

Badania Nieniszczące i Diagnostyka

4/2019

Kwartalnik Naukowo-Techniczny

Nondestructive Testing and Diagnostics



Szkolenia, egzaminy
i certyfikacja personelu NDT



NOWOŚĆ – SZKOLENIA DOFINANSOWANE!

www.tuv.pl

 **TÜVRheinland®**
Precisely Right.

Defektoskop OmniScan® X3



Pewność Którą Widać

Oszałamiające obrazy i przemysłane oprogramowanie - standard w phased array jest teraz jeszcze lepszy. Wiarygodność i łatwość obsługi - defektoskopy OmniScan są z tego znane. Teraz dodaliśmy nowe, zaawansowane narzędzia, dzięki którym Twoje doświadczenie z OmniScan będzie jeszcze lepsze.

Zobrazowania TFM (total focusing method) pozyskane metodą FMC (full matrix capture), zawierają wsparcie 64-elementowej apertury.

Poprawione zobrazowania phased array, zawierają innowacyjny tryb obwiedni TFM (live TFM envelope) oraz symulator akustycznej mapy wpływu (AIM) dla trybu TFM.

Stwórz swój kompletny plan badania w jednym procesie i sprawdź czy niczego nie pominąłeś z pomocą narzędzi do wizualizacji.

Olympus i OmniScan są zarejestrowanymi znakami towarowymi Olympus Corporation.



Olympus Polska sp. z o. o.

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

Tomasz Chady

Z-CA REDAKTORA NACZELNEGO DS. NAUKOWYCH /

DEPUTE EDITOR-IN-CHIEF OF SCIENTIFIC AFFAIRS

Jerzy Nowacki

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

Grzegorz Psuj - Sekretarz Naukowy / Scientific Secretary

Adam Sajek

Ryszard Pakos

REDAKTOR JĘZYKOWY / EDITOR OF LANGUAGE AFFAIRS

Marcin Żytowski

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 Darek Wojaś

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, Grece

Mgr Paweł Grześkowiak, UDT, Polska

Prof. Jerzy Hoła, Politechnika Wrocławska, Polska

Prof. Jolanta Janczak-Rusch, Empa, Switzerland

Mgr Ryszard Jawor, Ryszard Jawor Usługi NDT, Polska

Dr Grzegorz Jezierski, Politechnika Opolska, Polska

Inż. Sławomir Józwiak, NDT Systems, Polska

Mgr Pablo Katchadjian, National Atomic Energy Commission of Argentina, Argentina

Mgr Jan Kielczyk, Energomontaż-Północ, Polska

Mgr Jacek Kozłowski, TEST PLB, Polska

Prof. Marc Kreutzbruck, University of Stuttgart, Germany

Dr. Jochen Kurz, DB Systemtechnik GmbH, Germany

Mgr Marek Lipnicki, KOLI, Polska

Prof. Leonid M. Lobanow, Paton Welding Institute, Ukraine

Dr Sławomir Mackiewicz, NDT SOFT, Polska

Dr Wojciech Manaj, Instytut Lotnictwa, Polska

Dr Tadeusz Morawski, Usługi Techniczne i Ekonomiczne "Level", Polska

Prof. Zinovy T. Nazarchuk, National Academy of Science of Ukraine, Ukraine

Dr Ryszard Nowicki, GE Energy, Polska

Prof. Mohachiro Oka, Oita National College of Technology, Japan

Dr Jolanta Radziszewska-Wolińska, Instytut Kolejnictwa, Polska

Prof. Helena Maria Geirinhas Ramos, Instituto Superior Técnico, Portugal

Prof. Joao M A Rebello, Federal University of Rio de Janeiro, Brasil

Prof. Artur Lopes Ribeiro, Instituto Superior Técnico, Portugal

Prof. Maria Helena Robert, University of Campinas, Brasil

Dr hab. Maciej Roskosz, Politechnika Śląska, Polska

Prof. 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 Tamburrino, 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 4/2019

ISSN 2451-4462

VOLUMEN 4

SPIS TREŚCI

Frédéric Reverdy, Gregoire Benoist

Advantages of the Total Focusing Method* 4

Lista recenzentów w roku 2018 7

Dariusz Kowalczyk, Łukasz Antolik, Ireneusz Mikłaszewicz

Wady szyn kolejowych, a badania ultradźwiękowe* 9

Ireneusz Baran

Badania nieniszczące urządzeń technicznych metodą emisji akustycznej* 15

Patrycja Pyzik, Aleksandra Ziaja-Sujdak, Krzysztof Grabowski,

Grzegorz Góra, Łukasz Ambroziński

Detekcja wad w połączeniach klejonych płyt aluminiowych

z wykorzystaniem laserowo generowanych ultradźwięków* 21

Ryszard Krawczyk, Piotr Wojtas

Dokładność oceny w badaniach ultradźwiękowych

złączy spawanych techniką DGS* 23

Pavel Mazal, Houssam Mahmoud, František Vlačić

Diagnostyka działania silników pneumatycznych

z wykorzystaniem Emisji Akustycznej* 26

Adam Wociał

Badania prądami wirowymi połączeń spawanych – wpływ doboru

warunków i parametrów badania na czułość

i wiarygodność metody – przykłady zastosowań* 29

Jakub Roemer, Paulina Zbyrad, Paweł Paćko, Tadeusz Uhl

Obrazowanie hiperspektralne w wykrywaniu defektów powłoki cynkowej

na powierzchniach wytłoczek elementów karoserii samochodowej* 35

Grzegorz Grzywnowicz, Maciej Roskosz, Krzysztof Porębski,

Franciszek Kurdziel, Adam Kalwar

Wybrane aspekty diagnostyki elementów silników spalinowych

zasilanych metanem* 39

Dariusz Kowalczyk, Łukasz Antolik, Ireneusz Mikłaszewicz

Badania wad typu head check w szynach kolejowych

metodą tomografii komputerowej jako element procesu

optymalizacji układu przetworników ultradźwiękowych* 45

Departament Komunikacji PGE GiEK

Laboratorium Badań Materiałowych Elektrowni Bełchatów z tytułem

Lidera Bezpieczeństwa Technicznego w rankingu organizowanym

przez Urząd Dozoru Technicznego (UDT) w kategorii: Laboratoria 50

Bogusław Olech, Tadeusz Morawski

Aleksandra Sytlak 51

Informacje dla Autorów i Czytelników 54

REKLAMY NA OKŁADCE

TÜV Rheinland 1

OLYMPUS 2

Instytut Spawalnictwa 3

MR Chemie GmbH 4

REKLAMY W NUMERZE

TESTING Sp. z o.o. 2

48. KKBN 3

TENSLAB Sp. z o.o. 8

Casp System Sp. z o.o. 14

TÜV SÜD Polska Sp. z o.o. 20

NDT System 44

DPIdea S.C. 49

* - artykuł recenzowany

PATRONAT I STAŁA WSPÓŁPRACA
/PATRONAGE AND PERMANENT COOPERATION



TÜVRheinland®

Precisely Right.



PTBNiDT

OLYMPUS

TELEMOND
HOLDING

BIURO TECHNICZNO - HANDLOWE

TESTING

Spółka z o.o.

