ultradźwiękowych systemów Phased-Array”, XXI Seminarium NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW, Zakopane, 18-20 marca 2015.
- [4] M. Lewandowski, „Nowe metody syntetycznej apertury dla systemów Phased-Array”, XXII Seminarium NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW, Zakopane, 18-20 marca 2016.
- [5] A. Voltera, “Plane Wave Imaging Using Phased Array”, 40th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, AIP Conf. Proc. 1581, 124-131 (2014); doi:10.1063/1.4864811.

Marek Chalimoniuk*, Artur Kułasza
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa

Możliwości zastosowania metody tomografii komputerowej (CT) w lotnictwie

Possible application of X-ray computed tomography (CT) in aviation

ABSTRACT

The article describes the possibilities of the application of the CT method in aviation.

The modern non-destructive diagnostic method, which is the computer tomography, enables to examine all materials applied in the widely understood aviation industry. From chromium-nickel alloys used to manufacture turbine blades, through composite materials, to runway pavements. This method enables to test all aggregates, without the necessity to dismantle them e.g. during commission tests of aircraft incidents.

The article showed the possibilities and limitations of conducting tests with the CT method in particular examples of aircraft details.

Keywords: NDT, computed tomography CT, aviation

STRESZCZENIE

W artykule omówione zostały możliwości zastosowania metody CT w lotnictwie.

Nowoczesna nieniszcząca metoda diagnostyczna, jaką jest tomografia komputerowa, pozwala na badania praktycznie wszystkich materiałów stosowanych w szeroko rozumianej branży lotniczej - od stopów chromowo - niklowych stosowanych do produkcji łopatek turbinowych, poprzez materiały kompozytowe, aż do nawierzchni lotniskowych. Metoda ta pozwala także na badania całych agregatów, bez konieczności ich demontażu np. podczas badań komisyjnych zdarzeń lotniczych.

W artykule pokazano możliwości i ograniczenia zastosowania badań metodą CT na konkretnych przykładach detali lotniczych.

Słowa kluczowe: NDT, tomografia komputerowa CT, lotnictwo

1. Wstęp

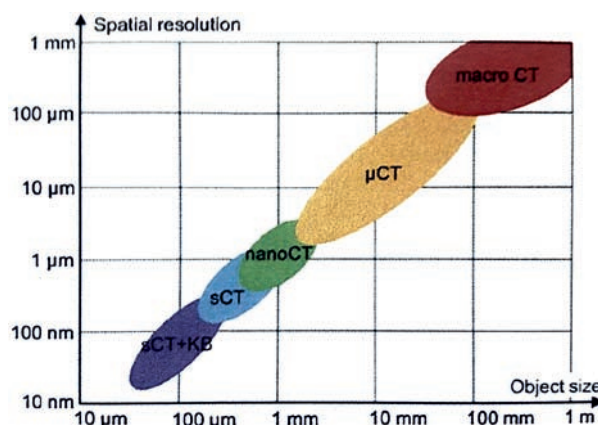
W lotnictwie znajdują zastosowanie wszystkie tradycyjne, jak i nowo rozwijane nieniszczące metody diagnostyczne, do których należy tomografia komputerowa CT.

Nowoczesna nieniszcząca metoda diagnostyczna tomografii komputerowej pozwala na badania praktycznie wszystkich materiałów stosowanych w szeroko rozumianej branży lotniczej - od stopów chromowo - niklowych stosowanych do produkcji łopatek turbinowych, poprzez materiały kompozytowe, aż do nawierzchni lotniskowych. Metoda ta pozwala także na badania całych agregatów, bez konieczności ich demontażu np. podczas badań prowadzonych przez Komisje Badania Wypadków Lotniczych Lotnictwa Państwowego.

Metoda CT w głównej mierze służy do wykrywania wtrąceń, pustek powietrznych i pęknięć wewnętrznych w materiałach. Programy komputerowe np. VGStudio Max, pozwalają nam rozszerzyć możliwości analizowania obrazów poprzez pomiary defektów, a także pomiary geometrii wewnętrznej i zewnętrznej badanych detali z bardzo dużą dokładnością [1].

Dokładność badania w metodzie CT uzależniona jest głównie od wymiarów zewnętrznych materiału oraz jego geometrii. Dla mikro detali o wymiarach $2 \div 5$ mm możemy wykonywać badania z rozdzielczością na poziomie $2 \div 3$ mikrometrów. Wraz ze zwiększaniem rozmiarów detalu zmniejsza się rozdzielczość, a za tym dokładność badania.

Zależność geometryczną można przedstawić jak na wykresie 1.



Rys. 1. Zależność rozdzielczości badania CT od rozmiaru obiektu badań [2].

Fig. 1. The dependence of the CT examination resolution on the size of the test object [2].

Tab. 1. Zalety i wady metody CT.

Tab. 1. Advantages and disadvantages of the CT method.

Zalety	Wady
- metoda NDT; - możliwość analizowania geometrii wewnętrznej; - możliwość badania materiałów o złożonych kształtach, grubościach; - możliwość badania wszystkich rodzajów materiałów	- ograniczony wymiar możliwy do prześwietlenia zależny od mocy lampy; - metoda stacjonarna; - ograniczone możliwości powtarzalności pomiarów; - powstawanie artefaktów

W tabeli 1 przedstawiono ogólne zalety i wady metody CT w odniesieniu do większości materiałów, przy założeniu, że badany detal jesteśmy w stanie prześwietlić i otrzymać

*Autor korespondencyjny. E-mail: marek.chalimoniuk@itwl.pl

obraz o jakości zapewniającej możliwość wiarygodnej analizy.

Możliwości i ograniczenia zastosowania badań metodą CT pokazano na konkretnych przykładach detali lotniczych.

2. Zastosowanie metody CT

W Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych w Warszawie badania prowadzone są z wykorzystaniem będącego na wyposażeniu tomografu firmy GE V/tome/x m.

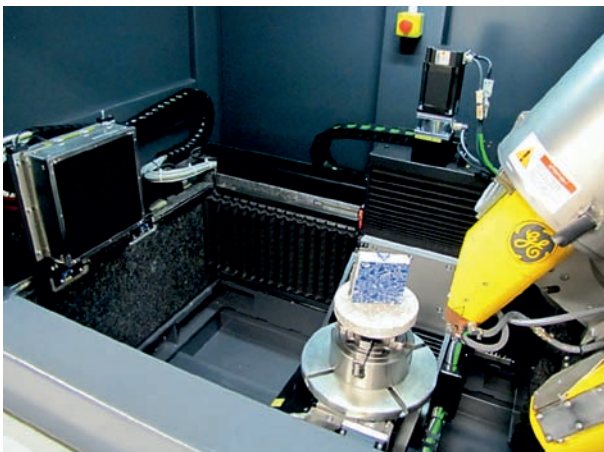
Podczas badań analizowano możliwości zastosowania metody CT między innymi do próbek betonów lotniskowych, łopatek turbinowych wykonanych ze stopów niklo-chromowych, materiałów kompozytowych, materiałów wybuchowych oraz elementów elektronicznych.

W stosunku do nawierzchni betonowych prowadzono badania nad możliwością oceny napowietrzania betonu w porównaniu do metody standardowej - zgłady badane pod mikroskopem i przeliczenia matematyczne (metoda wg normy PN - EN 480-11)

Ocena charakterystyki porów powietrznych w badanych próbkach wykazała, że wyniki badania dotyczące całkowitej zawartości powietrza otrzymane metodą CT w stosunku do metody mikroskopowej analizy obrazu różnią się o ok 0,5%÷1%. Jednak metodą CT analizujemy pory w ich realnym, trójwymiarowym kształcie, a nie aproksymując matematycznie płaskie obrazy. Ponadto badanie CT wraz z analizą pojedynczej próbki trwa ok 3-4 godzin - metodą tradycyjną zajmuje ok. 2 dni.

W tym przypadku metoda CT okazała się bardzo przydatna i trwają prace nad możliwością zastosowania jej w praktyce laboratoryjnej. Związane to jest z koniecznością zmian dotychczasowych norm i procedur, gdyż w trakcie badań mających na celu określenie zawartości mikroporów konieczne jest wykonanie bardzo małych próbek o średnicy ok. 1 cm.

Na rys. 2 przedstawiono przygotowane zgłady betonowe, badane metodą tomografii (próbka 10x10 cm) [3].

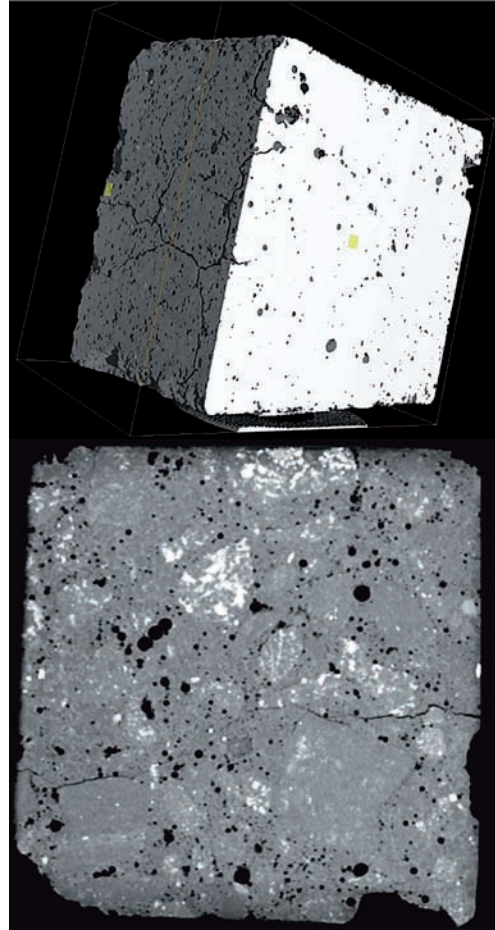


Rys. 2. Znormalizowana próbka betonu o wymiarach 10x10 cm podczas badania.

Fig. 2. A normalized concrete sample of 10x10 cm during the test.

Na rys. 3 pokazano obraz próbki betonowej z widocznymi pęknięciami, porami i pustkami powietrznymi.

W badaniach łopatek ze stopów "lotniczych" w szybki, wiarygodny i co najważniejsze nieniszczący sposób otrzymujemy informację o rzeczywistej geometrii np. chłodzonych łopatek turbin, grubości ich ścianek oraz geometrii kanałów chłodzących itp. [4].



Rys. 3. Próbką o wymiarach 5 x 5 cm badana metodą CT.

Fig. 3. A sample with dimensions of 5 x 5 cm examined by the CT method.



Rys. 4. Obraz geometrii wewnętrznych kanałów chłodzących łopatki turbinowej.

Fig. 4. Image of the geometry of the internal cooling channels of the turbine blade.

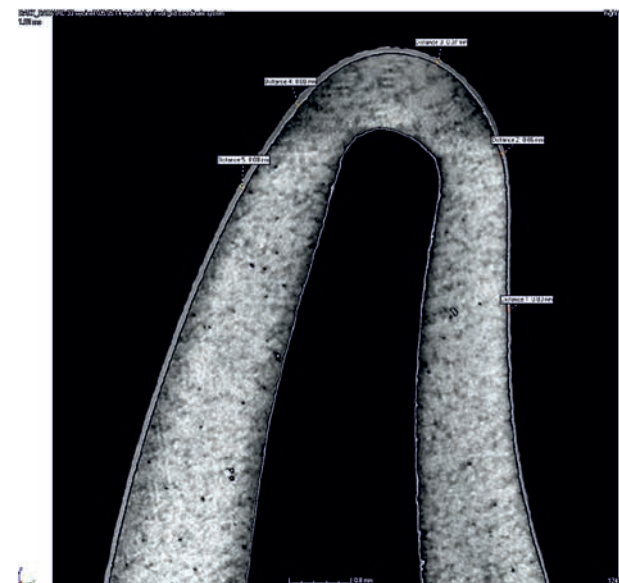
Badania tomograficzne pozwalają z dużą dokładnością zdiagnozować uszkodzenia wewnętrzne typu pęknięcia, zatkanie żużlem kanałów chłodzących, które w sposób bezpośredni skutkują ich uszkodzeniem termicznym w eksploatacji.



Rys. 5. Pęknięcia na krawędzi natarcia łopatki turbinowej uwiarydopodobnione podczas badania CT.

Fig. 5. Cracks on the leading edge of the turbine blade visible during the CT examination.

Metoda CT pozwala także na analizę grubości powłok na krawędzi natarcia, gdzie trudno jest zastosować np. metodę ultradźwiękową ze względu na skomplikowany kształt powierzchni.



Rys. 6. Widok zewnętrznej warstwy ochronnej na łopacie turbinowej

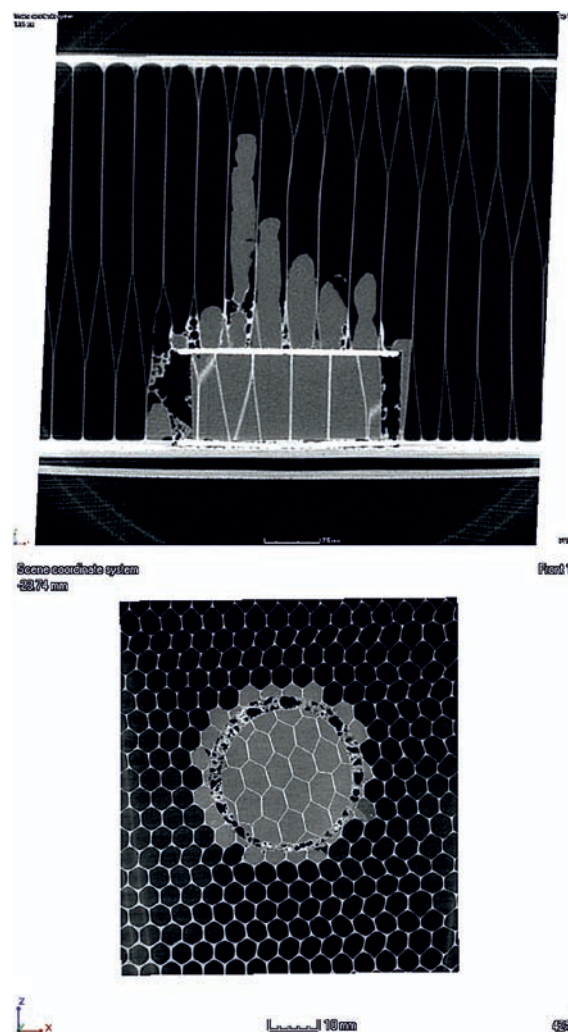
Fig. 6. View of the outer protective layer on the turbine blade.

W badaniach łopatek turbinowych głównym ograniczeniem badania jest moc lampy. Stopy chromowo-niklowe są bardzo "trudne" do prześwietlania i dla lampy 300 kV maksymalna grubość ścianki, umożliwiającą wykonanie poprawnego badania, wynosi ok 40 ÷ 50 mm. Dotychczasowe doświadczenie pozwala stwierdzić, że do

elementów tego typu i o zbliżonych gabarytach wymagana do badań optymalna moc lampy powinna być na poziomie 450 ÷ 600 kV.

W odróżnieniu od stopów CrNi, materiały kompozytowe wymagają dużo niższych mocy do badania. Lampy o mocy rzędu 150 ÷ 180 kV są wystarczające do wykonania badań większości materiałów tego typu. W ITWL oprócz standardowych badań, mających na celu określenie pustek powietrznych, czyli jakości wykonania kompozytu, prowadzi się badania pod kątem określenia możliwości i kontroli jakości miejscowej naprawy powłok kompozytowych np. na statku powietrznym - bez konieczności demontażu jego elementów np. lotek.

Na rys. 7 pokazano widok naprawionego kompozytu metodą "wstawki".



Rys. 7. Obraz naprawionego kompozytu uzyskany metodą CT.

Fig. 7. Image of the repaired composite obtained by CT method.

Prowadzone są także badania połączenia kompozytu z metalem - na elementach statków powietrznych np. w celu doraźnego zabezpieczenia nitów w poszyciu przez możliwością pęknięcia i wypadania do kanałów wlotowych statków powietrznych. Badano poprawność naniesienia i przylegania powłoki kompozytowej, w kolejnych godzinach eksploatacji. Dzięki tej nieniszczącej metodzie było możliwe

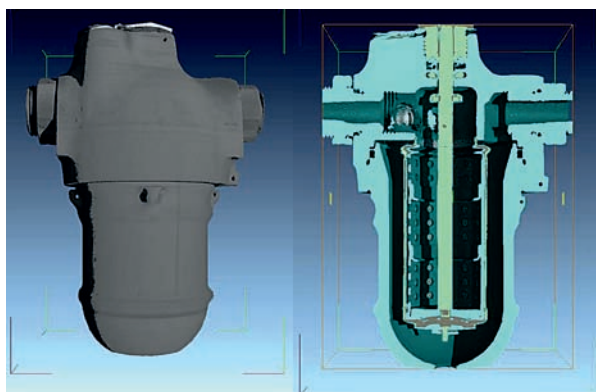
ponowne zamontowanie badanego detalu i przywrócenie statku powietrznego do eksploatacji.

Metoda CT w zastosowaniu do kompozytów daje bardzo dobre wyniki i nie wymaga dużych mocy urządzenia. Nie stwierdzono istotnych ograniczeń w stosunku do tego typu materiałów.



Rys. 8. Widok klapki aluminiowej z naniesioną powłoką kompozytową.

Fig. 8. View of an aluminum flap with an applied composite coating.



Rys. 9. Obraz filtra paliwa i jego przekrój w programie VGStudio Max.

Fig. 9. Image of the fuel filter and its cross-section in the VGStudio Max program.

Metoda tomografii komputerowej CT znalazła także szerokie zastosowanie w badaniach prowadzonych dla Komisji

Badania Wypadków Lotniczych. Badaniu często podlegają całe, uszkodzone agregaty, jeszcze przed demontażem na podzespoły. W takim przypadku możliwość "zajrzenia" do środka dostarcza informacji, w jaki sposób demontować dany zespół, co mogło ulec uszkodzeniu i być powodem niesprawności. Jest to istotne, gdyż często podczas demontażu, tracimy cenne informacje diagnostyczne i nie można przez to określić, jaka była pierwotna przyczyna niesprawności.

Na rys. 9 pokazano skan z badania filtra paliwa i możliwości jego „wirtualnego” demontażu w programie VGStudio Max.

3. Wnioski

Metoda CT, jako nowoczesna metoda NDT, znajduje zastosowanie praktycznie we wszystkich dziedzinach i do wszystkich rodzajów materiałów, zaczynając od typowych detali ze stopów lotniczych, poprzez materiały kompozytowe, elektronikę i całe agregaty, a kończąc na nawierzchniach betonowych. Wyniki uzyskane pozwalają w szybki i skuteczny sposób diagnozować materiały i całe agregaty, które następnie można przywrócić do eksploatacji.

Oprócz wielu zalet metoda posiada także ograniczenia, wynikające przede wszystkim z braku mobilności aparatu tomograficznego. Pewnym jej substytutem może tu być metoda przenośnych, cyfrowych aparatów RTG, która dostarcza niestety tylko płaski obraz.

Kolejnym ograniczeniem metody CT jest wielkość detali i powiązana z tym konieczna moc lampy. Dla detali, gdzie występuje łączna grubość ścianek powyżej kilkudziesięciu milimetrów, moc konieczna do prześwietlenia znacznie się zwiększa i wymaga stosowania tomografów "otwartych", w specjalnie przystosowanych do ochrony radiologicznej pomieszczeniach.

4. Literatura/References

- [1] E. Ratajczyk „Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych” Cz. I Idea pomiarów, główne zespoły i ich funkcje. Mechanik nr 2/2011.
- [2] L.De Chiffe, S. Carmignato „Industrial applications of computed tomography” CIRP Annals- Manufacturing Technology 63/2014.
- [3] A. Kułaska, M. Chalimoniuk, D. Kowalska „Ocena możliwości wykorzystania tomografii komputerowej (X-ray CT) do badania betonów nawierzchniowych” KKBN 2014.
- [4] J. Błachnio, J. Spychała, M. Chalimoniuk „Nieniszcząca metoda tomografii komputerowej do oceny stanu łopatek turbiny gazowej” Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej Tom 8.

Łukasz Drobiec*

Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, Gliwice

Badania nieniszczące wykorzystywane w praktyce budowlanej

Non-destructive tests used in civil engineering

ABSTRACT

Non-destructive testing is increasingly used in the construction and adaptation of existing buildings. In addition to methods that have been known for a long time (eg the sclerometric method), we currently use acoustics, radar, electromagnetic methods, and research on concrete mixes. The work discusses the basic non-destructive methods placed on buildings in Poland. The possibilities of diagnostic devices available on the market are presented. The results of research conducted using various methods and devices are presented.

Keywords: *destructive testing; sclerometric method; electromagnetic method; ultrasound method; acoustics method*

STRESZCZENIE

Badania nieniszczące coraz częściej wykorzystuje się podczas wznoszenia oraz adaptacji obiektów istniejących. Oprócz metod znanych od dawna (np. metoda sklerometryczna) stosuje się obecnie metody młoteczkowe, radarowe, elektromagnetyczne, oraz prowadzi się badania mieszanek betonowych. W pracy omówiono podstawowe metody nieniszczące stosowane przy analizie istniejących obiektów w kraju. Przedstawiono możliwości urządzeń diagnostycznych dostępnych na rynku. Zaprezentowano wyniki badań prowadzonych przy pomocy różnych metod i urządzeń.

Słowa kluczowe: *badania niszczące; metoda sklerometryczna; metoda elektromagnetyczna; metoda ultradźwiękowa; metoda młoteczkowa*

1. Wstęp

Metody nieniszczące służące do diagnostyki konstrukcji są jedną z najszybciej rozwijających się dziedzin budownictwa [1, 2, 3]. W kraju i na świecie prowadzi się szereg prac badawczych związanych z tą tematyką. Obecnie intensywnie rozwija się metody akustyczne [3, 4, 5] oraz prowadzi się badania nad wykorzystaniem sztucznej inteligencji i sieci neuronowych w diagnostyce konstrukcji [6, 7, 8]. Wiele prac dotyczy wykorzystania metod niszczących do detekcji uszkodzeń elementów, a w szczególności zarysowań w konstrukcjach żelbetowych [5, 8, 9, 10]. W praktyce budowlanej metody nieniszczące nie są jednak jeszcze stosowane tak szeroko. Badania z ich wykorzystaniem prowadzi się głównie w istniejących konstrukcjach w celu identyfikacji parametrów wytrzymałościowych i geometrii, najczęściej na etapie oceny stanu technicznego lub ramach prac poprzedzających przebudowę, czy rozbudowę. Rzadziej prace diagnostyczne prowadzi się na etapie wznoszenia obiektów.

W konstrukcjach drewnianych i murowych metod nieniszczących z reguły nie stosuje się. W konstrukcjach stalowych metody nieniszczące są najczęściej stosowane do określania grubości elementów oraz jakości spoin. Metody diagnostyczne są natomiast w praktyce najczęściej wykorzystywane w konstrukcjach żelbetowych. W pracy omówiono podstawowe badania nieniszczące stosowane w praktyce budowlanej do diagnostyki obiektów żelbetowych.

2. Określanie wytrzymałości betonu

Wytrzymałość na ściskanie betonu jest podstawową informacją, którą należy uzyskać, kiedy dokonuje się sprawdzenia zgodności wykonanej konstrukcji z rozwiązaniami projektowymi, w sytuacji awaryjnej, przystępując do wszelkich prac związanych ze zmianą sposobu użytkowania, modernizacją,

przebudową i rozbudową obiektu [9, 10, 11, 12]. Do określania wytrzymałości betonu w istniejącej konstrukcji najczęściej obecnie stosuje się metodę sklerometryczną oraz metodę ultradźwiękową. Sklerometria należy do metod badania twardości, czyli odporności materiału na odkształcenia spowodowane siłami skupionymi i zaliczana jest do powszechnych sposobów kontroli jakości betonu [12]. W przyrządach sklerometrycznych analizuje się odpowiedź na dynamiczne uderzenie wglębniaka w określoną energią. Dynamiczna twardość betonu jest proporcjonalna do wysokości, na jaką odskakuje bijak uderzający ze znaną energią w kulkę lub we wglębniak kuliście zakończony. W badaniach sklerometrami, twardość dynamiczną wyraża się jako funkcję liczby odbicia L, co w zastosowaniach praktycznych (przy stałych parametrach przyrządu) pozwala bezpośrednio znaleźć empiryczną zależność między wytrzymałością betonu f , a liczbą odbicia L. Ultradźwiękowa metoda określania wytrzymałości betonu wykorzystuje zjawisko rozchodzenia się fali akustycznej (impulsu fali) o częstotliwości większej od górnej granicy słyszalności ucha ludzkiego tj. > 20 kHz. Analizuje się tu zależność między wytrzymałością betonu i prędkością fali ultradźwiękowej.

W wypadku nieniszczących badań wytrzymałości betonu należy pamiętać, że w normie europejskiej PN-EN 206-1:2014-4 w pkt. 8.4 jednoznacznie stwierdzono, że jeśli producent powiadomił o niezgodności betonu lub jeśli wynik badań zgodności nie spełniają wymagań mogą być wymagane badania uzupełniające, zgodne z PN-EN 12504-1:2011 przeprowadzone na rdzeniach pobranych z konstrukcji lub elementów albo kombinacja badań przeprowadzonych na rdzeniach z badaniami nieniszczącymi konstrukcji lub elementów np. Zgodnie z PN-EN 12504-2:2013-03, PN-EN 12504-4:2005. Z zapisów normy wynika więc, że wytrzymałość betonu można wyznaczyć na próbkach wyciętych z konstrukcji, ale dodatkowo można przeprowadzić badania

*Autor korespondencyjny. E-mail: lukasz.drobiec@polsl.pl

nieniszczące konstrukcji metodą sklerometryczną lub ultradźwiękową. Stwierdzenie to wyklucza ocenę wytrzymałości betonu tylko na podstawie badań nieniszczących, które może być realizowane w kombinacji z badaniami niszczącymi [9, 10, 12]. Pomimo tych obostrzeń metody nieniszczące przy określaniu wytrzymałości betonu są często stosowane, choć nie zawsze dokonuje się kalibracji wyników przy pomocy kontrolnych badań odwiertów rdzeniowych. Powszechność stosowania metod nieniszczących jest zapewne związana z dobrą dostępnością urządzeń diagnostycznych w postaci sklerometrów Schmidta lub betonoskopów.

3. Określanie parametrów zbrojenia

Określenie parametrów stali zbrojeniowej jest drugą z podstawowych czynności prowadzonych w ramach diagnostyki istniejących konstrukcji. Gdy projektowana naprawa lub wzmocnienie wymagają obliczeniowego sprawdzenia nośności konstrukcji żelbetowej należy oprócz wytrzymałości betonu określić geometrię położenia zbrojenia w elemencie oraz parametry mechaniczne i odkształceniowe tego zbrojenia [10, 13, 14, 15, 16]. Geometrię prętów zbrojeniowych można uzyskać metodą tradycyjną, wykonując odkrywki, bądź przy pomocy nieniszczących metod diagnostycznych. Metody nieniszczące są przydatne szczególnie w wypadku, gdy powierzchnia lub liczba elementów koniecznych do zbadania jest znaczna. Metody nieniszczące pozwalają na wyznaczenie średnicy i położenia prętów zbrojeniowych, przy ich pomocy nie można jednak określić klasy i gatunku stali zbrojenia. Dlatego zawsze należy wykonać kontrolne odkrywki.

W przeciwieństwie do opisanych wyżej metod służących do określania wytrzymałości betonu nieniszczące metody lokalizacji zbrojenia nie są objęte krajowymi ani europejskimi wytycznymi normowymi. Najczęściej stosowanymi obecnie nieniszczącymi metodami służącymi do detekcji zbrojenia są metody elektromagnetyczna i radarowa. Elektromagnetyczne metody badań lokalizacji zbrojenia w elementach żelbetowych polegają najczęściej na analizie zmiany pola magnetycznego w pobliżu prętów zbrojeniowych. Sposoby wzbudzania pola magnetycznego oraz analizy i interpretacji otrzymanych wyników różnią się nieco w dostępnych obecnie urządzeniach pomiarowych, lecz większość z nich działa według powszechnie znanych zasad, które szczegółowo opisano w pracach [10 i 13].

Metoda radarowa polega na emitowaniu fal elektromagnetycznych o częstotliwości z zakresu od krótkich do ultrakrótkich fal radiowych i rejestracji fal odbitych od warstw charakteryzujących się zmiennymi właściwościami dielektrycznymi. Podstawy teorii fal elektromagnetycznych stworzył James Clerk Maxwell w roku 1864 [10, 13]. Teoria ta długo nie była jednak wykorzystywana w praktyce. Techniki GPR do badań żelbetowych konstrukcji zaczęto powszechnie stosować dopiero w latach 80 dwudziestego wieku. Wtedy to udoskonalano zarówno technikę pomiaru, jak i metody interpretacji wyników. W połowie lat osiemdziesiątych powstał pierwszy komputerowy system pomiarowy GPR, który oferował możliwość zapisu danych w postaci cyfrowej. Obecnie dostępnych jest wiele systemów

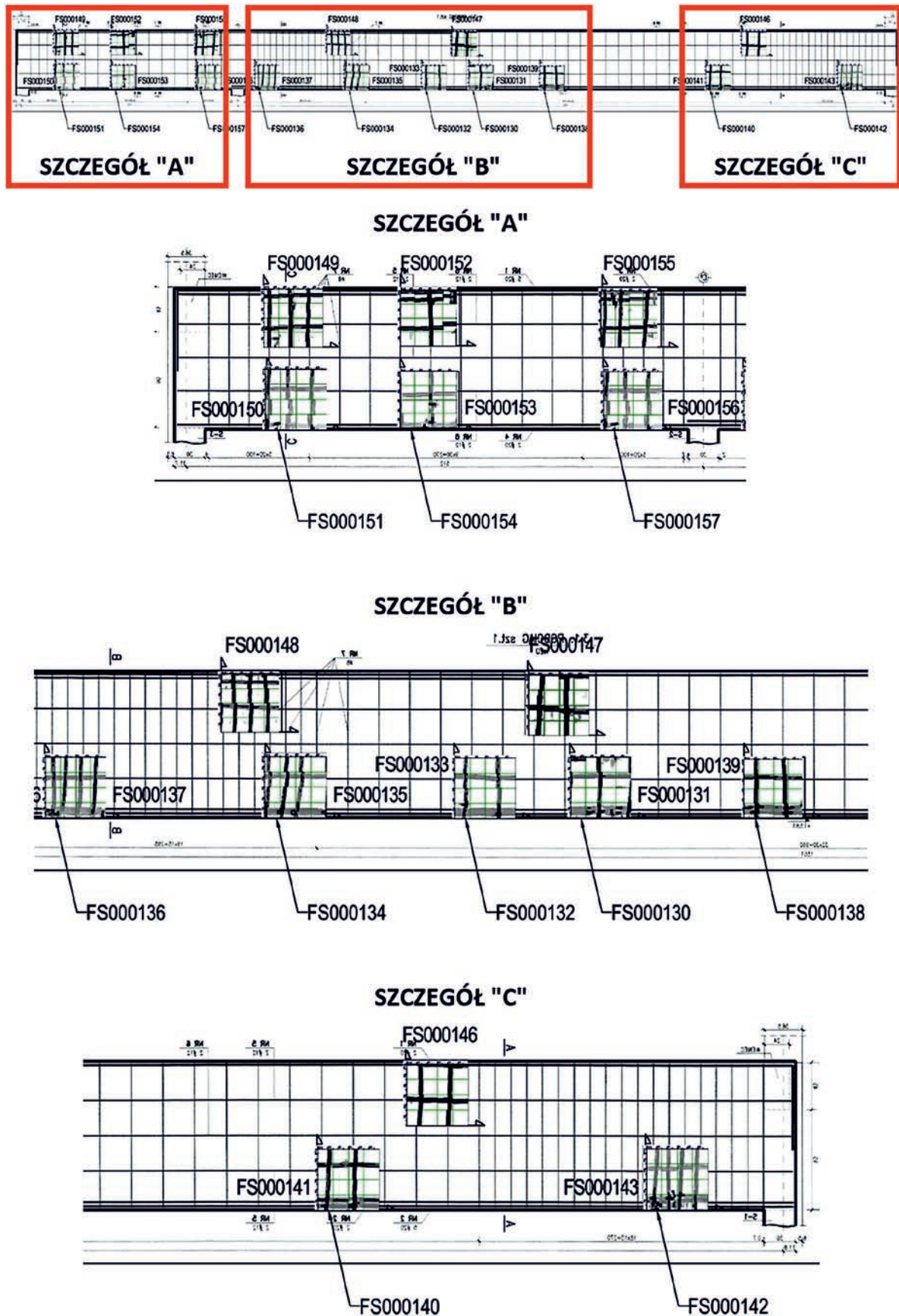
pomiarowych o zróżnicowanym zakresie pomiaru i różnym stopniu interpretacji wyników [10, 13, 17].