PRZEDSTAWICIELSTWO FIRM:

Krautkramer



SEIFERT

**K+D
Flux-Technic**

DIETU-THERM

ElektroPhysik

NewSonic

JW FROELICH

wilnes
Zubehör für die Profitechnik

AMPLECTOR
Innovative Lösungen für Portale, Schweiß-, Test- und Montage



SERVO-ROBOT
SMART LASER VISION SYSTEMS FOR SMART ROBOTS



winter

Oferujemy:
urządzenia i środki do badań nieniszczących metodami:

ultradźwiękową	
radiograficzną	
magnetyczno-proszkową	
prądów wirowych	
penetracyjną	

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

W kompleksowy sposób wyposażamy laboratoria w sprzęt i materiały eksploatacyjne do **badań metalograficznych**.
Biuro nasze prowadzi poradnictwo, sprzedaż oraz autoryzowany serwis w zakresie produktów w/w firm.

Firma nagrodzona za działalność w dziedzinie badań nieniszczących



TÜVRheinland®
CERT
ISO 9001

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





PTBNiDT

48. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących

Wista, 22 – 24 października 2019 r.

Organizatorzy Konferencji bardzo gorąco dziękują wszystkim podmiotom,
które podjęły się sponsorowania 48. Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących.

Pragniemy przekazać najwyższe wyrazy wdzięczności następującym firmom:

GŁÓWNY SPONSOR KONFERENCJI

casp system
ADVANCED TECHNOLOGIES



ZŁOTY SPONSOR

NDT*System*
www.ndt-system.pl



Polska

SPONSORZY



DPI*idea*



PARTNERZY



IURO TECHNICZNO - HANDLOWE
TESTING
Spółka z o.o.

Jeszcze raz Serdecznie Dziękujemy.

Frédéric Reverdy*, Gregoire Benoist

Eddyfi, Miniparc du Verger, France

Advantages of the Total Focusing Method

Zalety metody pełnego ogniskowania TFM

ABSTRACT

Total Focusing Method has been recently made available in portable Phased-Array Ultrasonic Instrument. Portable industrial equipment with full-parallel capabilities allows handling of matrix-array probes, 3D imaging and advanced techniques for optimal focusing. Total Focusing Method, a reconstruction based technique, is discussed: it allows better sizing of the defects during inspections, a clear detection of small defects and defect characterization. Moreover, real-time adaptive inspection associated to Total Focusing Method has been implemented to take into account the variability of the examination surface.

Keywords: Total Focusing Method, ultrasound testing, nondestructive testing

STRESZCZENIE

Metoda pełnego ogniskowania TFM (ang. Total Focusing Method) została niedawno udostępniona w przenośnym urządzeniu ultradźwiękowym z technologią phased-array. Przenośne urządzenia przemysłowe stwarzają możliwość nadzorowania równoległego pracy przetworników macierzowych, obrazowania 3D i zaawansowanych technik optymalnego ogniskowania. W pracy omówiono metodę TFM bazującą na technice rekonstrukcji. Pozwala ona na lepsze określenie rozmiarów wad podczas inspekcji, wyraźne wykrycie drobnych wad i ich charakterystykę. Ponadto przedstawiono wdrożenie kontroli adaptacyjnej w czasie rzeczywistym związanej z metodą TFM, uwzględniającej zmienność badanej powierzchni.

Słowa kluczowe: metoda pełnego ogniskowania TFM, badania ultradźwiękowe, badania nieniszczące

1. Introduction

Phased-array technology has been accepted for many years and used in many NDE applications thanks to its flexibility and the major improvement in productivity. Instead of the typical amplitude vs time signal, phased-array systems can display ultrasonic data as sectorial or linear images (Sscan or Escan) allowing an inspector to see instantly a complete zone of the component and thus interpret data more easily. These images are obtained by applying time delays to each element of an array probe. Increasingly, more advanced operating modes involving the post-processing of elementary signals are exploited in NDT. A posteriori synthetic focusing of signals, called TFM (Total Focusing Method) is one of the most natural ways of such processing and has been proven to be an efficient way of imaging inspected parts [1]. This method might be applied, at least in theory, to any set of signals, its performances depending obviously of the acquired data. The algorithm has been implemented and extended in the CIVA software to complex geometries and various modes of reconstruction [2]. While this technique presents great benefits, one of the main disadvantages is that, up to now, it has been mainly used as a post-processing method making it difficult to apply on the field. M2M, now Eddyfi, was the first to propose a portable phased-array system, the Gekko, with full-parallel phased-array capabilities that allows real-time TFM reconstruction. The system has been accepted by the industry and is used for many applications. Since, Eddyfi has extended its range of system with TFM to its tabletop system, Panther, and to the smaller portable unit, Mantis.

Since July 2019, ASME section V has added various sections that describes TFM making the technique code compliant.

2. The Total Focusing Method

2.1 Principle of TFM

The TFM imaging technique can be applied to any acquired data as long as elementary ascans are recorded for each channel. At the time of publication, the TFM in the Gekko is applied to a dataset recorded from a FMC (Full Matric Capture) acquisition to produce an image in a region of the component. Later this year, the Gekko will be upgraded to incorporate other modes of TFM reconstruction. The FMC presents the advantage of maximizing the information available from a given array composed of N elements by sending ultrasonic energy everywhere in the component; this way potential defects can be seen from multiple directions. The FMC acquisition consists in firing each element of the array in turn and recording the information reflected/diffracted in the component on all the elements. The result of the FMC is a $N \times N$ dataset composed of every emitter-receiver pair combination of elements in the array. The TFM algorithm consists in coherently summing all the signals $s_{ij}(t)$ from the dataset to focus at every points of a Region Of Interest (ROI) in a specimen. Mathematically this can be expressed as:

$$I(P) = \sum_{i,j=1}^N s_{ij}[t_{ij}(P)]$$

where $t_{ij}(P)$ denotes the theoretical time-of-flight corresponding to the propagation time between the i -th transmitter and the j -th receiver, through point P .

2.2 Comparison of sectorial scanning and TFM

Figure 1 shows a comparison between sectorial scanning and TFM for an ASTM E2491 standard mockup. We use a 64-element 5-MHz linear array probe. This calibration mockup has an array of side-drilled holes (SDH) along a 1" radius and another along a 2" radius. For the sectorial scanning we perform a -50° to $+50^{\circ}$ scan with a 0.5° step focusing

*Autor korespondencyjny. E-mail: freverdy@eddyfi.com

the energy at 25 mm (1"). For TFM we define a 70 x 50-mm ROI underneath the surface.

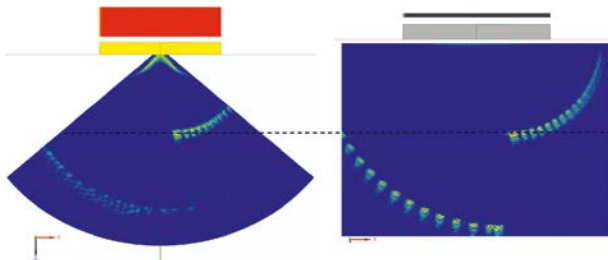


Fig. 1. S-scan (left) and TFM (right).
Rys. 1. S-scan (po lewej) i TFM (po prawej).

The SDH located around 25 mm (horizontal dotted line) are clearly detected for both the Sscan and TFM. However, for the Sscan we can see that the echoes clearly show an out-of-focus effect for the SDH located along the 2" radius. The echoes are elongated and weaker (-17 dB compared to the maximum). For TFM all the SDH are detected at all depths with similar energy (6 dB variation). The advantage is that the operator doesn't need to specify a depth of focalisation; the TFM offers optimum focusing at every point in the ROI.