Dokładność badań elektromagnetycznych zależy przede wszystkim od głębokości położenia prętów zbrojeniowych, rozstawu prętów i ich usytuowania względem kierunku skanowania, rodzaju zastosowanego zbrojenia oraz jakości powierzchni betonu [10, 13]. Wpływ na dokładność badań mają również zaimplementowany typ analizy spektralnej oraz procedury kompensacji błędów pomiaru. Głębokość położenia prętów w sposób istotny wpływa na dokładność pomiaru średnicy, a nawet dokładność samej lokalizacji prętów. Maksymalna głębokość wykrywania zbrojenia zależy od średnicy prętów zbrojeniowych. W wypadku stosowanych w budownictwie typowych średnic $6 \div 25$ mm, w zależności od zastosowanego urządzenia, największa głębokość, na której można wykryć zbrojenie to $100 \div 200$ mm. Oczywiście im pręty zbrojeniowe są położone bliżej skanowanej powierzchni tym pomiar jest dokładniejszy. Akceptowalną dokładność pomiaru średnicy zbrojenia uzyskuje się przy położeniu prętów do głębokości około 60 mm.

W typowych konstrukcjach żelbetowych (belki, płyty, słupy), przy normowych otulinach, zakres dokładności urządzeń elektromagnetycznych pozwala na wykonanie badań o dobrej dokładności pomiaru. Na rys. 1 pokazano przykład badania dwuprzęsłowego żelbetowego podciągu z przęsłami nierównomiernymi o rozpiętościach 5 i 20 mm. Wysokość elementu wynosiła 120 cm.

Zasięg działania metody radarowej zależy od struktury betonu, rodzaju anten i wielkości wzbudzanych częstotliwości impulsu. W typowych urządzeniach zakres ten wynosi do 750 mm. Kontrast obrazu uzyskiwany w badaniach metodą radarową uzależniony jest od względnej różnicy pomiędzy stałymi dielektrycznymi graniczącymi ze sobą materiałów. Ze względu na znaczne różnice w wartościach tych stałych dla betonu i stali z reguły nie ma problemu z interpretacją uzyskanego obrazu. Wynikiem badań lokalizacji zbrojenia, prowadzonych metodą radarową, są tzw. falogramy, czyli zapis wszystkich odbitych sygnałów zarejestrowanych podczas profilowania (przejazdu sondy pomiarowej po powierzchni elementu). Obrazem zbrojenia na falogramie jest zniekształcenie przebiegu warstw w postaci hiperboli z ramionami skierowanymi ku dołowi falogramu. Wierzchołek hiperboli informuje o położeniu pręta zbrojeniowego. Urządzenia nie podają w sposób jawny średnicy zbrojenia. Istnieje jednak prosty sposób wyznaczenia średnicy prętów krzyżujących się w konstrukcji. Wykonuje się wówczas skan konstrukcji w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach nad obiema z krzyżujących się prętów, a następnie dokonuje się pomiaru wielkości betonowej otuliny, a różnica pomiędzy wielkościami otulin krzyżujących się prętów to średnica pręta znajdującego się bliżej powierzchni badanego elementu (rys. 2).

Nowoczesne systemy pomiarowe dokonują automatycznej analizy falogramów, łączą falogramy wykonane obok siebie w jeden obraz i przedstawiają wizualizację zbrojenia w konstrukcji. Przy pomocy dodatkowego oprogramowania komputerowego możliwe jest często wykonanie przestrzennego obrazu konstrukcji ze zbrojeniem.

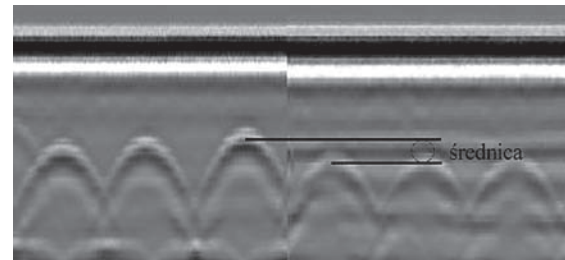


Rys. 1. Przykład badań zgodności zbrojenia z projektem metodą elektromagnetyczną. Uzyskane urządzeniem PS 200 skany naniesiono na projekt żelbetowego podciągu.

Fig. 1. An example of tests for compliance of reinforcement with a project using an electromagnetic method. Obtained by the PS 200 device, the scans were applied to the project of the reinforced beam.

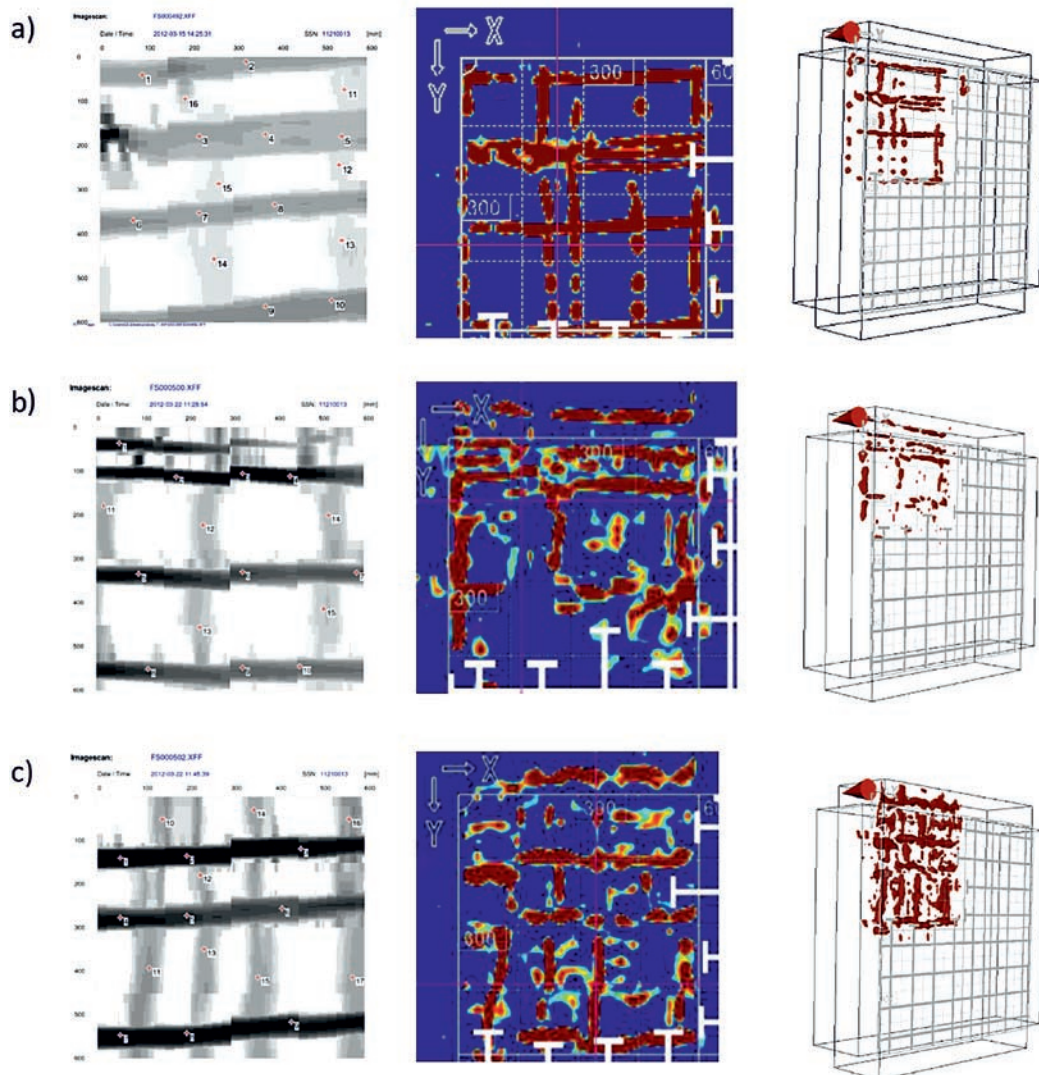
Na rys. 3 pokazano porównanie wyników badań elektromagnetycznych i radarowych. Badania prowadzono na ścianach żelbetowego silosu o wysokości 42,0 m ppt. i średnicy 17,0 m (przykłady z tych badań opisano poniżej – przykład P1 i P2). Grubość ścian silosu wynosiła 35 cm, a zbrojenie umieszczano zarówno od strony zewnętrznej, jak i od strony wewnętrznej ścian. Badania prowadzono przy użyciu elektromagnetycznego skanera PS 200 oraz radarowego skanera PX 1000. Badania wykonywano od zewnątrz silosu, wykonując skany każdym z urządzeń w tym samym miejscu i na tej samej powierzchni. Prezentowane obrazy zbrojenia pochodzą z programów komputerowych dołączanych do urządzeń. Porównując uzyskane wyniki należy stwierdzić, że w metodzie elektromagnetycznej zbrojenie wykrywane jest bardzo dokładnie (przynajmniej do pewnej głębokości). W badaniach radarowych oprócz zbrojenia wykrywane są również uszkodzenia wewnętrzne (raki, większe pęknięcia). W opisywanych badaniach występowały znaczne uszkodzenia struktury wewnętrznej w płaszczyźnie zbrojenia,

które powstały prawdopodobnie na skutek zbyt wczesnego podrywania desekowania ślizgowego. Uszkodzenia te na skanach (środkowa kolumna - rys. 3) widoczne są w postaci nieregularnych obiektów o rozmytych krawędziach.



Rys. 2. Określenie średnicy zbrojenia na falogramie – lewa strona badanie w kierunku prostopadłym do pręta górnego, prawa w kierunku prostopadłym do pręta dolnego.

Fig. 2. Determination of the reinforcement diameter in the waveform - left side of the test in the direction perpendicular to the upper bar, right in the direction perpendicular to the lower bar.



Rys. 3. Porównanie wyników badań metodą elektromagnetyczną i radarową w trzech różnych miejscach (a), (b) i (c). Lewy skan wykonany urządzeniem PS 200, środkowy przy pomocy PX 1000, prawy - obraz 3D zbrojenia ze skanu urządzenia PX 1000.

Fig. 3. Comparison of electromagnetic and radar test results in three different locations (a), (b) and (c). Left scan made with PS 200 device, middle with PX 1000, right - 3D image with PX 1000 scan with device.

4. Lokalizacja wad wewnętrznych

Wewnętrzne wady betonu (raki, pustki) wykrywa się w praktyce przy użyciu metod ultradźwiękowej, młoteczkowej (tzw. Impact Echo) i radarowej [10, 18, 19, 20]. W badaniach ultradźwiękowych do lokalizacji wewnętrznych wad struktury konstrukcji z betonu można wyróżnić trzy metody: metodę echa, która opiera się na analizie fal odbitych od ośrodków o różnej impedancji akustycznej, metodę przepuszczania (cienia), w której rozpatruje się osłabienie energii impulsu fali ultradźwiękowej przechodzącej przez obszar zawierający nieciągłości struktury betonu oraz metodę TOFD (ang. time-of-flight diffraction), w której wykorzystuje się zjawisko dyfrakcji i rozpraszania fal ultradźwiękowych na krawędziach nieciągłości materiału. Metoda młoteczkowa jest odpowiednikiem metody echa stosowanej w diagnostyce konstrukcji z betonu prowadzonej metodą ultradźwiękową. W metodzie Impact-Echo wykorzystuje się jednak analizę obrazu widma częstotliwościowego fal odbitych. W metodzie radarowej również wykorzystuje się zjawisko odbicia i dyfrakcji fal, lecz są to fale elektromagnetyczne. Wiązka energii fali uderzając o powierzchnię na granicy dwóch ośrodków o różnych stałych dielektrycznych ulega w części odbiciu, natomiast reszta tej energii penetruje ośrodek, który znajduje się poza tą granicą.

Najrzadziej z opisanych wyżej metod używana jest obecnie metoda młoteczkowa, głównie ze względu na dużą pracochłonność i czasochłonność. Nowoczesne urządzenia diagnostyczne działające według metody radarowej i ultradźwiękowej dają możliwość uzyskania obrazu przekroju elementu lub wnętrza elementu (obraz 3D), nawet w czasie rzeczywistym.

5. Podsumowanie

Praktyczne wykorzystanie nieniszczących metod badawczych do diagnostyki konstrukcji żelbetonowych ogranicza się najczęściej od określania wytrzymałości betonu metodami sklerometryczną oraz ultradźwiękową, lokalizacji zbrojenia metodami elektromagnetyczną i radarową oraz lokalizacji wad wewnętrznych w konstrukcji metodami ultradźwiękową i radarową. Zastosowanie powyższych metod wynika przede wszystkim z dostępności urządzeń badawczych na rynku. Nie bez znaczenia jest również szybkość i łatwość prowadzenia badań oraz interpretacji uzyskanych wyników. Nowe metody diagnostyki będą zapewne powoli wykorzystywane w praktyce, lecz wymaga to jednak ich komercjalizacji.

6. Literatura/References

- [1] L. Runkiewicz, „Tendencje rozwojowe badań nieniszczących w budownictwie”. 32 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących. Międzyzdroje 2003, s. 87-101.
- [2] J. Hoła, K. Schabowicz, „State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures—anticipated development trends”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 10 (3)/2010, s. 5-18.
- [3] L. Runkiewicz, J. Sieczkowski, „Propozycja zdefiniowania opracowań technicznych dotyczących diagnostyki obiektów budowlanych”. *Przegląd Budowlany*, 6/2018, s. 14-15.
- [4] K. Schabowicz, „Modern acoustic techniques for testing concrete structures accessible from one side only”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 15(4)/2015, 1149-1159.
- [5] M. Rucka, „Damage detection in beams using wavelet transform on higher vibration modes”, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 49(2)/2011, 399-417.
- [6] J. Hoła, K. Schabowicz, „New technique of nondestructive assessment of concrete strength using artificial intelligence”, *NDT & E International* 38 (4)/2005, 251-259.
- [7] J. Hoła, K. Schabowicz, „Application of artificial neural networks to determine concrete compressive strength based on non-destructive tests”, *Journal of civil Engineering and Management* 11 (1)/2005, 23-32.
- [8] M. Rucka, K. Wilde, „Neuro-wavelet damage detection technique in beam, plate and shell structures with experimental validation”, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 48/2010, 579-604.
- [9] W. Starosolski, Ł. Drobiec, R. Jasiński, T. Jaśniok, M. Jaśniok, A. Piekarczyk, „Diagnostyka konstrukcji żelbetonowych”. Konferencja Naukowo – Techniczna Problemy Rzeczoznawstwa Budowlanego – Warsztat Pracy Miedzeszryn-2010, str. 151÷166.
- [10] Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk, „Diagnostyka konstrukcji żelbetonowych. Tom 1. Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali”. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 2010 (dodruk 2013).
- [11] L. Brunarski, „Określenie wytrzymałości betonu na podstawie diagnostycznych badań konstrukcji”, XXI Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 8 - 11 marca 2006 r., s. 39 - 54.
- [12] R. Jasiński, „Określenie wytrzymałości betonu w konstrukcji”. XXIX Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Szczyrk, 26-29 marca 2014 r., tom II, s. 1-110,
- [13] Ł. Drobiec, „Określenie parametrów stali zbrojeniowej w konstrukcji”. XXIX Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Szczyrk, 26-29 marca 2014 r., tom I, s. 181-256.,
- [14] Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk, „Lokalizacja wad konstrukcji i stali zbrojeniowej – metody”, XXI Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 8 - 11 marca 2006, t. I, s. 133-208,
- [15] Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk, „Metody lokalizacji stali zbrojeniowej w konstrukcjach żelbetonowych. Metoda elektromagnetyczna (cz. II)”. *Przegląd Budowlany*, nr 12/2007, s. 31 - 37.
- [16] L. Runkiewicz, „Badania konstrukcji żelbetonowych”, Biuro Gamma, Warszawa 2002.
- [17] J. Lachowicz, M. Rucka, „Application of GPR method in diagnostics of reinforced concrete structures”, *Diagnostyka* 16/2015.
- [18] Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk, „Metody lokalizacji wad konstrukcji betonowych – metoda ultradźwiękowa (cz. 1)”. *Przegląd Budowlany*, nr 9/2007, s. 29 - 36.
- [19] Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk, „Metody lokalizacji wad konstrukcji betonowych – metoda młoteczkowa (cz. 2)”. *Przegląd Budowlany*, nr 10/2007, s. 37 - 42.
- [20] A. Piekarczyk, „Lokalizacja wad struktury betonu w konstrukcji”. XXIX Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Szczyrk, 26-29 marca 2014 r., tom II, s. 1-81

Radosław Jasiński*

Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, Gliwice

Wyznaczanie wytrzymałości na ściskanie muru z autoklawizowanego betonu komórkowego metodą małoniszczącą

Determination of AAC masonry compressive strength by semi destructive method

ABSTRACT

Autoclaved aerated concrete blocks (AAC) are most commonly used for making masonry structures (over 60% of the market). Due to the porous structure and sensitivity to atmospheric factors, especially humidity, there is a need to determine compressive strength in existing facilities. The article presents a relation proposition for determining the compressive strength of ABK, and then a wall made with thin-layer welds based on tests of small samples taken from real constructions. Using the research of over 600 samples of various shapes and dimensions cut from the cellular concrete blocks of nominal density classes 400, 500, 600 and 700 a curve was determined to determine the compressive strength ABK depending on the dimensions of the sample in the air-dry state. Then an empirical relationship was developed to take into account the effect of ABK humidity on compressive strength. The simplified procedure for determining compressive strength has been illustrated by an example.

Keywords: autoclaved aerated concrete (AAC); compressive strength; shape and size of specimens; humidity

STRESZCZENIE

Bločki z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) stosowane są najpowszechniej do wykonywania konstrukcji murowych (ponad 60% rynku). Ze względu na porowatą strukturę i wrażliwość na działanie czynników atmosferycznych, a szczególnie wilgotności, zachodzi potrzeba wyznaczania wytrzymałości na ściskanie w istniejących obiektach. W artykule przedstawiono propozycję krzywej umożliwiającej wyznaczenie wytrzymałości na ściskanie ABK, a następnie muru wykonanego ze spoinami cienkowarstwowymi na podstawie badań niewielkich próbek pobranych z rzeczywistych konstrukcji. Wykorzystując badania ponad 600 próbek różnych kształtów i wymiarów wyciętych z blozków z betonu komórkowego nominalnych klas gęstości 400, 500, 600 i 700 określono krzywą umożliwiającą wyznaczenie wytrzymałości na ściskanie ABK w zależności od wymiarów próbki w stanie powietrzno – suchym. Następnie opracowano empiryczną zależność pozwalającą uwzględnić wpływ wilgotności ABK na wytrzymałość na ściskanie. Uproszczoną procedurę wyznaczania wytrzymałości na ściskanie zobrazowano przykładem.

Słowa kluczowe: autoklawizowany beton komórkowy (ABK); wytrzymałość na ściskanie; wielkość i kształt próbki; wilgotność

1. Wstęp

Znajomość wytrzymałości na ściskanie muru f_k pozwala ocenić bezpieczeństwo istniejącego obiektu z uwagi obciążenie pionowe. W odróżnieniu do konstrukcji betonowych w przypadku konstrukcji murowych metody nieniszczące lub małoniszczące ze względu na małą wiarygodność nie są rozpowszechnione [1]. Najbardziej wiarygodną metodą są badania niszczące pobranych ze ścian próbek średnich lub dużych gabarytów. W większości sytuacji takie działania nie są możliwe do realizacji i korzysta się z niewielkich próbek wyciętych z pojedynczych elementów murowych. Na podstawie niszczących badań próbek wyznacza się wytrzymałość elementu murowego f_b , a przy pomocy współczynników empirycznych η_w i δ wyrażających wpływ wilgotności i kształtu próbki oblicza się średnią znormalizowaną wytrzymałość na ściskanie. Dzięki temu można według Eurokodu 6 obliczyć charakterystyczną wytrzymałość muru na ściskanie według wzoru:

$$f_k = K f_b^{0,85} = K (\eta_w \delta f_b)^{0,85} \rightarrow K (f_{Bw})^{0,85} \quad (1)$$

gdzie: $K = 0,75$ lub $0,8$; f_{Bw} jest wytrzymałością na ściskanie próbek pobranych z konstrukcji uwzględniających aktualną wilgotność.

Jeżeli badania prowadzi się na próbkach o wymiarach innych niż sześcian o boku równym 10 mm, to wytrzymałość znormalizowaną określa się stosując współczynniki δ podane w normie PN-EN 772-1 [2]. Norma nie podaje współczynników przeliczeniowych (konwersji) do próbek niestandardowych, takich jak mikrordzenie. W konsekwencji przeliczenie wyników z góry obciążone jest trudnym do oszacowania błędem. W literaturze [3, 4] znane są współczynniki konwersji otrzymane z badań innych materiałów takich jak beton, czy ceramika, dotychczas jednak nie podano zależności dedykowanych do ABK.

W pracy podjęto próbę opracowania krzywej empirycznej umożliwiającej wyznaczenie znormalizowanej wytrzymałości na ściskanie muru wykonanego z ABK o różnej gęstości i wilgotności w . Wykorzystano ogólną postać znanej z diagnostyki betonu zwykłego krzywą Nevila [5], którą wykalibrowano do ABK klas gęstości (400, 500, 600 i 700). Uwzględniając, że oprócz wpływu procesu wyrostania i tężenia masy [6] także wilgotność ABK ma istotny wpływ na wytrzymałość na ściskanie wykonano badania i zbudowano dodatkowe zależności empiryczne. Analizę przeprowadzono wykorzystując uprzednio wykonane badania [7] 494 próbek walcowych i prostopadłościennych na podstawie, których zbudowano szczegółowe krzywe empiryczne.

*Autor korespondencyjny. E-mail: radoslaw.jasinski@polsl.pl

2. Krzywa empiryczna ABK

W sytuacji, gdy wytrzymałości na ściskanie betonu zwykłego wyznacza się na próbkach o nietypowych kształtach konwersji do wytrzymałość wyznaczanej na próbkach standardowych (kostki $150 \times 150 \times 150$ mm) stosuje się zależność podaną przez Nevila [5] w postaci:

$$\frac{f_c}{f_{c,cube150}} = 0,56 + \frac{0,697}{\frac{V}{152hd} + \frac{h}{d}} \quad (2)$$

w której: V – objętość próbki, h – wysokość próbki, d – najmniejszy wymiar boczny próbki.

Przyjmując w miejsce wytrzymałości $f_{c,cube150}$ otrzymywanej na próbkach standardowych $150 \times 150 \times 150$ mm wytrzymałość f_B uzyskiwaną na próbkach z elementów murowych $100 \times 100 \times 100$ mm, a iloraz $152hd$ przez objętość próbki standardowej $100hd$, zależność (2) można przedstawić następująco:

$$\frac{f_c}{f_B} = b + \frac{a}{\frac{V}{100hd} + \frac{h}{d}} \rightarrow y = b + \frac{a}{x} \quad (3)$$

w której: f_B – wytrzymałość na ściskanie znormalizowanej próbki $100 \times 100 \times 100$ mm, a i b – stałe współczynniki krzywej, $y = \frac{f_c}{f_B}$ – iloraz wytrzymałości na ściskanie oznaczonej na próbce dowolnego kształtu i próbce normowej $100 \times 100 \times 100$ mm, $x = \frac{V}{100hd} + \frac{h}{d}$ – bezwymiarowy współczynnik wyrażający wpływ objętości i smukłości próbki.

Poszukiwanie parametry krzywej (3) wyznaczono poszukując lokalnego minimum sumy kwadratów:

$$S(a,b) = \sum_{i=1}^n [y_i - v(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^n \left[y_i - \left(\frac{a}{x_i} + b \right) \right]^2 \quad (4)$$

stosując zależności:

$$\frac{\partial S(a,b)}{\partial a} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial S(a,b)}{\partial b} = 0 \quad (6)$$

Po zróżniczkowaniu i rozwiązaniu układu równań liniowych otrzymano następujące zależności zapisane w postaci ułatwiającej budowę tablicy korelacyjnej:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i^2} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} \right)} \quad (7)$$

$$b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \frac{1}{n} \left(\frac{\sum_{i=1}^n y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i^2} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} \right)} \right) \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} \quad (8)$$

Przy określeniu zgodności krzywej założono, że niepewność w pomiarach x jest zaniedbywana (geometria próbki). Oprócz tego przyjęto, że niepewności wszystkich wartości y miały taką samą wielkość (zazwyczaj stosuje się identyczną wagę pomiarów wynikającą z identyczności technik pomiarowych). Do oszacowania współczynnika korelacji obliczono:

• błąd szacunku

$$S_{tN} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2 \quad (9)$$

gdzie: $y_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$

• sumę błędów

$$S_{rN} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(y_i - \left(\frac{a}{x_i} + b \right) \right)^2 \quad (10)$$

a następnie współczynnik korelacji:

$$r = \sqrt{\frac{S_{tN} - S_{rN}}{S_{tN}}} \quad (11)$$

W pracy [7] przedstawiono równania krzywych korelacyjnych opracowane do próbek prostopadłościennych i walcowych. Uzyskane wartości współczynników a i b krzywych zestawiono w tablicy 1. Porównanie uzyskanych

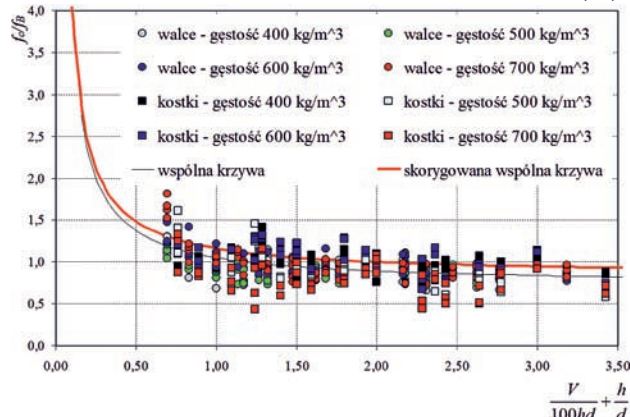
Tab. 1. Zestawienie wartości współczynników oraz równań krzywych empirycznych.

Tab. 1. Comparison of values of coefficients and equations of empirical curves.

Klasa gęstość betonu komórkowego kg/m ³	Współczynnik krzywej		r	Addytywny współczynnik poprawkowy Δb	Skorygowany współczynnik krzywej b _{kor}	Równanie krzywej
	a	b				
od 375 do 446 nominalna klasa betonu 400	0,159	0,857	0,324	0,06	0,921	$\frac{f_c}{f_B} = 0,921 + \frac{0,159}{\frac{V}{100hd} + \frac{h}{d}}$
od 462 do 532 nominalna klasa betonu 500	0,312	0,682	0,533	0,16	0,844	$\frac{f_c}{f_B} = 0,844 + \frac{0,312}{\frac{V}{100hd} + \frac{h}{d}}$
od 562 do 619 nominalna klasa betonu 600	0,349	0,779	0,612	0,05	0,826	$\frac{f_c}{f_B} = 0,826 + \frac{0,349}{\frac{V}{100hd} + \frac{h}{d}}$
od 655 do 725 nominalna klasa betonu 700	0,454	0,608	0,614	0,16	0,773	$\frac{f_c}{f_B} = 0,773 + \frac{0,454}{\frac{V}{100hd} + \frac{h}{d}}$
wspólna krzywa nominalna klasa betonu od 400 do 700	a _w = 0,321	b _w = 0,262		0,11	0,840	$\frac{f_c}{f_B} = 0,840 + \frac{0,321}{\frac{V}{100hd} + \frac{h}{d}}$

wyników badań ze wspólną krzywą pokazano na rys. 1. Należy zauważyć przy próbkach $100 \times 100 \times 100$ mm wartość mianownika krzywych wynosi $V/100hd + h/d = 2$, a obliczone według wzorów podanych w tablicy 1 ilorazy wytrzymałości $f_c/f_B \neq 1$. Aby przy znormalizowanych próbkach uzyskać iloraz $f_c/f_B = 1$ należy dokonać translacji krzywych równoległe do osi odciętych stosując addytywny współczynnik poprawkowego Δb uzyskując postać wspólnej krzywej:

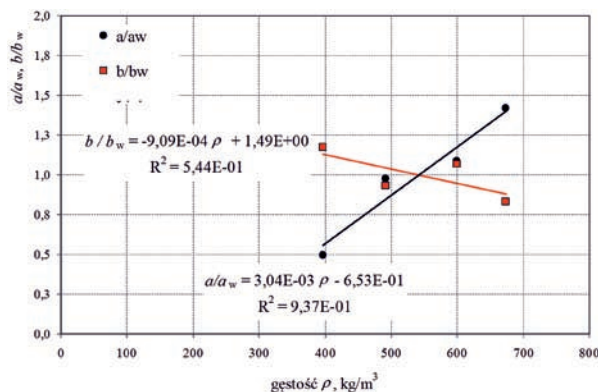
$$\frac{f_c}{f_B} = b + \Delta b + \frac{a}{\frac{V}{100hd} + \frac{h}{d}} \quad (12)$$



Rys. 1. Wyniki badań wszystkich próbek rdzeniowych i próbek sześciennych wraz z wyznaczoną krzywą korelacyjną.
Fig. 1. Test results of all core samples and cubic samples together with the determined correlation curve.

3. Kalibracja krzywej

W miejsce wielu krzywych opracowanych do danej gęstości ABK, do celów diagnostycznych zdecydowanie korzystniejsze jest operowanie taką krzywą, która pozwoli wyznaczyć wytrzymałość ABK o różnej gęstości i różnej wilgotności. Wykorzystując zawarte w tablicy 1 wartości współczynników a i b określonych do betonów o gęstościach zawartych w podanych przedziałach oraz współczynniki a_w i B wspólnej krzywej zbudowano zależności korelacyjne pokazane na rys. 2.



Rys. 2. Względne wartości współczynników krzywych.
Fig. 2. Relative values of curve coefficients.

Na podstawie pokazanych na rys. 2 wyników, metodą najmniejszych kwadratów określono następujące zależności

opisujące wartości współczynników krzywych w funkcji gęstości ABK:

$$a = a_w \cdot (3,044 \cdot 10^{-3} \rho - 0,653) = 0,321 \cdot (3,044 \cdot 10^{-3} \rho - 0,653) \quad (13)$$

$$b = b_w \cdot (9,09 \cdot 10^{-4} \rho - 1,49) = -0,730 \cdot (9,09 \cdot 10^{-4} \rho - 1,49) \quad (14)$$

Oczywiście po wyznaczeniu wartości a i b w wprowadzeniu do zależności (12) konieczna jest stosowana korekta współczynnika b tak, aby przy $V/100hd + h/d = 2$ otrzymać $f_c/f_B \neq 1$.

Oprócz wpływu, kształtu uwzględniono wpływ wilgotności, która jest ilorazem zaabsorbowanej wody odniesionej do masy suchego materiału:

$$w = \frac{m_w - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad (15)$$

gdzie: m_w – masa próbki wilgotnej, m_s – masa próbki wysuszonej do stałej masy.

Maksymalna wilgotność ABK (nasiąkliwość) $w_{\max}$ odpowiada takiemu stanowi, w którym nie obserwowano dalszego wzrostu masy m_w w skutek kapilarnego podciągania wody. Natomiast wilgotność względną obliczano, jako iloraz aktualnej wilgotności i maksymalnej wilgotności $w/w_{\max}$.

Tab. 2. Wyniki badań ABK o zróżnicowanej wilgotności.

Tab. 2. AAC test results with diversified humidity.