2.3 TFM for manual inspection

This ability to focus everywhere is demonstrated on a manual inspection of an electron beam welded component made of a titanium alloy. The material is composed of large grains ~0.5-1.5 mm and porosities can occur during the welding process. The weld is inspected manually which can be an issue and can lead to variations in sensitivity. To evaluate the sensitivity of the NDT technique several hemispherical bottomed holes (HBH) were machined from the side of the sample to finish in the middle of the weld at several depths.

We inspected the component with a 64-element 7.5-MHz linear array with a 75-mm focusing in the passive plane. We compare sectorial scanning using longitudinal waves focused along the weld (top row) with TFM (bottom row) in Figure 2. For both the Sscan and TFM images we see the echoes obtained at the root of the weld.

In the top left image, we can see the echo obtained at the tip of the HBH; it is detected with a 20 dB Signal-To-Noise (SNR) ratio. To represent an error of positioning during the inspection we moved the probe away from the weld by 4mm. On the right Sscan, we can see that the echo from the HBH becomes much weaker (5 dB SNR). Because of the structure of the titanium alloy and the size of the HBH ($\phi = 0.8\text{mm}$) the ultrasonic beam needs to be focused on the defect otherwise the SNR is too small. We see that the sensitivity decreases dramatically when the defect is not in depth-of-field of the probe.

For TFM, we see that the HBH is detected with a 17 dB SNR for both positions. Because it focuses everywhere in the ROI, TFM is not as sensitive to positioning as sectorial scanning. This can be very important when looking for low-amplitude signal such as porosities or tip diffraction. We see however that the SNR is a little bit smaller compared to the sectorial scan properly focused at the defect. This is

due to the fact that data acquired to perform the TFM were obtained using a FMC meaning that elements were fired one by one. This could lead for some cases to lower amplitude signals, particularly when the elements are small.

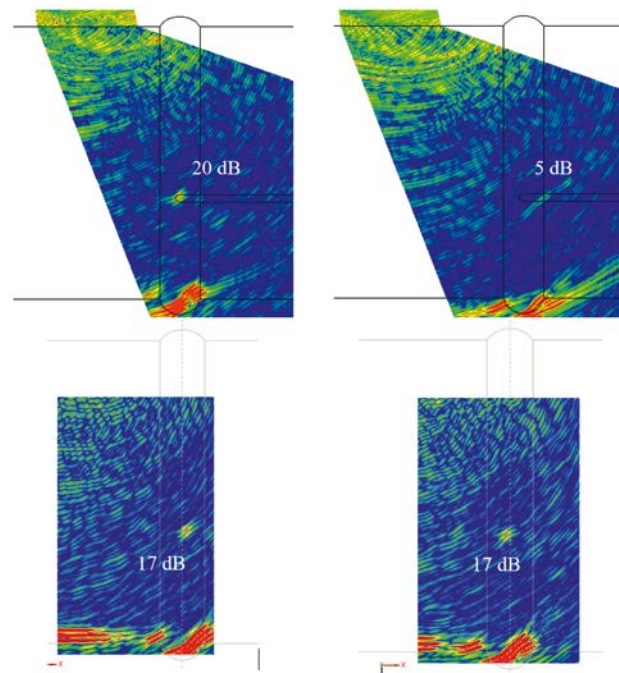


Fig. 2. Sscans (top) and TFM (bottom) obtained for a HBH in the middle of a laser weld. The right column was obtained after moving the probe 4 mm away from the weld.

Rys. 2. S-scan (u góry) i TFM (u dołu) uzyskane dla HBH w środku spoiny laserowej. Prawa kolumna została uzyskana po odsunięciu sondy na odległość 4 mm od spoiny.

By focusing everywhere within the ROI the TFM offers an ease of use for operators/experts; they don't have to worry about the depth of focalization.

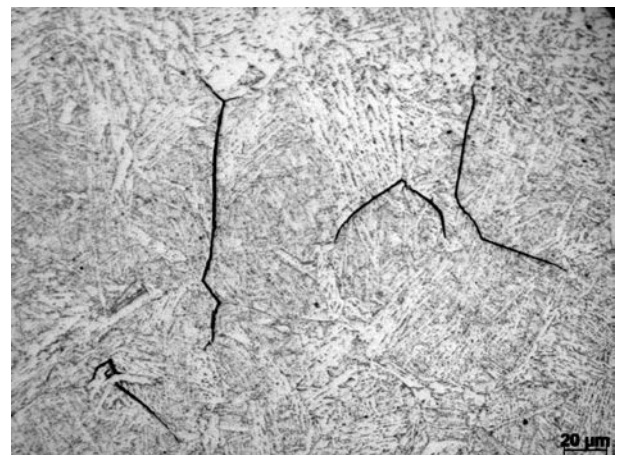


Fig. 3. Macrography of a sample containing HTHA damage.
Rys. 3. Makrografia próbki zawierającej uszkodzenie HTHA.

2.4 TFM for High Temperature Hydrogen Attacks

High temperature hydrogen attack is a form of damage commonly observed in steels exposed to high pressure hydrogen at elevated temperatures. The damage occurs as hydrogen atoms diffuse into steels, react with carbon,

form methane gas internally in the material, which results in decarburization and fissuring (micro-cracking). As the defects are quite small (micro) it is quite difficult to detect them with conventional UT method; an analysis of the backscattered energy is usually performed. HTHA starts by methane bubbles being formed in solid state steel along the grain boundaries.

Micro fissures can grow and coalesce into large macro fissures. Macro fissures ultimately grow connecting to form larger more serious cracks. Precise NDE essential to calculating Fitness For Service (FFS). TFM has been recently introduced by Oil & Gas companies and training centers as a mean to detect HTHA damage.

Fig. 4 show different TFM images obtained for two samples (45 and 100 mm thick) at different stages of the HTHA process.

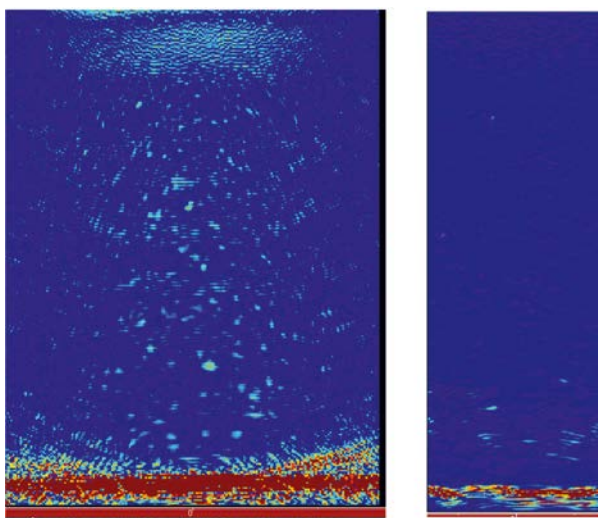


Fig. 4. TFM images of samples (45 mm and 100 mm thick) containing HTHA damage.

Rys. 4. Obrazy TFM próbek (o grubości 45 mm i 100 mm) zawierających uszkodzenie HTHA.

TFM is not being taught by some training schools as one of the methods to be used in the detection and characterization of HTHA damage.