Lp	Nominalna gęstość, ρ , kg/m³	Średnia wilgotność w , %	Średnia wilgotność względna $w/w_{\max}$	Średnia wytrzymałość na ściskanie f_{Bw} , N/mm²	Średnia względna wytrzymałość na ściskanie f_{Bw}/f_B
1	400	0,0	0,0	2,9	1,0
2		20,1	0,23	2,09	0,72
3		29,1	0,33	2,18	0,76
4		58,3	0,67	1,96	0,68
5		89,9	1,00	1,78	0,62
6	500	0,0	0,0	3,6	1,0
7		16,2	0,23	2,44	0,68
8		22,8	0,33	2,12	0,59
9		46,1	0,67	2,06	0,57
10		66,0	1,00	2,24	0,62
11	600	0,0	0,0	5,0	1,0
12		12,6	0,23	4,21	0,85
13		18,2	0,34	3,88	0,78
14		58,3	0,67	1,96	0,68
15		61,1	1,00	2,82	0,57
16	700	0,0	0,0	5,0	1,0
17		11,7	0,22	5,96	0,74
18		16,8	0,34	5,56	0,69
19		46,1	0,67	2,06	0,57
20		53,3	1,00	4,95	0,61

Z bloczków z ABK różnych gęstości wykonano ogółem 115 próbek $100 \times 100 \times 100$ mm, podzielonych na pięć sześcioczęściowych serii. Każdą próbkę umieszczono w pojemnikach z wodą w taki sposób, aby woda wnikała do ABK na skutek kapilarnego podciągania. Próbkę ważono, co 6 godzin i każdorazowo obliczano wilgotność w . Założono,

że w pierwszej kolejności wyznaczona zostanie maksymalna wilgotność każdego rodzaju betonu komórkowego, a następnie próbki będą suszone tak, aby uzyskać zakładaną wilgotność. Założono, że badania wytrzymałości będą prowadzone przy względnych wilgotnościach wynoszących: $w/w_{\max} = 100\%; 67\%; 33\%; 23\%$ i 0% . Średnie wyniki badań poszczególnych serii próbek zestawiono w tablicy 2.

Maksymalne wilgotności betonu komórkowego zależały od nominalnej gęstości. Stwierdzono, że przy wzroście gęstości od $\rho = 397 \text{ kg/m}^3$ do 674 kg/m^3 maksymalna wilgotność zmieniła się w granicach $w_{\max} = 89,9\% - 53,3\%$, co pozwoliło wyznaczyć prostą najmniejszych kwadratów w postaci:

$$w_{\max} = -1,22 \frac{\rho}{1000} + 1,339, \text{ gdy } 400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \leq \rho \leq 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (16)$$

Przy każdej wilgotności wykonano badania niszczące określając wytrzymałość f_{Bw} , a wyniki przedstawiono na rys. 3a w funkcji wilgotności w . Natomiast na rys. 3b otrzymane wytrzymałości odniesiono do wytrzymałości ABK całkowicie suchego f_B i zobrazowano w funkcji wilgotności względnej $w/w_{\max}$.

Na podstawie otrzymanych wyników badań określono dwie proste empiryczne umożliwiające wyznaczenie względnej wytrzymałości ABK w funkcji względnej wilgotności w postaci:

$$\frac{f_{Bw}}{f_B} = -0,96 \frac{w}{w_{\max}} + 1 \rightarrow f_{Bw} = f_B \left(-0,96 \frac{w}{w_{\max}} + 1 \right), \quad (17)$$

$$\text{gdy } 0 \leq \frac{w}{w_{\max}} \leq 0,31$$

$$\frac{f_{Bw}}{f_B} = -0,15 \frac{w}{w_{\max}} + 0,74 \rightarrow f_{Bw} = f_B \left(-0,15 \frac{w}{w_{\max}} + 0,74 \right), \quad (18)$$

$$\text{gdy } 0,31 < \frac{w}{w_{\max}} \leq 1,0$$

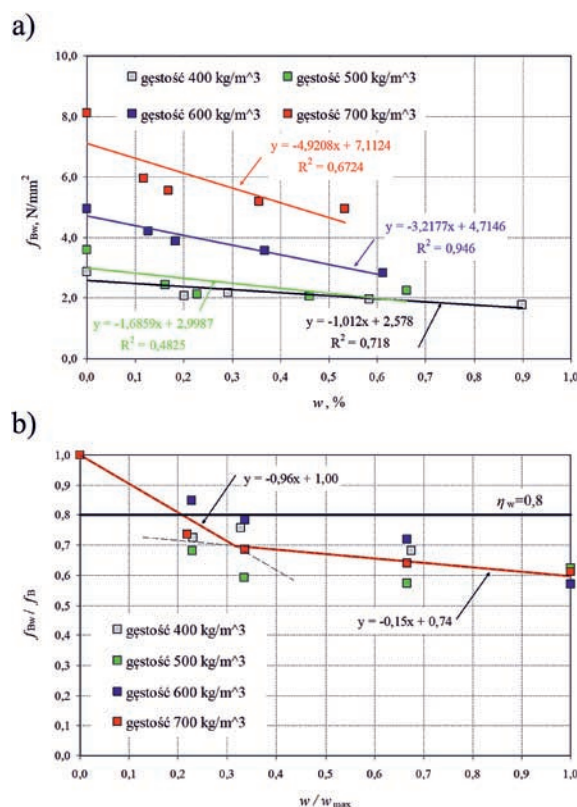
Uzyskana ze wzorów (17) i (18) wytrzymałość f_{Bw} uwzględnia wpływy zawilgocenia, a więc nie wymaga konwersji do średniej znormalizowanej wytrzymałości na ściskanie f_b .

4. Przykład określania charakterystycznej wytrzymałości muru z ABK

Przedstawione rozważania wykorzystano do określania charakterystycznej wytrzymałości muru na ściskanie wykonanego z ABK ze spoinami cienkowarstwowymi. Procedurę zobrazowano następującym przykładem.

Przedmiotem badań była nieotynkowana ściana budynku wykonanego z elementów murowych z ABK podanego oddziaływaniom środowiskowym przez kilkumiesięczny okres wiosenno - letni. Oględziny wykazały, widoczne gołym okiem zawilgocenia niemal wszystkich ścian oraz pionowe zarysowania spowodowane prawdopodobnie działaniem obciążeń pionowych wynikających z magazynowania na jednym ze stropów materiałów budowlanych. Wykonane sprawdzające obliczenia wykazały, że przy przyjętej w projekcie wytrzymałości na ściskanie warunki nośności powinny być spełnione. Zachodziło jednak podejrzenie, że wytrzymałość zastosowanego materiału ze względu na silne zawilgocenie może być obniżona. Celem badań było określenie charakterystycznej

wytrzymałości muru na ściskanie. Na potrzeby badań pobrano przy użyciu wiertnicy z zarysowanej ściany 6 rdzeni o średnicy 50 mm i długości 120 mm. W każdym miejscu wykonano pomiary średniej wilgotności rdzeni metodą wagową według wzoru (15). Po przewiezieniu do Laboratorium każdą próbkę docięto tak, że stosunek wysokości do średnicy wynosił $h/\phi = 2$. Następnie próbki wysuszono do stałej masy, określono gęstość pozorną ρ , a na zakończenie wykonano badania niszczące określając wytrzymałość na ściskanie f_c . Uzyskane wyniki zestawiono w tablicy 3. i tablicy 4. Otrzymano wytrzymałość ABK w stanie powietrzno-suchym wynoszącą $f_B = 3,59 \text{ N/mm}^2$, a obliczona na podstawie wzoru (1) znormalizowana wytrzymałość elementu na ściskanie wynosiła $f_b = 2,87 \text{ N/mm}^2$. Z kolei otrzymana wytrzymałość uwzględniająca wpływ zawilgocenia, którą traktować można jako średnią, znormalizowaną wytrzymałość na ściskanie była równa $f_{bw} = 2,41 \text{ N/mm}^2$.



Rys. 3. Wyniki badań wytrzymałości ABK z uwzględnieniem wilgotności: a) wytrzymałość f_{Bw} w funkcji wilgotności w , b) względne wytrzymałości ABK f_{Bw}/f_B w funkcji $w/w_{\max}$.

Fig. 3. Test results of AAC strength including humidity: a) strength of AAC f_{Bw} as a function of humidity w , b) Relative strength of AAC f_{Bw}/f_B in function $w/w_{\max}$.

Uzyskany wynik pokazuje, że stosując normowy współczynnik $\eta_w = 0,8$ zbyt liberalnie szacuje wytrzymałość na ściskanie (rys. 3b), szczególnie przy wilgotnościach $w > 20\%$. Ostatecznie charakterystyczne wytrzymałości na ściskanie muru na ściskanie otrzymane według zależności normowej oraz według własnych badań wyniosły:

$$f_k = K f_b^{0,85} = 0,75 \cdot (2,87)^{0,85} = 1,84 \text{ N/mm}^2 \quad (19)$$

$$f_k = K f_{bw}^{0,85} = 0,75 \cdot (2,41)^{0,85} = 1,59 \text{ N/mm}^2 \quad (20)$$

Tab. 3. Właściwości próbek ABK.

Tab. 3. Properties of AAC specimens.

Lp.	Wysokość próbki, h, mm	Średnica próbki, ϕ , mm	Objętość próbki, V, mm ³	Gęstość próbki, kg/m ³	Wilgotność próbki w, % wg (15)	Maksymalna wilgotność, % wg (16)	Wytrzymałość na ściskanie, f_c , N/mm ²	$\frac{V}{100h\phi} + \frac{h}{\phi}$
1	101	51	206325	528	25	69,5	4,12	2,365
2	102	50	200277	589	47	62,0	3,11	2,401
3	99	50	194389	536	24	68,5	3,89	2,389
4	101	50	198313	555	27	66,2	3,55	2,397
5	100	50	196350	524	26	70,0	3,22	2,393
6	98	50	192423	564	32	65,1	3,05	2,385

Tab. 4. Wyniki badań wytrzymałościowych próbek ABK.

Tab. 4. Results of strength tests of AAC specimens.

Lp.	Współczynnik a wg (13)	Współczynnik b wg (14)	Współczynnik poprawkowy Δb	Równanie krzywej	Wytrzymałość w stanie suchym f_B , N/mm ²	Wytrzymałość w stanie wilgotnym f_{Bw} , N/mm ² wg (17) lub (18)
1	0,306	0,737	0,11	$\frac{f_c}{f_B} = 0,737 + 0,11 + \frac{0,306}{\frac{V}{100h\phi} + \frac{h}{\phi}}$	4,22	2,89
2	0,366	0,697	0,12	$\frac{f_c}{f_B} = 0,697 + 0,12 + \frac{0,366}{\frac{V}{100h\phi} + \frac{h}{\phi}}$	3,21	2,01
3	0,314	0,732	0,11	$\frac{f_c}{f_B} = 0,732 + 0,11 + \frac{0,314}{\frac{V}{100h\phi} + \frac{h}{\phi}}$	3,99	2,74
4	0,333	0,719	0,11	$\frac{f_c}{f_B} = 0,719 + 0,11 + \frac{0,333}{\frac{V}{100h\phi} + \frac{h}{\phi}}$	3,65	2,48
5	0,302	0,740	0,10	$\frac{f_c}{f_B} = 0,740 + 0,10 + \frac{0,302}{\frac{V}{100h\phi} + \frac{h}{\phi}}$	3,30	2,26
6	0,341	0,713	0,12	$\frac{f_c}{f_B} = 0,713 + 0,12 + \frac{0,341}{\frac{V}{100h\phi} + \frac{h}{\phi}}$	3,14	2,09
średnia					3,59	2,41

5. Podsumowanie

Oprócz wpływu kształtu próbek w przedstawionych badaniach wykazano istotny wpływ wilgotności materiału. Największe 30% obniżenie wytrzymałości na ściskanie w stosunku do próbek wysuszonych do stałej masy obserwowano przy wilgotnościach rzędu $w = 0 - 30\%$. Większe wilgotności wywoływały obniżenie wytrzymałości o około 10%. Przedstawione badania wraz z procedurą określania wytrzymałości ABK na ściskanie będą w przyszłości uzupełniane i rozwijane. Planuje się, wykonać badania próbek prostopadłościennych o zróżnicowanych wymiarach podstaw w stanie powietrzno-suchym i wilgotnym.

6. Literatura/References

- [1] B. A. Suprenant, M. P. Schuller: Nondestructive Evaluation & Testing of Masonry Structures. Hanley Wood Inc. ISBN 978-0924659577.
- [2] PN-EN 771-4:2011 Wymagania dotyczące elementów murowych. Część 4. Elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego.
- [3] Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk: Konstrukcje Murowe według Eurokodu 6 i norm związanych. Tom 1. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
- [4] K. Łaskawiec, L. Misiewicz: Deklarowane i uzyskiwane z badań właściwości użytkowe elementów murowych z ABK produkowanych w Polsce. Materiały Budowlane 2014, 11, s. 46-47.
- [5] A.M. Neville: Właściwości betonu. 5th edition, Pearson Education Limited, 2011, Essex, England.
- [6] G. Zapotoczna-Sytek, S. Balkovic: Autoklawizowany beton komórkowy. Technologia. Właściwości. Wykonawstwo. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
- [7] W. Mazur, Ł. Drobiec, R. Jasiński: Effects of specimen dimensions and shape on compressive strength of specific autoclaved aerated concrete. ICAAC 6th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete. Postdam, Germany, September 4-6 2018 r., s. 541-556.

Jerzy Kozłowski^{1*}, Martin Czychy², Jakub Kozłowski³¹SLV-GSI Polska Sp. z o.o., Zabrze²GSI-SLV Duisburg Duisburg, Niemcy³Politechnika Częstochowska

Badania nieniszczące stosowane w procesie zabezpieczenia antykorozyjnego konstrukcji stalowych

Nondestructive testing that is used during the process of corrosion protection of steel structures

ABSTRACT

The paper indicates the need to properly execution of the corrosion process of steel structures, due to its fundamental impact on their durability. Reference is also made to the requirements of EN 1090, harmonized with Regulation 305/2011, in the scope of anti-corrosive protection of steel building structures.

The process of corrosion protection of the structure should be treated as a special process. It should therefore be carried out by competent personnel, and the correct implementation of its subsequent stages should be confirmed by the results and tests provided for in the corrosion protection specification.

The paper discusses examples of non-destructive tests used at particular stages of the process.

Following is discussed:

- tests on surface preparation before application of anti-corrosion coatings;
- testing in terms of required environmental conditions;
- tests carried out during application of coatings;
- tests assessing the proper execution of coatings.

Reference was also made to the competence requirements of personnel supervising the execution and conducting tests in the corrosion protection process.

Keywords: corrosion protection; FROSIO inspector; Factory production control; anti-corrosion personnel

STRESZCZENIE

W referacie wskazano na konieczność właściwego prowadzenia procesu antykorozyjnego konstrukcji stalowych, ze względu na jego zasadniczy wpływ na ich trwałość.

Odniesiono się również do wymagań normy EN 1090, zharmonizowanej z Rozporządzeniem 305/2011, w zakresie zabezpieczenia antykorozyjnego stalowych konstrukcji budowlanych.

Proces zabezpieczenia antykorozyjnego konstrukcji należy traktować jako proces specjalny. Powinien być zatem wykonywany przez kompetentny personel, a prawidłowe przeprowadzenie kolejnych jego etapów powinno być potwierdzane wynikami przewidzianych, w specyfikacji zabezpieczenia antykorozyjnego, badań.

W referacie omówiono przykłady badań nieniszczących stosowanych na poszczególnych etapach procesu.

Omówiono między innymi:

- badania dotyczące przygotowania powierzchni przed nakładaniem powłok antykorozyjnych;
- badania w zakresie wymaganych warunków środowiskowych;
- badania prowadzone w trakcie nakładania powłok;
- badania oceniające właściwe wykonanie powłok.

Odniesiono się również do wymagań w zakresie kompetencji personelu nadzorującego wykonanie i prowadzącego badania w procesie zabezpieczenia antykorozyjnego.

Słowa kluczowe: zabezpieczenie antykorozyjne; inspektor FROSIO; Zakładowa Kontrola Produkcji; personel antykorozyjny

1. Wstęp

Jedną z ważniejszych cech każdej konstrukcji jest jej trwałość, tzn. przydatność w określonym czasie użytkowania, bez utraty właściwości użytkowych lub jej osłabienia przy założonych w projekcie warunkach eksploatacji. Oczekiwana trwałość to jedna z zasadniczych danych wejściowych do procesu projektowania konstrukcji. Zależy ona od zastosowania konstrukcji, warunków jej eksploatacji oraz od zastosowanych środków ochrony przed korozją np. powłoki metaliczne, powłoki nieorganiczne, powłoki duplex. Ze względu na to, że nie ma bezpośredniej metody badania trwałości, ocenia się ją pośrednio, sprawdzając wymagania dotyczące zabezpieczenia antykorozyjnego powierzchni podane w specyfikacji konstrukcji z warunkami jej eksploatacji. Trwałości konstrukcji to również

jedna z właściwości użytkowych, którą wytwórca stalowych konstrukcji budowlanych zobowiązany jest zadeklarować w deklaracji właściwości użytkowych przed oznakowaniem konstrukcji znakiem CE. Obowiązek znakowania konstrukcji budowlanych znakiem CE wynika bezpośrednio z wymagań Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011. Oznakowania może dokonać tylko wytwórca, który posiada wdrożony i certyfikowany system Zakładowej Kontroli Produkcji zgodny z wymaganiami normy EN 1090-1. Wytwarzanie konstrukcji musi być zatem zgodne z wymaganiami normy EN 1090-2. W wymaganiach tych zawarte są również odniesienia do zabezpieczenia antykorozyjnego, a proces antykorozyjny postrzegany jest jako proces specjalny. Musi on zatem przebiegać w nadzorowanych warunkach, z zastosowaniem odpowiednich kontroli, a nadzór nad procesem powinien być wykonywany kompetentny i wykwalifikowany personel.