3. Adaptive TFM

The reconstructions presented above were performed for components with flat surfaces. For complex geometries with an irregular entry surface, such as a corroded surface, the ultrasonic field can be distorted making the detection of potential defects impossible. Phased-array technology offers the ability to perform inspection under complex surfaces by adjusting delay laws to take into account the variations of the entry surface. However, the geometry of the surface needs to be perfectly known, which is not always the case.

M2M/Eddyfi has developed and implemented in the Gekko a real-time adaptive process, called ATFM (Adaptive TFM), that measures first the entry surface then performs a TFM reconstruction underneath the complex surface [4].

We describe here the various steps of the ATFM process.

- 1) A ROI is defined at an approximate distance equivalent to the water path

- 2) A TFM reconstruction is performed in a semi-infinite medium using the velocity of water
- 3) The profile of the entry surface is extracted by detecting the maximum of the envelop in each column of the TFM image
- 4) A TFM inside the component can be calculated taking into account the measured profile to adjust the delays and focus at each point of a ROI inside the component.
- 5) The profile of the front surface and the TFM reconstruction are displayed by the Gekko in real time.

We used this technique with a local immersion probe composed of a standard linear phased-array probe attached to a flexible wedge filled with water. The mockup is a 30-mm thick aluminium block containing two pairs of 10-mm wide notches and one 2-mm SDH; an irregular surface was machined above one set of defects. Figure 5 shows a side view of the mockup and TFM reconstructions with the adaptive process disabled and enabled.

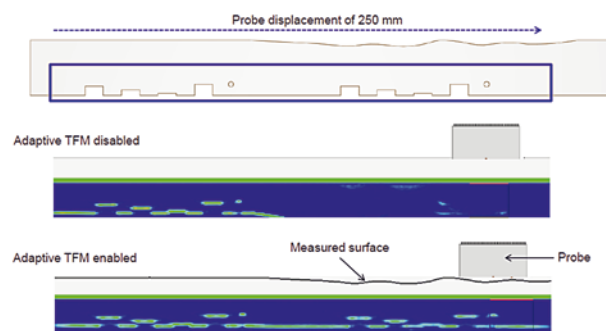


Fig. 5. Adaptive TFM on an aluminium mockup with irregular surface.

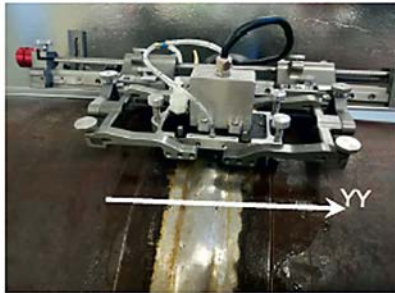
Rys. 5. Adaptacyjny TFM na aluminiowej makiecie o nieregularnej powierzchni.

One can see that when the adaptive process is disabled only the defects located underneath the flat surface can be detected. Even the backwall is not detected when located underneath the wavy surface. This is due to the fact that the times-of-flight are not properly calculated to take into account the variation of the front surface. When the process is enabled, the profile of the front surface is reconstructed correctly; one can compare the “measured surface” in the third image to the front surface of the mockup in the first image. Using the information from this “measured surface” the TFM algorithm is able to detect all the defects even those located underneath the irregular part of the entry surface in real time.

The adaptive process was then applied to the thickness measurement of a welded pipe. A 64-element, 5-MHz probe was used over a 21-mm thick pipe. The weld cap was slightly smoothed to remove the weld passes but the weld cap was still there. An image of the setup is displayed in figure 6. The probe uses the same conformable wedge and it is connected to a scanner to perform a scan across the weld with a 1-mm step.

The image shows a screen capture of the adaptive reconstruction using the Gekko. One can see the reconstructed profile of the weld cap and the TFM image of the backwall surface taking into account the front surface profile. The

zoom shows the detection of a notch at the root of the weld. Without reconstruction of the front surface it would have been impossible to detect the notch.



Transducer:
5 MHz linear array of 64 elements

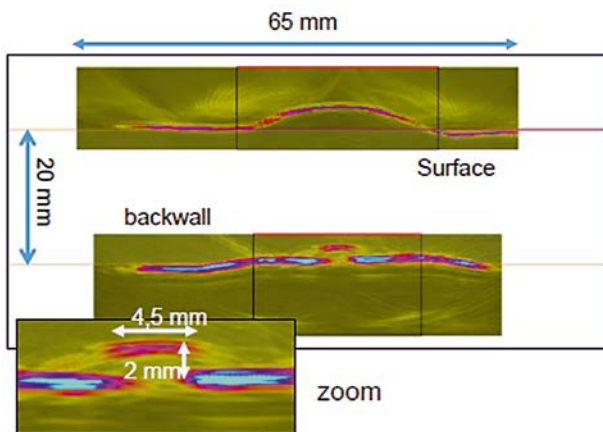


Fig. 6. ATFM on a weld cap
Rys. 6. Adaptacyjny TFM w spoinie

ATFM offers huge potential for the inspection of components that requires polishing the entry surface to remove a weld cap for example. This could lead to big time and cost savings.

4. Conclusions

Total Focusing Method is a technique that has been used for quite some time. However, it was limited to post-processing making it difficult to apply it in the field. Recently, portable phased-array systems, among which the Gekko, have been made available with TFM capabilities. In this paper, we showed some TFM results showed some of the advantages of TFM over sectorial scanning. Because of its ability to focus everywhere, TFM is less sensitive to positioning and easier to use. TFM allows characterization of small defects and complex defects where standard phased-array could not. Finally, we showed the potential of TFM to perform reconstruction below complex surfaces such as a weld. This opens the way for inspections for which the surface is not known (after hand machining for example) and inspection of welds from the weld crown.

5. References/Literatura

- [1] C. Holmes, B. W. Drinkwater, Paul D. Wilcox, 'Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation', NDT&E International, Vol 38, pp 701-711, 2005
- [2] A. Fidahoussen, P. Calmon, M. Lambert, S. Paillard, S. Chatillon, "Imaging of defects in several complex configurations by simulation-helped processing of ultrasonic array data", Review of progress in QNDE, Vol. 29, pp. 847-854, 2009
- [3] MD Gilchrist, MI Chipalo, RA Smith, "Shape development of surface defects in tension fatigued finite thickness plates", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 49 Issue 1, pp. 121-137, 1991
- [4] S. Robert, L. Le Jeune, C. Prada, A. Membre, P. Dumas, "Adaptive Ultrasonic Imaging with the Total Focusing Method for Inspection of Complex Components Immersed in Water", Review of progress in QNDE, Vol. 29, pp. 847-854, 2014

- | | |
|--|---|
| 1) Grzegorz Jezierski, Politechnika Opolska | 9) Jerzy Nowacki, ZUT w Szczecinie |
| 2) Jacek Słania, Instytut Spawalnictwa, Gliwice | 10) Krzysztof Stawicki, ZUT w Szczecinie |
| 3) Jakub Kowalczyk, Politechnika Poznańska | 11) Sławomir Mackiewicz, IPPT PAN, Warszawa |
| 4) Marek Lipnicki, Koli Sp. z o.o., PTBNiDT SIMP | 12) Barbara Grochowalska, ZUT w Szczecinie |
| 5) Piotr Bielawski, Akademia Morska w Szczecinie | 13) Grzegorz Świt, Politechnika Świętokrzyska |
| 6) Ryszard Pakos, ZUT w Szczecinie | 14) Maciej Roskosz, AGH w Krakowie |
| 7) Krzysztof Schabowicz, Politechnika Wrocławska | 15) Daniel Grochała, ZUT w Szczecinie |
| 8) Przemysław Łopato, ZUT w Szczecinie | 16) Adam Sajek, ZUT w Szczecinie |

Pomiary defektoskopów i grubościomierzy UT z akredytacją PCA

- **TENSLAB Sp. z o.o. Laboratorium Wzorcujące Sp. k.** jako jedyne w Polsce posiada akredytację **PCA** w zakresie pomiaru defektoskopów oraz grubościomierzy ultradźwiękowych. Pomiary realizowane są zgodnie z normą PN-EN 12668-1:2010 oraz normą PN-EN 15317:2014.
- Świadectwo akredytowane gwarantuje najwyższą jakość wykonywanej usługi oraz uznanie wyników pomiarów przez niemal wszystkie jednostki certyfikujące.