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

Niniejszy artykuł odnosi się do wszystkich wspomnianych warunków, ze szczególnym uwzględnieniem badań nieniszczących stosowanych w procesie antykorozji.

2. Badania w trakcie przygotowania powierzchni przed nakładaniem powłok

2.1 Ocena stopnia skorodowania

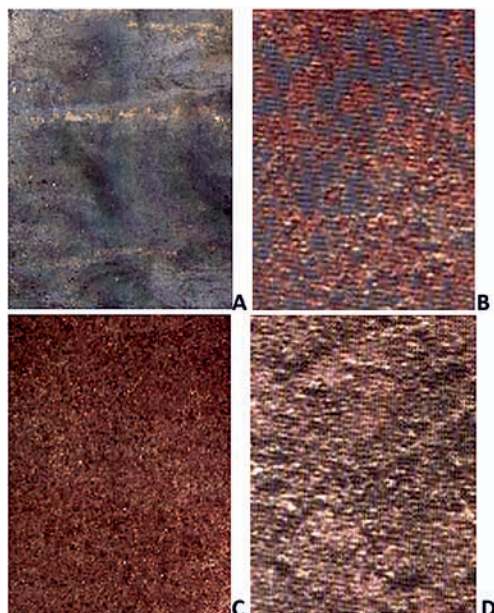
Pierwszym elementem kontroli jest ocena wizualna materiałów stalowych (blach, rur, kształtowników) pod względem stopnia skorodowania wg normy EN ISO 8501-1[1].

Opisuje ona 4 stopnie skorodowania A, B, C, D. Dla każdego z powyższych stopni przedstawia wzorce fotograficzne (rys 1.) wraz z opisem.

Stopnie skorodowania zdefiniowano również opisowo:

- stopień skorodowania A – powierzchnia stali w znacznym stopniu pokryta przylegającą zgorzeliną walcowniczą, lecz w małym stopniu, jeśli w ogóle rdza;
- stopień skorodowania B – powierzchnia stali, która zaczęła korodować i z której zaczęła się złuszczać zgorzelina walcownicza;
- stopień skorodowania C – powierzchnia stali, na której zgorzelina walcownicza przekorodowała lub z której można ją zeskrobać, lecz z wżerami słabo widocznymi gołym okiem;
- stopień skorodowania D – powierzchnia stali, na której zgorzelina walcownicza przekorodowała i na której powszechnie występujące wżery są widoczne gołym okiem.

Oceny dokonuje się poprzez badanie wizualne, w trakcie którego porównuje się powierzchnie materiałów z wzorcami fotograficznymi i definicjami opisowymi wg normy EN ISO 8501-1 (rys 1.).



Rys. 1. Stopnie skorodowania A, B, C, D

Fig. 1. Rust grade A, B, C, D

Powierzchnie ocenia się przy dobrym rozproszonym świetle dziennym lub przy równoważnym oświetleniu sztucznym.

Jako stopień przyjmuje najgorszy stan jaki jest widoczny.

Stopień skorodowania musi odpowiadać wymaganiom zawartym w specyfikacji konstrukcji.

2.2 Ocena stopnia czystości powierzchni po obróbce

Ocenę stopnia czystości powierzchni dokonuje się po jej całkowitym przygotowaniu do nałożenia powłoki antykorozyjnej, np. po obróbce strumieniowo-ścierniej.

Oceny dokonuje się, analogicznie jak przy ocenie stopnia skorodowania, poprzez badanie wizualne i porównanie z wzorcami fotograficznymi i definicjami opisowymi zawartymi w normie EN ISO 8501-1. Norma zawiera fotografie i definicje dla stopni czystości powierzchni po: obróbce strumieniowo-ścierniej - Sa1 (lekka obróbka strumieniowo-ścierna), Sa2 (dokładna obróbka strumieniowo-ścierna), Sa2½ (bardzo dokładna obróbka strumieniowo-ścierna), Sa3 (obróbka strumieniowo-ścierna do wizualnie czystej stali); czyszczeniu powierzchni narzędziem ręcznym i narzędziem ręcznym z napędem mechanicznym – St2 (dokładne oczyszczenie), St3 (bardzo dokładne oczyszczenie); oraz czyszczeniu powierzchni płomieniem – Fl (czyszczenie płomieniem).

Jako stopień czystości przyjmuje najgorszy stan jaki jest widoczny.

2.3 Ocena stopnia przygotowania powierzchni

Ocenę stopnia przygotowania spoin, krawędzi i innych obszarów z wadami powierzchni przeprowadza się zgodnie z wymaganiami normy EN ISO 8501-3[2].

Wady na powierzchni spoin, nieprawidłowo wykończone krawędzie, wady na powierzchni materiału stanowią zazwyczaj punkty w których rozpoczyna się rozwój korozji. Należy pamiętać, że wady te stają się widoczne zarówno przed, jak i po obróbce strumieniowo-ścierniej. Niektóre z nich ujawniają się dopiero podczas obróbki np. pęcherz gazowy ujawniony tuż pod powierzchnią łąca spoiny, podczas obróbki strumieniowo-ścierniej może ujawnić się jako por.

W normie EN ISO 8501-3 podano trzy stopnie przygotowania: P1, P2, P3. Stopnie te opisano w następujący sposób; P1 - lekkie przygotowanie (brak przygotowania lub jedynie minimalne przygotowanie wymagane przed nałożeniem farby, P2 - dokładne przygotowanie (wymaga naprawienia większości wad), P3 – bardzo dokładne przygotowanie (na powierzchni wymagany jest brak istotnych, widocznych wad). Norma jednocześnie zaleca uzgodnienie między zainteresowanymi stronami, istotności widocznych wad.

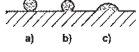
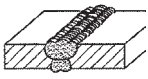
Badanie przeprowadza się poprzez ocenę wizualną powierzchni i porównanie zaobserwowanych wad z wymaganiami zawartymi w tablicy 1 normy EN ISO 8501-3.

2.4 Ocena profilu powierzchni

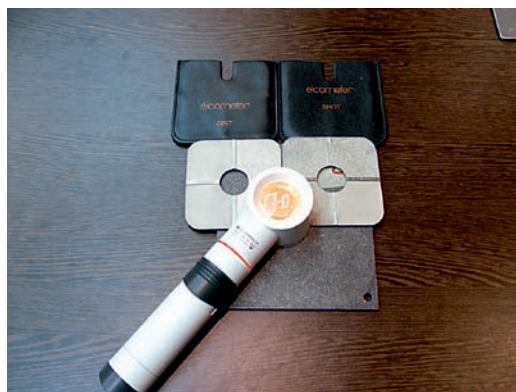
Przyczepność powłoki malarskiej do podłoża warunkowana jest w dużej mierze uzyskaniem właściwego (wymaganego w specyfikacji zabezpieczenia antykorozyjnego lub w karcie technicznej zastosowanej farby) profilu powierzchni. W zależności od zastosowanego ścierniwa możemy uzyskać powierzchnię o profilu ostrokątnym (grit) lub okrągłym (shot). Każdy z tych profili dzieli się jeszcze na 3 podstawowe zakresy: drobnoziarnisty (fine), pośredni (medium), gruboziarnisty (coarse).

Tab. 1. Wady i stopnie przygotowania [2].

Tab. 1. Defects and preparation grades [2].

Rodzaj wady		Stopnie przygotowania		
Opis	Ilustracja	P1	P2	P3
1.1 Rozprysk spawalnicy		Na powierzchni nie powinno być żadnego luźnego rozprysku spawalnicy a	Na powierzchni nie powinno być żadnego luźnego i słabo przylegającego rozprysku (patrz a i b). Może pozostać rozprysk jak w c	Na powierzchni nie powinno być żadnego rozprysku spawalnicy
1.2 Łuska/profil spoiny		Brak przygotowania	Powierzchnię należy obrobić (np. metodą szlifowania), aby usunąć wszystkie nieregularne i ostrokrawędziowe profile	Powierzchnię całkowicie obrobić tj. wygładzić
2.3 Krawędzie cięte na gorąco		Na powierzchni nie powinno być żuźla i luźnej zgorzeliny	Żadna z części krawędzi nie powinna mieć nieregularnego profilu	Powierzchnię cięcia należy usunąć, a krawędzie zaokrąglić do promienia nie mniejszego niż 2mm

Oceny profilu dokonuje się wizualnie, za pomocą wzorców porównawczych w oparciu o normę EN ISO 8503-2[3]. W zależności od użytego ścierniwa stosuje się wzorzec G (grit) – dla ścierniwa ostrokańnego lub wzorzec S (shot) dla ścierniwa kulistego lub cylindrycznego. Ocenianą powierzchnię porównuje się z odpowiednimi segmentami wzorca z zastosowaniem lupy o powiększeniu x7. (rys 2)

Rys. 2. Ocena profile powierzchni z zastosowaniem wzorcy G i S.
Fig. 2. Assessment of surface roughness with comparators G and S.

Określenie profilu powierzchni można również zrealizować za pomocą elektronicznych chropowościomierzy stykowych wg EN ISO 8503-4[4] (rys 3.) lub za pomocą taśmy replikacyjnej wg EN ISO 8503-4 (rys 4.).

Rys. 3. Przyrząd stykowy.
Fig. 3. Surface roughness tester.

Wybór metody oraz rodzaj zastosowanych przyrządów powinny być uzgodnione między zainteresowanymi stronami.

Rys. 4. Pomiar za pomocą taśmy replikacyjnej.
Fig. 4. Measurement with replica tape.

2.5 Ocena pozostałości kurzu

Powierzchnia przed nałożeniem farby powinna być oczyszczona z pozostałości kurzu. Pozostający na powierzchni kurz może powodować zmniejszenie przyczepności nakładanych powłok organicznych do powierzchni. Dopuszczalny stopień pozostałości kurzu powinien być określony w specyfikacji dla zabezpieczenia antykorozyjnego bądź w karcie technicznej farby. Badanie to przeprowadza się wg normy EN ISO 8502-3 [5] za pomocą taśmy samoprzylepnej. Odcinek bezbarwnej, przeźroczystej taśmy przyklejamy na badanej powierzchni, dociskamy kciukiem lub specjalnym wálkiem obciążonym sprężyną. Po oderwaniu taśmy przyklejamy ją na płytę obrazową i porównując wzrokowo powierzchnię taśmy z wzorcami zamieszczonymi w ww. normie. Na tej podstawie oceniamy stopień ilości kurzu (od 1 do 5) oraz klasę wielkości cząstek kurzu (od 0 do 5 przy czym „0” to cząstki niewidoczne przy powiększeniu 10x, a „5” - to cząstki o średnicy ponad 2,5mm).

2.6 Ocena zanieczyszczeń jonowych

Zanieczyszczenia solami to kolejny z ważnych czynników wpływających na właściwości powłok antykorozyjnych. Jeśli nie zostaną usunięte przed nałożeniem powłoki, reakcje chemiczne i fizyczne mogą doprowadzić do tworzenia się pęcherzy, nagromadzenia rdzy i w konsekwencji osłabienia

przyczepności pomiędzy zabezpieczaną powierzchnią i naniesioną powłoką. Dla określenia poziomu zanieczyszczeń stosuje się np. badanie metodą Bresle'a, w oparciu o wymagania norm EN ISO 8502-6 [6] i -9 [7] (rys 5.).



Rys. 5. Badanie metodą Bresle'a.
Fig. 5. Bresley test method.

Na badanej powierzchni umieszczamy samoprzylepną celkę. Do jej komory wprowadzamy rozpuszczalnik (woda dejonizowana), a następnie ją odciągamy. Czynność tą powtarzamy, wg EN ISO 8502-9 dziesięć razy, po czym dokonujemy pomiaru przewodnictwa rozpuszczalnika za pomocą konduktometru. Dopuszczalny poziom pozostających zanieczyszczeń powinien być określony w specyfikacji zabezpieczenia antykorozyjnego.

3. Badania w trakcie nakładania powłok

3.1 Ocena warunków klimatycznych

Uzyskanie wymaganej trwałości ochrony powłoki antykorozyjnej jest możliwe tylko wówczas gdy m.in. zapewnimy optymalne warunki klimatyczne w trakcie wykonywania prac antykorozyjnych. Warunki te muszą odpowiadać wymaganiom podanym w kartach technicznych materiałów malarskich. Dotyczy to również czasu schnięcia i utwardzania powłoki. W przeciwnym wypadku może dojść do

zakłóceń w przyczepności między podłożem, a materiałem powłokowym. Czynniki jakie należy kontrolować to m.in. temperatura otoczenia, temperatura obiektu, wilgotność względna, temperatura punktu rosy.

Urządzenia do kontroli warunków klimatycznych to m.in. urządzenia elektroniczne (rys 6.) i mechaniczne (rys 7.) pozwalające na pomiar wszystkich wymieniony wyżej czynników oraz psychrometry pozwalające na wyznaczenie temperatury punktu rosy (rys 8.).



Rys. 6. Urządzenia do kontroli warunków klimatycznych elektroniczne.
Fig. 6. Electronical climate control device.



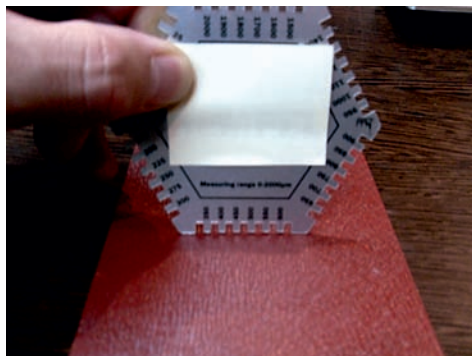
Rys. 7. Urządzenia do kontroli warunków klimatycznych mechaniczne.
Fig. 7. Mechanical climate control device.



Rys. 8. Psychrometr aspiracyjny oraz psychrometr wirnikowy.
Fig. 8. Aspirational psychrometer and rotary psychrometer.

3.2 Pomiar grubości na mokro

W celu zapewnienia właściwej grubości wykonanej powłoki podczas malowania należy okresowo dokonywać pomiarów grubości warstwy mokrej. Pomiarów dokonuje się z wykorzystaniem przyrządów grzebieniowych (rys 9.), przyrządów krążkowych (rys 11.) lub przyrządów tarczowych. Ponadto wymalowaną powłokę należy ocenić wizualnie pod kątem wystąpienia defektów, marszczenia się, kraterów, pęcherzy, zacieków itp. Stwierdzone niezgodności należy bezwzględnie usunąć przez nałożeniem kolejnej warstwy farby.



Rys. 9. Przrząd grzebieniowy.
Fig. 9. Notch gage.



Rys. 10. Przrząd krążkowy.
Fig. 10. Wet film gage.

4. Badania po nałożeniu powłoki

Ocena nałożonego systemu powłokowego prowadzona jest w celu potwierdzenia wykonania powłoki zgodnie z wymaganiami zawartymi w specyfikacji. Kontrola ta najczęściej oparta jest o ocenę wyglądu powłoki i pomiar grubości. Jeśli przewiduje to specyfikacja stosuje się również inne badania nieniszczące, takie jak np. badanie nieciągłości powłoki.

4.1 Ocena wyglądu powłoki

Ocena wyglądu prowadzona jest poprzez badanie wizualne, okiem nieuzbrojonym w świetle rozproszonym, najlepiej dziennym. Brak jest obligatoryjnych wymagań np. w stosunku do wymaganego natężenia oświetlenia. Istnieją co prawda zapisy w normie PN-EN ISO 13076 [8] „światło dzienne powinno mieć natężenie min 2000 lx, przy czym należy unikać obserwacji w bezpośrednim świetle słonecznym. W przypadku zastosowania światła sztucznego, jego natężenie nie powinno być mniejsze niż 750 lx”, jednak zapis ten może być obowiązującym dla danego kontraktu jeśli powyższa norma

zostanie przywołana w specyfikacji wyrobu.