Zachęcamy do zapoznania się z ofertą naszego laboratorium na stronie www.tenslab.pl

Nasz wykwalifikowany personel odpowie na wszystkie Państwa pytania.

tel: + 48 58 380 06 44
e-mail: wzorcujaace@tenslab.pl

TENSLAB Sp. z o.o., Laboratorium Wzorcujące Sp.K
Park Konstruktorów, pom 4.13
ul. Czechosłowacka 3
81-336 Gdynia

Dariusz Kowalczyk¹, Łukasz Antolik^{2*}, Ireneusz Mikłaszewicz³

Centrum Diagnostyki PKP PLK S.A., Warszawa

Wady szyn kolejowych, a badania ultradźwiękowe

Disadvantages of railway rails and ultrasonic testing

ABSTRACT

The authors presented the most occurs defects of rails used in tracks, their unified classification based on the UIC 712R: 2003 card studies, and testing of these defects by the ultrasonic method, as well as UT testing methods used by the railway line manager, i.e. Centrum Diagnostyki PKP PLK S.A..

Keywords: rail defects; ultrasound examination

STRESZCZENIE

Autorzy przedstawili najczęściej występujące wady szyn eksploatowanych w torach, ich zuniifikowaną klasyfikację opartą na opracowaniach Karty UIC 712R:2003 oraz badania tych wad metodą ultradźwiękową, a także metody badań UT stosowane przez zarządcę linii kolejowych tj. Centrum Diagnostyki PKP PLK S.A.

Słowa kluczowe: wady szyn; badanie ultradźwiękowe

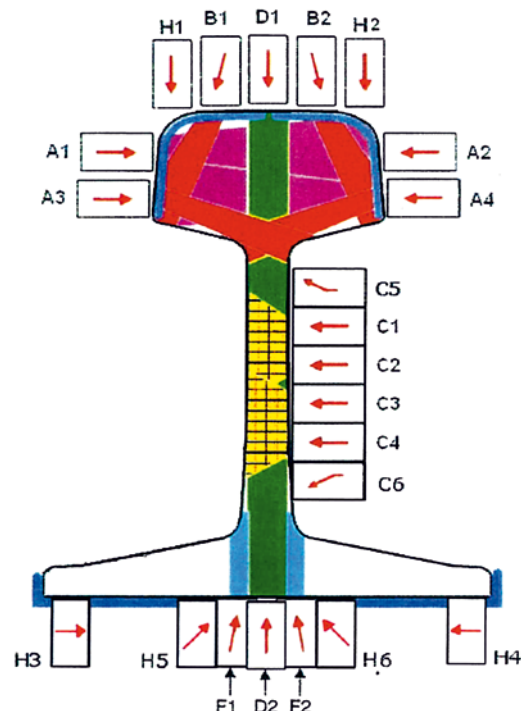
1. Wstęp

Szyna kolejowa jest zaliczana do głównego elementu toru bezpośrednio przenoszącego obciążenie pojazdów kolejowych pociągów pasażerskich i towarowych. Jednocześnie stan eksploatowanych szyn kolejowych w torach w znaczny sposób stanowi o bezpieczeństwie jazdy pociągów oraz komfortie podróży pasażerów. Utrzymanie na właściwym poziomie nawierzchni kolejowej w tym szyn, stanowi duże wyzwanie dla służb utrzymania ruchu kolei. Jedną z metod oceny i jednocześnie kontroli jakości użytkowanych szyn jest badanie ultradźwiękowe, ujawniające i eliminujące znaczne ilości wad szyn na etapie produkcji w hutach oraz podczas eksploatacji na szlakach kolejowych.

Analizując proces ostatecznej kontroli szyn w hutach po procesie prostowania w prostownicach dziewięciu-rolkowych, należy stwierdzić że badanie UT odgrywa bardzo istotną rolę, pokrywając swoim zasięgiem prawie cały przekrój szyny. Zastosowania dużej ilości głowic ultradźwiękowych, których emisja fal „przeświewa” obszar przekroju szyny z wyjątkiem części stopki, umożliwia wykrywanie pęknięć oraz wad wewnętrznych szyny. Na rysunku 1 pokazano przykładowy układ głowic stosowany do badania ultradźwiękowego wybranego profilu szyny.

Uzupełniającymi badaniami kontrolnymi szyn są badania wizualne realizowane przy pomocy kamer śledzących stan powierzchni szyny, jak również luster ustawionych pod określonymi kątami, a także badania magnetyczne wykrywające płytkie wady powierzchniowe w postaci nieciągłości powierzchni szyny. W obecnym czasie zmodyfikowane procesy technologiczne producenta oraz technologia wytwarzania szyn spowodowały znaczne ograniczenie wad wewnętrznych typu pozostałości jam usadowych lub pęknięć, jednakże w hutach na etapie kontroli ostatecznej w dalszym ciągu stosowane jest badanie ultradźwiękowe

oraz kontrola występowania wad powierzchniowych szyn typu rys mechanicznych, płytkich zawałowców lub wgniotów zgorzeliny [1].



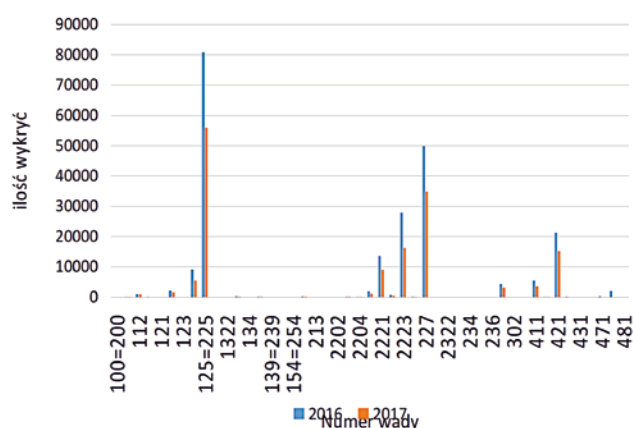
Rys. 1. Układ głowic UT badań szyn na ostatnim etapie produkcji

Fig. 1. UT heads arrangement for rail testing at the last stage of production

W miarę zwiększania się ilości przewozów i obciążenia linii kolejowych, powstaje szereg wad eksploatacyjnych szyn. Jednocześnie następuje zużycie powierzchni tocznej szyny objawiające się w większości zniekształceniem główki szyny, a także wadami typu head check, squat i shelling (łuszczenie się powierzchni tocznej szyny). Te trzy podstawowe wady

*Autor korespondencyjny. E-mail: lantolik@ikolej.pl

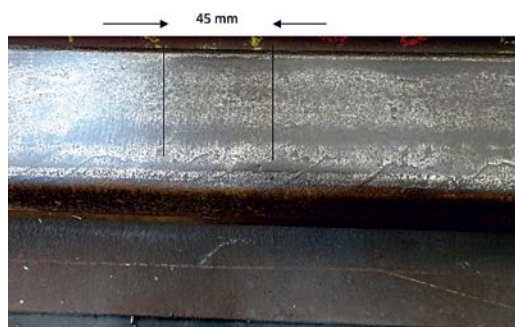
stanowią około 80% wszystkich ujawnionych wad szyn.