Podczas obserwacji należy ocenić m.in. równomierność i ciągłość powłoki oraz barwę i połysk. Ocenę barwy dokonuje się poprzez porównanie powłoki z wzorcami kolorów (rys 11.) lub poprzez pomiar przy pomocy spektrofotometru (rys 12.) natomiast połysk mierzony jest przy pomocy połyskomierzy (rys 13.). Poprzez badania wizualne ocena się powierzchnię pod kątem obecności wad takich jak: spękania, zmarszczenia, zacieki, pęcherze, rybce oczka, kraterzy, skórka pomarańczowa, niedomalowania, suchy natrysk, itp.



Rys. 11. Wzornik kolorów RAL.
Fig. 11. RAL sample card.



Rys. 12. Spektrofotometr.
Fig. 12. Spectrometer.



Rys. 13. Połyskomierz.
Fig. 13. Gloss meter.

4.2 Pomiar grubości powłoki suchej

Grubość to jeden z podstawowych parametrów nałożonej powłoki. Zakres grubości powinien być zgodny z założeniami zawartymi w specyfikacji. Pomiary, w zależności od

podłoża, na którym nałożona jest powłoka, wykonuje się zgodnie z zaleceniami opisanymi w normach PN-EN ISO 2808[9], PN-EN ISO 19840[10]. Pomiarów można dokonać różnymi metodami, np. przyrządami wykorzystującymi magnetyczną siłę przyciągania (rys 14.), przyrządami wykorzystującymi indukcję magnetyczną lub prądy wirowe (rys 15.). W przypadku pomiaru grubości na powierzchniach chropowatych należy w wynikach pomiarów uwzględnić wartości korygujące wg normy PN-EN ISO 19840.



Rys. 14. Przyrząd magnetyczny.
Fig. 14. Magnetic gauge.



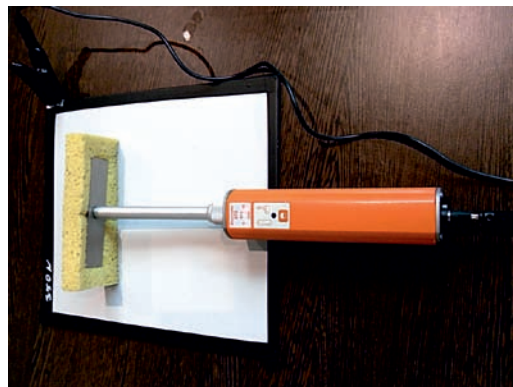
Rys. 15. Grubościomierz elektroniczny.
Fig. 15. Electronical gauge.

4.3 Badanie porowatości (nieciągłości) powłoki suchej

Nieciągłości mogące wystąpić w nałożonej powłoce to m.in. wgłębienia, pinhole, skazy, ubytki, pęknięcia, zbyt cienka powłoka, wtrącenie lub zanieczyszczenie w powłoce, znacznie zmniejszające odporność powłoki na przebicie. Ich występowanie w systemach powłokowych na przewodzących powierzchniach metalowych określa się za pomocą metody o niskim napięciu, za pomocą gąbki lub za pomocą wysokiego napięcia z wyładowaniem iskrowym. Badanie wykonuje się w oparciu o normę PN-EN ISO 29601[11].

Mierniki niskiego napięcia (rys 16.) wykorzystują wilgoć do wykrywania przepływu prądu elektrycznego w miejscach wady w powłoce natomiast mierniki wysokonapięciowe (rys 17.) wytwarzają iskrę w miejscu, gdzie występuje niższa wytrzymałość dielektryczną niż w prawidłowo nałożonej powłoce. Urządzenie jest połączone z metalowym podłożem za pomocą kabla, który zwraca sygnał, a napięcie prądu stałego jest przykładane do sondy. Jeśli zostanie wykryta

przerwa, zostanie wyzwolony sygnał alarmowy. Napięcie testowe określa się w zależności od grubości nałożonej, nieprzewodzącej powłoki.



Rys. 16. Miernik niskonapięciowy (poroskop).
Fig. 16. Low voltage holiday tester.



Rys. 17. Miernik wysokonapięciowy (poroskop).
Fig. 17. High voltage holiday tester.

5. Personel antykorozji

Jak wspomniano na wstępie, zabezpieczenia antykorozyjne to jeden z elementów zapewniających konstrukcji wymaganą trwałość. Właściwe wykonanie prac antykorozyjnych możliwe jest tylko wówczas gdy wykonywane i nadzorowane jest ono przez kompetentny personel. Wiedza personelu powinna obejmować między innymi: przygotowanie powierzchni do nałożenia powłok; rodzaje materiałów powłokowych oraz wymagania dla ich zastosowania, przechowywanie i przygotowania materiałów powłokowych do użycia; warunki środowiskowe dla nakładania powłok; kontrolę procesu; kontrolę i badania wykonanych powłok; wady występujące w powłokach i ich przyczyny; prowadzenie dokumentacji związanej z dokumentowaniem warunków i przebiegu procesu jak również kontrolę i badania wykonanych powłok. Niestety w zakresie wymagań dla kompetencji personelu antykorozji nie ma jednoznacznych, obligatoryjnych wymagań np. jak to jest w przypadku personelu wykonującego badania nieniszczące złączy spawanych. Poza ogólnymi stwierdzeniami w normach EN ISO 12944-7 [12] „Prace wymagające szczególnej staranności powinny być wykonywane jedynie przez personel mający kwalifikacje potwierdzone przez upoważnioną instytucję, pod warunkiem, że strony nie uzgodniły inaczej, oraz EN 1090-2[13] „System FPC powinien opisywać środki aby personel zaangażowany

w działania mające wpływ na ocenę zgodności elementów miał odpowiednie kwalifikacje i był szkolny w zakresie klasy wykonania egzekwowanej przez producenta” brak jest szczegółowych uregulowań. Wyjątkiem są nieliczne dokumenty (M501[14], ZTV-ING[15], VGB[16]), dedykowane dla określonych rodzajów konstrukcji. Ze względu na kwalifikację procesu antykorozyjnego, jako procesu specjalnego, niezmiernie ważnym jest, by w specyfikacjach dla zabezpieczenia antykorozyjnego wyrobu strony kontraktu określały również minimalne kwalifikacje i kompetencje personelu antykorozyjnego, w tym personelu prowadzącego badania na poszczególnych etapach procesu. Wykonawcy powinni również zwrócić szczególną uwagę na szkolenie personelu antykorozyjnego. Niestety w wielu przypadkach szkolenie pozostaje na poziomie krótkich szkoleń, które często poza wystawionym świadectwem, dają tylko złudzenie pełnego zapoznania się z procesem. Zagadnienia dotyczące personelu antykorozyjnego szerzej zostały opisane w:

- Wybrane zagadnienia z zakresu antykorozyjnego stalowych konstrukcji spawanych na podstawie niemieckich przepisów ZTV-ING i VGB/BAW [17],
- Powrót do podstaw - Specyfikacja konstrukcji stalowych wg EN 1090 [18],
- Wymagane kompetencje i formy kształcenia personelu antykorozyjnego w Polsce i Niemczech – podobieństwa i różnice” [19].

Szczególnie w przypadku kontraktów wykonywanych dla klientów zagranicznych należy mieć na uwadze, by personel antykorozyjny posiadał certyfikaty uznawane na rynku międzynarodowym np. FROSIO lub NACE. Należy podkreślić, że kursy inspektorów antykorozyjnych FROSIO od ponad 2 lat prowadzone są w Polsce w języku polskim.

6. Wnioski

Trwałość konstrukcji, a co za tym idzie, jej zabezpieczenie antykorozyjne, to jedna z właściwości użytkowych, którą wytwórca stalowych i aluminiowych konstrukcji budowlanych musi zadeklarować w deklaracji właściwości użytkowych, by spełnić wymagania Rozporządzenia 305/2011 oraz normy EN 1090.

Niezmiernie ważnym jest właściwe opracowanie specyfikacji dla zabezpieczenia antykorozyjnego. Powinna ona zawierać wszystkie niezbędne informacje dla prawidłowego wykonania i oceny zabezpieczenia. Dla uniknięcia nieporozumień należy w niej określić również zakres wymaganych badań, zastosowany sprzęt do badań, kryteria akceptacji wyników, kwalifikacje i kompetencje personelu.

Specyfikacja powinna być opracowana i uzgodniona między zainteresowanymi stronami przed rozpoczęciem prac.

Przedstawione w artykule badania, to tylko przykłady badań nieniszczących jakie są możliwe do zastosowania w procesie antykorozyjnego. Dokonanie najbardziej racjonalnego wyboru metod związane jest z posiadaniem wiedzy i doświadczenia przez osoby opracowujące specyfikacje dla zabezpieczenia antykorozyjnego oraz osoby wykonujące i nadzorujące proces oraz prowadzące wyspecyfikowane badania i kontrole.

Możliwość uzyskania certyfikatu inspektora antykorozyjnego FROSIO, na kursach prowadzonych w języku polskim znacznie rozszerzyło i ułatwiło zdobycie, uznawanych na całym świecie, kwalifikacji w zakresie antykorozyjnego.

7. Literatura/References

- [1] EN ISO 8501-1- Przygotowanie podłoża stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów -- Wzrokowa ocena czystości powierzchni -- Część 1: Stopnie skorodowania i stopnie przygotowania niepokrytych podłoża stalowych oraz podłoża stalowych po całkowitym usunięciu wcześniej nałożonych powłok
- [2] EN ISO 8501-3 - Przygotowanie podłoża stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów Wzrokowa ocena czystości powierzchni Część 3: Stopnie przygotowania spoin, krawędzi i innych obszarów z wadami powierzchni
- [3] EN ISO 8503-2 - Przygotowanie podłoża stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów. Charakterystyki chropowatości powierzchni podłoża stalowych po obróbce strumieniowo-ściernej. Metoda stopniowania profilu powierzchni stalowych po obróbce strumieniowo-ściernej. Sposób postępowania z użyciem wzorca
- [4] EN ISO 8503-4 - Przygotowanie podłoża stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów. Charakterystyki chropowatości powierzchni podłoża stalowych po obróbce strumieniowo-ściernej. Metoda kalibrowania wzorców ISO profilu powierzchni do określania profilu powierzchni. Sposób postępowania z użyciem przyrządu stykowego.
- [5] EN ISO 8502-3 - Przygotowanie podłoża stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów Badania służące do oceny czystości powierzchni Część 3: Ocena pozostałości kurzu na powierzchniach stalowych przygotowanych do malowania (metoda taśmy samoprzylepnej)
- [6] EN ISO 8502-6 - Przygotowanie podłoża stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów Badania służące do oceny czystości powierzchni Część 6: Ekstrakcja rozpuszczalnych zanieczyszczeń do analizy Metoda Bresle'a
- [7] EN ISO 8502-9 - Przygotowanie podłoża stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów Badania służące do oceny czystości powierzchni Część 9: Terenowa metoda konduktometrycznego oznaczania soli rozpuszczalnych w wodzie
- [8] PN-EN ISO 13076 - Farby i lakiery -- Oświetlenie i sposób przeprowadzenia ocen wizualnych
- [9] PN-EN ISO 2808 - Farby i lakiery. Oznaczanie grubości powłoki
- [10] PN-EN ISO 19840 - Farby i lakiery. Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów malarskich. Pomiar i kryteria przyjęcia grubości suchych powłok na chropowatych powierzchniach
- [11] PN-EN ISO 29601- Farby i lakiery - Ochrona przed korozją za pomocą ochronnych systemów malarskich - Ocena porowatości suchych powłok
- [12] PN-EN ISO 12944-7 - Farby i lakiery - Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów malarskich - Część 7: Wykonywanie i nadzór prac malarskich
- [13] EN 1090 - Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych
- [14] M501 – Norsok Standard M-501 Przygotowanie powierzchni i powłoka ochronna
- [15] ZTV-ING:2012 Dodatkowe warunki techniczne umów i wytyczne dla konstrukcji inżynierskich.
- [16] VGB/BAW - Standard ochrony antykorozyjnej morskich turbin wiatrowych i komponentów farm wiatrowych.
- [17] M. Czysch, J. Kozłowski, J. Kozłowski, „Wybrane zagadnienia z zakresu antykorozyjnego stalowych konstrukcji spawanych na podstawie niemieckich przepisów ZTV-ING i VGB/BAW” Przegląd Spawalnictwa, Vol.89, nr 5, str. 71-74, 2017.
- [18] J. Kozłowski, J. Kozłowski, „Powrót do podstaw - Specyfikacja konstrukcji stalowych wg EN 1090” Przegląd Spawalnictwa, Vol. 90, nr 5, str. 14-17, 2018.
- [19] M. Czysch, J. Kozłowski „Wymagane kompetencje i formy kształcenia personelu antykorozyjnego w Polsce i Niemczech – podobieństwa i różnice” materiały konferencyjne XI Konferencja Naukowo-Techniczna PSK 10-12.05.2017

Janusz Hołowaty*, Bernard Wichtowski
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Pierwszy na świecie drogowy kratownicowy most spawany w świetle badań NDT

The first arc-welded road truss bridge in the world in NDT tests

Streszczenie artykułu

W grudniu 2018 roku mija 90 lat od zakończenia w 1928 roku montażu konstrukcji stalowej pierwszego na świecie drogowego kratowniczego mostu spawanego, który do eksploatacji oddano w sierpniu 1929 roku. Obiekt projektu profesora Stefana Bryły ma konstrukcję kratową z jazdą dołem o rozpiętości przęsła 27 m. W artykule przygotowanym na 47 Krajową Konferencję Badań Nieniszczących, 16-18 październik 2018 r. w Kołobrzegu przedstawiono stan spawanego przęsła oceniony w trakcie nieniszczących badań odbiorczych w 1929 r. oraz badań diagnostycznych przeprowadzonych w latach 1958 i 1960 przez Politechnikę Szczecińską i Gdańską. Chęć zapoznania szerszego grona specjalistów i zachowanie chronologii zdarzeń spowodowały przygotowanie artykułu do publikacji w Biuletynie Instytutu Spawalnictwa nr 6/2018.

Przedstawiono główne aspekty artykułu związane z badaniami NDT historycznego mostu spawanego stanowiącego obecnie zabytek klasy 0 (Rys. 1 i 2). Most jest pierwszym na świecie spawanym mostem drogowy o konstrukcji kratowej.



Rys. 1. Stan obecny historycznego mostu kratowego w Maurzycach.
Fig. 1. Current condition of the historic truss bridge at Maurzyce.



Rys. 2. Widok ogólny montowanego przęsła mostu w 1928 r.
Fig. 2. General view of bridge span under assembly in 1928.

Montaż konstrukcji stalowej zakończono w grudniu 1928 (Rys. 2). Wszystkie połączenia spawane wykonano elektrodami Tensilend (produkcji belgijskiej). Do odbioru wykonanej konstrukcji mostu przeprowadzono nieniszczące badania wytrzymałościowe pod próbnym obciążeniem statycznym i dynamicznym. Próbne obciążenie statyczne modelowano jako równoważnik ruchomego obciążenia projektowego. Całkowite obciążenie projektowe wyniosło 136,7 t, a masa obciążenia próbnego miała wartość 139,0 t. Most wykazał sprężyste zachowanie i właściwą sztywność.

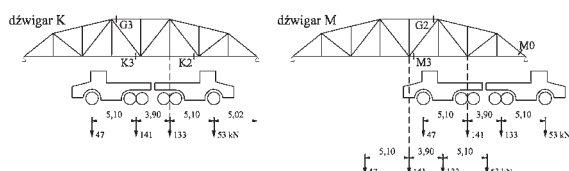
Po okresie 30-letniej eksploatacji mostu i po jego dwukrotnym uszkodzeniu w czasie wojny użytkownik mostu został zobligowany do wykonania badań rentgenograficznych spawanych złączy doczołowych przęsła w celu weryfikacji stanu spoin. Badania przeprowadziła Katedra Konstrukcji Stalowych Politechniki Szczecińskiej w 1958 r. Wykonano badania spoiny czołowych w dźwigarach głównych, a także część połączeń środników poprzecznic z kratami. Ogółem wykonano 76 rentgenogramów. Ocena rentgenogramów wykazała bardzo niską jakość spoin czołowych w konstrukcji mostu, co jest charakterystyczne dla wczesnych konstrukcji spawanych. W 72 odcinkach badanych spoin stwierdzono niezgodności spawalnicze poziomu jakości D i większe. Stanowi to 94,7% badanych złączy. Jednocześnie w 17 przypadkach stwierdzono pęknięcia podłużne w badanych spoinach. Fakt ten dotyczy w szczególności poziomych spoin poprzecznych pasów górnych kratownic, w których stwierdzono 13 pęknięć podłużnych, czyli w 54,2% badanych odcinków tych spoin.