Rys. 2. Liczność wykryć UT poszczególnych typów wad zgodnie z Katalogiem Wad

Fig. 2. The number of UT detections of individual defect types in accordance with the Defect Catalogue

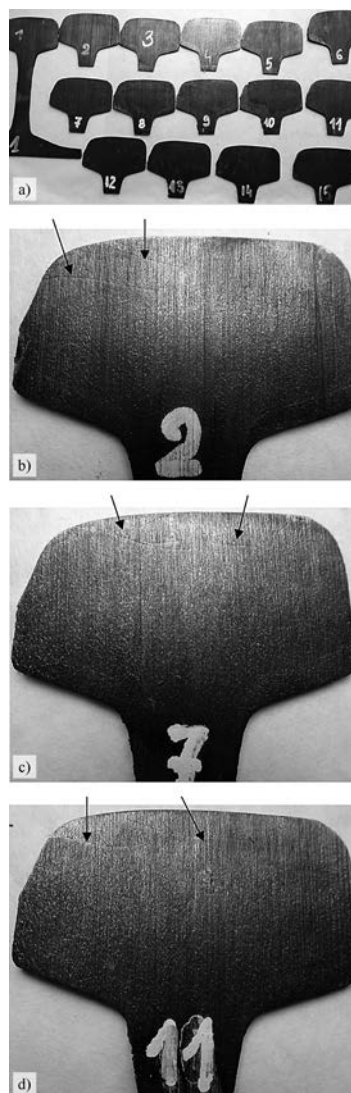
Szczególnie groźne są wady head check ponieważ pęknięcia rozwijają się pod powierzchnią szyny, natomiast wizualnie widoczne są tylko pęknięcia na krawędzi wewnętrznej szyny. Na rysunkach (Rys. 3, 4) pokazano rozwój pęknięć wewnętrznych na długości około 45 mm szyny. Odcinek ten pocięto na 15 płytek o grubości około 2,0 mm, celem określenia przebiegu i wielkości pęknięcia, stanowiące duże zagrożenia w ruchu kolejowym.



Rys. 3. Wada head check w szynie złomowanej, oznaczenie 2223
Fig. 3. Defect in head check in a scrapped rail, designation 2223

Dużym problemem utrzymania ruchu nawierzchni kolejowej są wady nieujawniane przez badanie ultradźwiękowe. Do tych wad możemy zaliczyć wady powstające pod powierzchnią i rozwijające się w postaci poziomego pęknięcia. Źródłem powstania w tym przypadku są naprężenia wewnętrzne ujawniające się pod powierzchnią głowki szyny, które na skutek kontaktu koła szyna kumulują podpowierzchniowe naprężenia, a następnie według teorii Bielajewa są one źródłem powstawania mikropęknięć. Mechanizmem tego typu powstaje i rozwija się między innymi wada sguat (Rys. 5, 6). Na rysunkach tych, na przekroju poprzecznym, pokazano główkę szyny wyciętej z toru z wadą typu sguat, z widocznym rozwojem tej wady. Z uwagi na strefę martwą głowic ultradźwiękowych, badanie UT wad typu sguat realizowane jest za pomocą głowic podwójnych lub głowic pojedynczych z pierwszego odbicia.

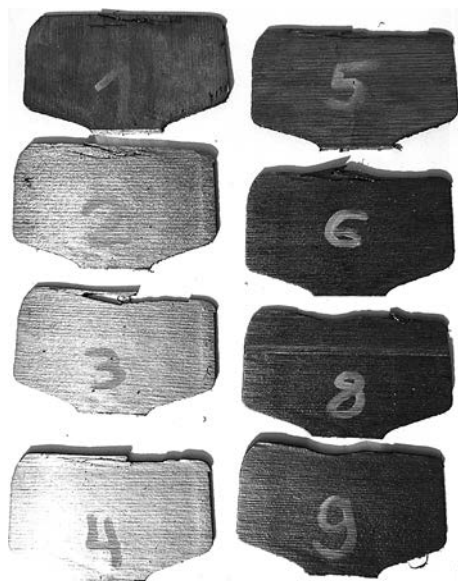
Występujące na szlakach kolejowych wady eksploatacyjne szyn ujęto w opracowanym i zmodyfikowanym Katalogu wad szyn nr UIC 712R (Rys. 7) [7]. Pierwsza i druga cyfra Katalogu oznacza miejsce występowania wady oraz metodę łączenia lub naprawy powierzchni głowki szyny, natomiast trzecia i czwarta cyfra oznacza rodzaj uszkodzenia i przyczyny powstania wady szyny, a także informacje dodatkowe.



Rys. 4. Badana próbka: a) pocięta szyna z położeniem i rozwojem pęknięć; (b), (c), (d) wady szyny head check
Fig. 4. Examined sample: (a) cut rail with location and development of cracks; (b), (c), (d) defects head check

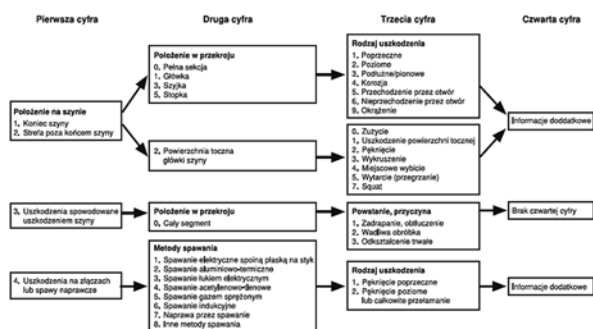


Rys. 5. Wada sguat szyny, oznaczenie 227
Fig. 5. Defect rail sguat, designation 227



Rys. 6. Przebieg wady squat 227 jw. w szynie kolejowej
Fig. 6. The course of the defect squat 227 as above, in the rail

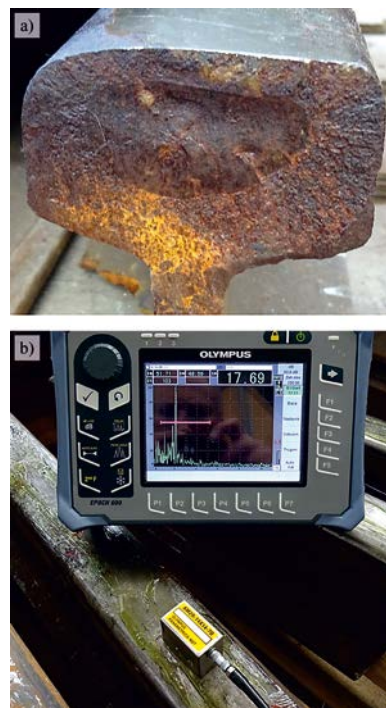
Najczęściej występujące wady eksploatacyjne głowki szyny typu head check, biorące początek na krawędzi wewnętrznej szyny, według W Katalogu wad szyn posiadają oznaczenie -2223, wadę typu squat oznaczono - 227, natomiast shelling oznaczono jako -222. Spośród pęknięć i złamań szczególną pozycję zajmuje wada typu - 211 występująca jako pęknięcie poprzeczne zmęczeniowe (Rys. 8) [2] spowodowane wewnętrznym rozrostem wady niewidocznym zewnątrz.



Rys. 7. Kwalifikacja wad szyn według Karty UIC 712R:2003
Fig. 7. Qualification of rail defects according to UIC 712R: 2003 Card

Jest to jedna z najgroźniejszych wad szyn. Następnie wszelkiego rodzaju pęknięcia jak pęknięcie poziome – 2321 występujące na przejściu głowki w stopkę szyny spowodowane wadami procesu produkcyjnego, skutkuje pęknięciem i wyłamaniem głowki szyny na określonym odcinku. Wada – 235 pęknięcie promieniowe szyny od otworów śrub łubkowych, pęknięcia ukośne poza otworami – 236, pęknięcia poprzeczne w zgrzeinach lub spoinach – 421 spowodowane wadliwie wykonanym procesem łączenia szyn, pęknięcia poprzeczne głowki szyny – 471 spowodowane napawaniem ubytku materiału szyny[5].

Wiele wad szyn wyszczególnionych w Katalogu wad szyn nie podlega badaniom ultradźwiękowym, z uwagi na



Rys. 8. Wewnętrzne pęknięcie zmęczeniowe, oznaczenie 211:
(a) widok pęknięcia, (b) badanie UT szyny, wada 211
Fig. 8. Internal fatigue crack, designation 211: (a) crack view; (b) UT test of rail, defect 211



Rys. 9. Badanie złącza szynowego zgrzanego
Fig. 9. Examination of the welded rail joint

charakter występujących wad, a jedynie kontroli diagnostycznej i wizualnej prowadzonej przez pracowników utrzymania ruchu odcinka torów. Do tego typu wad możemy zaliczyć zużycie powierzchniowe i boczne głowki szyny oznaczone - 2201-2204, miejscowe wgniecenie powierzchni tocznej - 224, występująca korozja – 234, wybuchowanie - 2252 stanowi dużą licznosc występowania na powierzchni tocznej szyny, spowodowane poślizgiem kół napędnych lokomotywy osłabiające wytrzymałość i niejednokrotnie prowadzące do złamania szyny, zgniecenia – 223 skutkujące powstawaniem spływów widoczne w postaci nawisu materiału przeważnie w łukach o małym promieniu, skałczenia – 301 powstałe w wyniku przypadkowych uderzeń głowki szyny.



Rys. 10. Wada na złączu spawanym termitowo oznaczenie 422
Fig. 10. Defect on the termit welded joint designation 422

Budowane jako nowe lub modernizowane linie kolejowe posiadają w zdecydowanej większości tor bezстыkowy. Technologia toru bezстыkowego przewiduje łączenie szyn dwoma sposobami tj. zgrzewanie doczołowe (Rys. 9.) zgrzewarkami stacjonarnymi lub mobilnymi oraz spawanie termitowe w torach (Rys. 10).

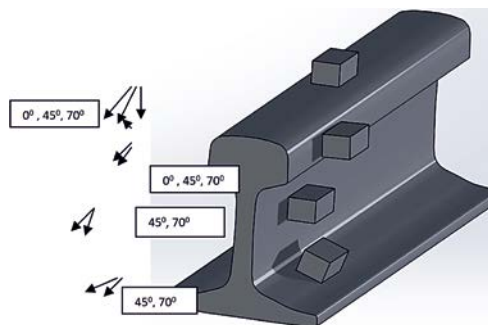
Obie metody generują potencjalne niebezpieczeństwo wystąpienia wad w zgrzeinach lub spoinach, gdzie najbardziej niebezpieczne są pęknięcia prowadzące do złamania szyny. Wobec powyższego badanie ultradźwiękowe w torach obejmują również miejsca łączenia szyn. Również połączenia miejscowe rozjazdów z szynami podlegają badaniom ultradźwiękowym.

2. Sposoby badania ultradźwiękowego szyn kolejowych

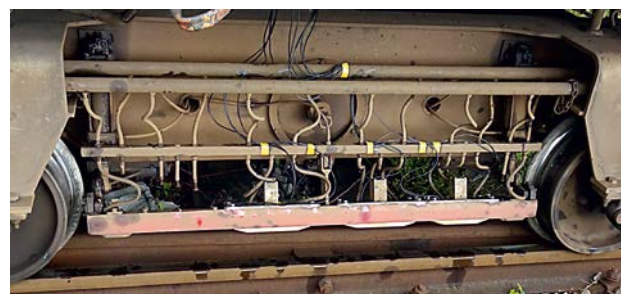
Wszystkie szlaki kolejowe w Polsce podlegają badaniom diagnostycznym, w tym także badaniom ultradźwiękowym. Badania te oparte są na wymaganiach zawartych w Instrukcjach Id-10 [3] oraz Id-17 [4], które opracowane zostały przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. w roku 2005. Zgodnie z powyższymi Instrukcjami badania ultradźwiękowe szyn w torach wykonywane są metodą ręczną oraz automatyczną. Metoda ręczna stosowana jest do badań połączeń zgrzewanych i spawanych oraz do badania rozjazdów kolejowych w połączeniach krzyżownic z szynami, a także w przypadku badań rozjemczych. Używane są głowice pojedyncze i podwójne do badań UT na fale podłużne o kącie 0° oraz na fale poprzeczne o kącie 45° i 70° i częstotliwości [2 – 3] MHz. Połączenia szyn spawanych termitowo również badane są metodą tandem z zastosowaniem dwóch głowic o kącie 45° . Badanie ręczne przeprowadzane jest z powierzchni tocznej oraz bocznej głowki szyny, a także z obu stron stopki (Rys. 11). Badanie to wykonywane jest przez zespół operatorów, którzy jednocześnie czuwają nad bezpiecznym prowadzeniem badań w torze, ostrzegając operatorów przed jadącymi pociągami.

Badanie ultradźwiękowe szyn metodą automatyczną jest wykonywane przez operatorów PKP PLK S.A. przy pomocy defektoskopu wielokanałowego oraz głowic pojedynczych i podwójnych o różnych kątach emisji fal ultradźwiękowych w materiał szyny, zamontowanych w śligach wagonu pomiarowego. Badanie wykonywane jest tylko z powierzchni tocznej szyny. Prędkość wagonu pomiarowego wynosi

maksymalnie 50 km/h. Na rysunku (Rys.12.) pokazano płożę wózka z zamontowanymi głowicami ultradźwiękowymi.



Rys. 11. Prowadzenie głowicy podczas badań UT szyn.
Fig. 11. Guiding of the head during UT testing of rails



Rys. 12. Płoza wózka wagonu z zamontowanymi głowicami UT
Fig. 12. Wagon trolley skid with UT heads mounted

Medium sprzęgającym głowice UT z powierzchnią szyny jest woda, podawana bezpośrednio na powierzchnię toczną szyny. Rejestracja wykrytych wad przez każdą głowicę prowadzona jest w sposób ciągły. Poza tym zamontowane kamery umożliwiają podgląd ujawnionych wad. Na rysunku (Rys. 13.) pokazano system rejestracji badań ultradźwiękowych szyn w torach wraz z zakwalifikowaniem rodzaju wykrytej wady.