Stwierdzona zła jakość spawanych złączy doczołowych w konstrukcji przęsła mostu, wymagała sprawdzenia zachowania się konstrukcji i przeprowadzono weryfikujące próbnego obciążenia obiektu celem oszacowania stopnia bezpiecznego jego użytkowania. Badania pod próbnym obciążeniem, łącznie z pomiarami tensometrycznymi odkształceń w dźwigarach głównych przeprowadziła Katedra Budownictwa Stalowego Politechniki Gdańskiej w 1960 r. Obciążeniem próbnym były dwie ciężarówki załadowane kamieniami. Naprężenia mierzono na obu dźwigarach (oznaczonych jako K i M) w sześciu węzłach, przy trzech schematach ustawienia samochodów przedstawionych na Rys. 3.

Analiza wyników pomiarów pod próbnymi obciążeniami wykazała, że most zachowuje się jako całość przestrzennie. Stwierdzono współpracę pomostu z dźwigarami głównymi.

*Autor korespondencyjny. E-mail: janusz.holowaty@zut.edu.pl

Podobnie obliczenia statyczne, uwzględniające współpracę pomostu, określiły wartość naprężeń na 8,0 MPa, a więc bardzo zbliżoną do otrzymanej z pomiarów wartości 8,23 MPa. Stwierdzoną współpracę pomostu potwierdziła również analiza sztywności konstrukcji. Maksymalne pomierzone ugięcie dźwigarów wyniosło 3,02 mm i jest ono bardzo zbliżone do ugięcia obliczonego, z uwzględnieniem współpracy pomostu, wynoszącego 2,96 mm.



Rys. 3. Dźwigary kratowe (K i M): badane węzły i schematy próbno- obciążenia.

Fig. 3. Truss girders (K and M): tested nodes and loading arrangements.

Badania nieniszczące historycznego mostu drogowego o konstrukcji spawanej umożliwiły rozpoznać zły stan złączy spawanych, ocenić zachowanie przęsła pod obciążeniem i dopuścić go do dalszej eksploatacji bez jakiegokolwiek wzmocnienia. Wyniki badań pod próbnymi obciążeniami potwierdziły dużą sztywność kratowego przęsła spawanego i współpracę pomostu.

Badania diagnostyczne in situ potwierdziły, że są najbardziej wiarygodną ocenę nośności obiektów. Badania te w sposób globalny pozwalają ocenić rzeczywiste zachowanie się konstrukcji przy danych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Rodzaje badań i zalecenia dotyczące projektowania wspomaganego badaniami omawia Eurokod PN-EN 1990:2004/A1:2008. Według autorów, szczególnie przydatne są wyniki uzyskiwane z badań mostów historycznych. Takim obiektem jest pierwszy na świecie spawany most drogowy o konstrukcji kratowej.

Bernard Wichtowski*, Krzysztof Pysiak

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Jakość spawanych połączeń doczołowych w stalowych mostach kolejowych Szczecina

The quality of butt welded joints in steel railway bridges in Szczecin

Streszczenie artykułu

1. Wstęp

Wpływ niezgodności spawalniczych (NS), a w szczególności pęknięć w spoinach, należy rozpatrywać indywidualnie, biorąc pod uwagę krzywe wytrzymałości zmęczeniowej dla danej niezgodności i rozwiązania konstrukcyjne analizowanego złącza. Należy wtedy zastosować kryteria Przydatności Użytkowej Konstrukcji (Fitness for Purpose), na podstawie których można ustalić czy NS jest dopuszczalna z punktu widzenia mechaniki pęknięcia i rzeczywistego stanu obciążenia złącza. Takie podejście do odbioru złączy spawanych już od lat siedemdziesiątych XX wieku jest stosowane w rurociągach gazowniczych oraz zbiornikach ciśnieniowych i zostało wprowadzone w kilku normach światowych np.: API 1104/1983, PD 6493/1980, CAN/CSA-Z 184-M86.

Prekursorem idei przydatności użytkowej konstrukcji (PUK) w Polsce był prof. Andrzej Fabiszewski 1924-1978. To dzięki profesorowi w ramach tematu Ministerstwa Komunikacji MK 133-06-02-04 w latach 1956-1990 przeprowadzono badania rentgenograficzne spoin czołowych

dźwigarów około 200 eksploatowanych mostów kolejowych na terenie całego kraju.

W roku 2018 mija 40 rocznica śmierci Profesora. Z tej okazji autorzy pracownicy Zakładu Konstrukcji Metalowych ZUT w Szczecinie napisali niniejszy artykuł chcąc przybliżyć działalność naukową profesora Fabiszewskiego, który przez wiele lat kierował Katedrą Budownictwa Stalowego Politechniki Szczecińskiej i badaniami in-situ mostów stalowych. W artykule przedstawiono wyniki badań złączy spawanych 11 mostów kolejowych usytuowanych na terenie miasta Szczecina. W tym mieście profesor spędził większą część okresu swojej działalności zawodowej.

Artykuł napisano na 47 Krajową Konferencję Badań Nieniszczących, na której będzie on wygłoszony. Z uwagi na termin konferencji, 16-18 październik 2018 r. i chęć zapoznania szerszej grupy spawalników z tymi badaniami oraz zachowując chronologię zdarzeń, artykuł opublikowaliśmy w Biuletynie Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach, nr 4/2018 w terminie przedkonferencyjnym. W niniejszym streszczeniu jedynie skrótowo przedstawiono badane obiekty mostowe i wyniki ich badań oraz określono stan naprężeniowy spoin z pęknięciami w dwóch wiaduktach eksploatowanych przez ponad 80 lat.

*Autor korespondencyjny. E-mail: marekw@zut.edu.pl

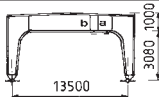
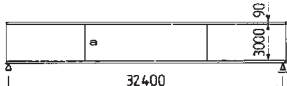
Tab. 1. Dane techniczne mostów i badań rentgenograficznych.

Tab. 1. Technical data of bridges and of X-ray research.

Linia kolejowa	Nr mostu	Rok budowy	Liczba		Liczba rtg. zależna od poziomu jakości (z pęknięciami)						
			dźwigarów	badań	Strefa ściskana		Strefa rozciągana		Łącznie		Σ rtg.
					B+, B, C	D, >D	B+, B, C	D, >D	B+, B, C	D, >D	
Poznań-Szczecin	I	1935	7	54	11	20 (4)	4	19 (7)	15	39 (11)	54
	II	1936	4	100	2	38 (24)	11	49 (12)	13	87 (36)	100
	III	1948	6	132	11	63 (44)	7	51 (31)	18	114 (75)	132
Szczecin-Trzebież	IV	1948	2	36	-	20	-	161	-	36	36
	V	1958	2	45	23	-	21	-	44	1	45
Wrocław-Szczecin	VI	1964	4	14	-	-	14	-	14	-	14
	VII	1964	4	42	6	-	36	-	42	-	42
	VIII	1964	4	88	4	-	84	-	88	-	88
SPa- Nab. Czeskie	IX	1964	6	78	-	-	78	-	78	-	78
Zdroje-Podjuchy	X	1972	2	16	8	-	8	-	16	-	16
Poznań-Szczecin	XI	1977	6	216	138	-	78	-	216	-	216
RAZEM	-	-	47	18	203	141 (72)	341	136 (50)	544	277 (122)	821
% w Σ rtg.	-	-	-	-	24,7	17,2	41,5	16,6	66,3	33,7	100

Tab. 2. Schematy dźwigarów nośnych i naprężenia normalne w spoinach oraz λ i Z_{rtg}.

Tab. 2. Schemes of carrying girders and normal stresses in the butt welds as well as λ and Z_{rtg}.

Nr mostu	Schemat dźwigara i usytuowanie złącza z pęknięciami	Naprężenia w MPa				$\lambda = P_{\text{eksp}}/P_{\text{norm}}$	$Z_{\text{rtg}}^{(6)}$ MPa
		obciążenia stałe	układ obciążeń		pomierzone		
			P_{norm}	$P_{\text{eksp}}^{(1)}$			
I		$\sigma_a = 6,8$	44,2	27,3	-	0,618	90,0
		$\sigma_b = 11,6$	67,2	42,3	-	0,629	90,0
II		$\sigma_a = 24,0$	89,8	$62,3^{(2)}$	$22,3^{(3)}$ $28,4^{(4)}$ $29,6^{(5)}$	0,694	90,0

¹⁾lokomotywa ET21+obciążenie stałe; ²⁾2 parowozy Pt31 z tendrami 32D29 + obc. stałe; ³⁾obciążenie statyczne 2xPt31 z tendrami; ⁴⁾obciążenie dynamiczne v=20 km/h; ⁵⁾obciążenie dynamiczne v=80 km/h; ⁶⁾ Z_{rtg} wg badań własnych.



Rys. 1. Widok ogólny badanych mostów kolejowych.
Fig. 1. General view of tested railway bridges.

1. Badane mosty kolejowe i ich wyniki

W latach 1957-1984 Zakład Konstrukcji Metalowych Politechniki Szczecińskiej przeprowadził badania rentgenograficzne złączy doczołowych 11 obiektów mostowych usytuowanych na terenie miasta Szczecina (rys. 1). Poddano je badaniom z różną częstotliwością od 1 do 4 badań. Wykonano 821 zdjęć złączy doczołowych, w tym 344 w strefie ściskanej i 477 w strefie rozciąganej.

Wykonane rentgenogramy spoin zgodnie z postanowieniami

normy PN-64/M-69772 zakwalifikowano do odpowiedniej klasy wadliwości R1-R5. Obecnie klasy te są porównywalne z poziomami jakości spoin B+, B, C, D i >D określonymi według PN-EN ISO 5917:2014 (tab. 1). W mostach nr I, II i III wybudowanych w latach 1935-1948 na 122 radiogramach stwierdzono pęknięcia spoin o zróżnicowanej długości. Oprócz pęknięć zasadniczą NS dyskwalifikującą badane spoiny był brak przetopu i żuźle pasmowe.

2. Naprężenia w spoinach mostów z lat 1935 i 1936

W celu poznania rzeczywistych wartości naprężeń w spoinach z pęknięciami, w mostach użytkowanych przez 83 i 82 lata (most nr I i II), w tablicy 2 zestawiono ich wartości od obciążeń normowych i eksploatacyjnych. W kolumnie 3 podano wartości naprężeń od obciążenia stałego, a w kolumnie 4 od obciążenia stałego i ruchomego normowego z uwzględnieniem wpływów dynamicznych. Naprężenia normowe wyznaczono dla podstawowego układu obciążeń, przyjmując klasę obciążenia k = +2. W kolumnie 5 zestawiono wartości obliczonych naprężeń od obciążenia stałego i ruchomego lokomotywą ET21 dla mostu nr I oraz dwoma parowozami PT31 z napelnionymi całkowicie tendrami (170 kN) dla mostu nr II.

W kolumnie 6 określono pomierzone wartości naprężeń przy obciążeniu statycznym i dynamicznym, podczas badań tensometrycznych w 1962 r. Obciążeniem były dwa parowozy PT31 z tendrami 32D29. Łatwo zauważyć że każdorazowo wartości naprężeń eksploatacyjnych są około 30-35% mniejsze od wartości naprężeń według układu obciążeń P_{norm} (kol. 7) oraz od wytrzymałości zmęczeniowej spoin z pęknięciami Z_{rtg} = 90 MPa (kol. 8).

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 zarówno w wersji drukowanej jak i w elektronicznej w internecie. 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 8,0 cm, natomiast dwuszpaltowego 17,0 cm.

Rysunki wykonane komputerowo winny być w oddzielnych plikach w formacie TIFF lub 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@ptbnid.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 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

Aktualne wydania dostępne w prenumeracie: 1–4/2018 oraz archiwalne: 1–2/2016; 1–2/2017; 3/2017; 4/2017.

Prenumerata realizowana jest przez Redakcję. Kontakt i zamówienia pod adresem mailowym: prenumerata@bnid.pl.



telemond-holding.com



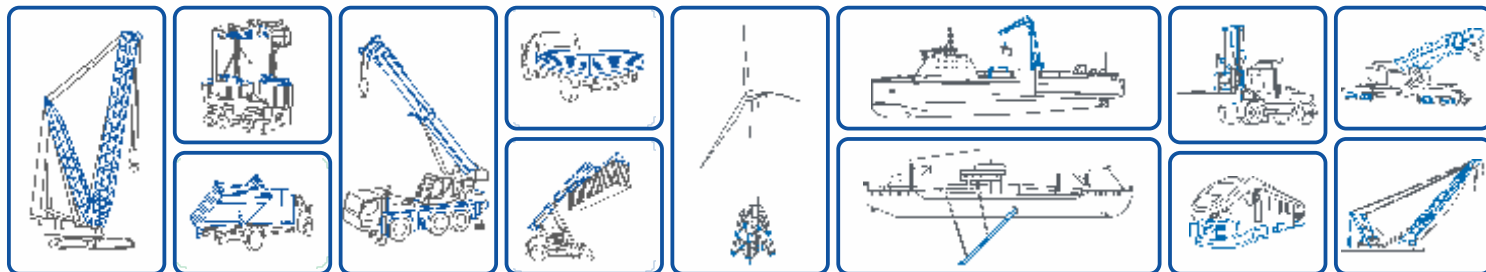
facebook.com/telemond

W skład Holdingu Telemond wchodzi cztery Spółki: Teleskop, Montel, Teleyard i Henschel Engineering Automotive. Jesteśmy specjalistami w zakresie przetwarzania wysokowytrzymałych drobnosiarnistych stali konstrukcyjnych. W naszych zakładach realizujemy usługi między innymi w zakresie realizacji wszystkich powszechnie stosowanych procedur spawalniczych, cięcia blach i rur, obróbki mechanicznej, lakierowania i montażu. Wykonujemy konstrukcje stalowe, zarówno jako pojedyncze elementy jak i złożone moduły dla najważniejszych producentów z branży motoryzacyjnej i maszyn budowlanych. Od wielu lat darzą nas zaufaniem tacy klienci jak np. Liebherr oraz Volkswagen. W zakresie realizacji projektów oferujemy pełen zakres usług. Zajmujemy się zakupem, wykonaniem, a także logistyką, montażem i zapewnieniem jakości.



Spółka Holdingu Firma Teleskop jest największym pracodawcą w Kostrzynie nad Odrą zatrudniając ponad 600 pracowników. W naszych osiemnastu halach produkcyjno-montażowych wytwarzamy od podstaw sprzęt transportowy, konstrukcje spawane ze stali o wysokiej wytrzymałości dla czołowych producentów dźwigów oraz podzespoły dla producentów z sektora kolejowego. Specjalizujemy się również w produkcji wysięgników teleskopowych, chwytaków kontenerowych i podzespołów urządzeń dźwigowych.

Najmłodszą ze spółek córek Holdingu jest Firma Teleyard, która produkuje konstrukcje spawane wykonane ze stali o wysokiej wytrzymałości i odporności na ścieranie, kierując swoją ofertą przede wszystkim w stronę sektora offshore systemów kontenerowych. Teleyard wykonuje także specjalne projekty w zakresie produkcji o dużych wymiarach i ciężarze. Spółka wybudowała w 2015 roku fabrykę w Szczecinie, która specjalizuje się w wielkogabarytowych konstrukcjach stalowych. Powstają w niej między innymi części dźwigów, chwytaków, specjalistyczne wyposażenie pogłębiarek.





Mentor Visual iQ teraz w wersji HD

Najlepszy VideoBoroskop na rynku
teraz z sondą High Definition

Nowy Mentor Visual iQ, teraz z **TrueSight Imaging** w wersji HD to jeszcze szybsze i dokładniejsze badania. Nowy intuicyjny ekran dotykowy, indywidualne profile użytkownika oraz trójwymiarowe obrazowanie w Pomiarze Fazowym **Real3D Measurement**, to tylko niektóre możliwości, znacznie podnoszące efektywność badań wizualnych. Inteligentne rozwiązania wbudowane w platformę Mentor Visual iQ, to większa efektywność badań oraz trafniejsze decyzje.

Więcej na temat nowego podejścia
GE do badań nieniszczących na:

everestvit.pl lub endoskopy.pl