Rys. 13. Monitory rejestrujące badania UT wagonu ultradźwiękowego
Fig. 13. Monitors recording UT tests of an ultrasonic wagon

Kwalifikacja rodzaju wad szyn pozwala na analizę częstotliwości występowania danych wad w torach i podjęcie środków przeciwdziałających dalszemu rozwojowi. Taki tryb postępowania umożliwia zastosowanie w określonym przedziale czasowym środków zapobiegawczych w postaci szlifowania lub frezowania powierzchni głowki szyny, eliminację źródła wad i poprawę komfortu jazdy pociągów.



Rys. 14. Wózek RDM-12 do badań UT szyn kolejowych
Fig. 14. RDM-12 trolley for UT testing of railway rails



Rys. 15. Badanie ultradźwiękowe połączenia trójmetalicznego szyn i krzyżownicy
Fig. 15. Ultrasonic examination of a three-metal joint of rails and a cross

Do wykonywania badań ultradźwiękowych szyn o zasięgu lokalnym stosowane są wózki jezdne wyposażone w zestaw głowic zamontowanych w ślizg z podajnikiem wodnym oraz kilkukanałowy defektoskop ultradźwiękowy różnych producentów. I w tym przypadku stosowane są głowice na fale podłużne i poprzeczne o kątach 0° , 45° i 70° [6]. Rejestracja badań ultradźwiękowych szyn dokonuje się zapisem komputerowym z możliwością odtworzenia w każdym momencie. Możliwość wykonywania dziennego badań UT przez operatorów jednego toku szyny oceniono na 4 km

szlaku. Na rysunku (Rys. 14) pokazano wózek jezdny typ RDM-12 stosowany w badaniach UT szyn przez operatorów PKP PLK S.A.

Jednakże w przeciwieństwie do połączeń szyn na odcinkach prostych, w których zastosowanie ma badanie automatyczne przy pomocy wagonu defektoskopowego, połączenia szyn z krzyżownicami rozjazdów podlegają wyłącznie badaniom ultradźwiękowym ręcznym. Stosowane krzyżownice ze stali wysoko manganowej odlewane i utwardzane wybuchowo są łączone z szynami przy pomocy przekładki ze stali austenicznej chromowo niklowej metodą zgrzewania doczołowego (Rys. 15)). Ten sposób łączenia podlega badaniom UT od strony szyny ze stali węglowych.

3. Posumowanie

Badanie ultradźwiękowe szyn kolejowych stanowi bardzo ważną część badań jakości torów na szlakach kolejowych, z uwagi na konieczność zapewnienia bezpieczeństwa jazdy pociągów. Ujawnienie wad szyn w początkowym okresie ich powstawania i rozwoju umożliwia podjęcie właściwych decyzji przez właściciela torów, w celu ograniczenie rozwoju wad oraz ich eliminację drogą szlifowania pociągami szliferskimi lub frezowania, a także naprawy miejscowych uszkodzeń szyn poprzez napawanie.

Badanie UT za pomocą wagonu defektoskopowego umożliwia badanie szyn szlaków głównych do czterech razy w roku. Na szlakach pośrednich badanie UT przeprowadzane jest jeden lub dwa razy w roku. Badanie UT wykonywane za pomocą wózków ręcznych RDM-12 z głowicami na fale podłużne i poprzeczne umożliwia dodatkowo kontrolę jakości szyn oraz wad ujawnionych za pomocą wagonu defektoskopowego.

4. Literatura/References

- [1] PN EN 13674-1+A1:2017 Kolejnictwo - Tor - Szyna - Część 1: Szyny kolejowe Vignole'a o masie 46 kg/m i większej
- [2] Bałuch H., Zagrożenia w nawierzchni kolejowej, Instytut Kolejnictwa, Warszawa 2017
- [3] Instrukcja Id-10 Badań defektoskopowych szyn, spoin i zgrzein w torach kolejowych, opracowanie PKP PLK S.A. 2005
- [4] Instrukcja Id-17 Wytyczne ultradźwiękowych badań złączy szynowych zgrzewanych, opracowanie PKP PLK S.A. 2005
- [5] Mikołaszewicz I. Wady i uszkodzenia szyn, powstawanie i eliminacja, Prezentacja na Konferencji Drogi szynowe, Warszawa 2015
- [6] Mackiewicz S., Podstawowe parametry głowic ultradźwiękowych oraz ich wpływ na jakość wykonywanych badań, Przegląd spawalnictwa nr 10/2016
- [7] René Heyder Nowy Katalog UIC uszkodzeń szyn - Technika Transportu Szynowego nr 1-2:2002.

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



DR



MFL



ACFM

LRUT

PAUT

PT

MT

ET

PEC

BADANIA NIENISZCZĄCE

**PRZEMYSŁ
4.0**

APARATURA DO BADAŃ NDT:

- | | | |
|----------------------------------|------------------------|-------------------------------|
| » CYFROWA RADIOGRAFIA | » ŁAWY DO BADAŃ MT | » SYSTEMY PULSED EDDY CURRENT |
| » DEFECTOSKOPY PHASED RRAY Z TFM | » DEFECTOSKOPY ACFM | » MAPOWANIE KOROZJI |
| » LINIE DO BADAŃ PT | » SYSTEMY GUIDED WAVES | » ROBOTY INSPEKCYJNE |

Casp System Sp. z o.o.

ul. Puszkina 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



Ireneusz Baran*

Urząd Dozoru Technicznego, Warszawa

Badania nieniszczące urządzeń technicznych metodą emisji akustycznej

Non-destructive testing of technical equipment using acoustic emission method

ABSTRACT

Technical devices operating in industrial conditions are subject to periodic technical inspection, in accordance with the Regulation of the Council of Ministers of 07 December 2012 on the types of technical devices subject to technical supervision (Journal of Laws 2012 item 1468).

As part of periodic inspections, supplementary non-destructive testing (NDT) are carried out, such as: eddy current tests - ET, leak tests - LT, magnetic powder tests - MT, penetration tests - PT, ultrasonic tests - UT and visual tests - VT. The research program and scope of actions depends on many factors, including the type of device, material used, degradation mechanisms occurring, operating conditions of the device, or its operating time.

Another NDT test method that is more and more widely used is the acoustic emission method (def. AE - acoustic emission, AT - acoustic emission testing according to PN-EN 1330-9: 2017-09). The ability to detect and locate AE signal sources, as well the ability to perform tests during the operation of devices (in-service), makes that this method is now worldwide considered as suitable for periodic testing of large objects, among others in the petrochemical and chemical. AT test allows detecting damages at an early stage of their occurrence, as well as at the same time allowing to globally monitoring whole object. The AT test complements very well together with other NDT methods, what allows verification and more accurate assessment of the detected damages. In many cases, the AE method is one of several methods used to assess the technical condition of the device. AT is used first of all at the initial stage, in order to indicate areas to tests by other NDT methods - for this reason this method is often called the "screening method". This article presents the basics of the AE method and its practical applications.

Keywords: non-destructive testing, acoustic emission (AE), testing using AE method - acoustic emission testing (AT)

STRESZCZENIE

Urządzenia techniczne pracujące w warunkach przemysłowych podlegają badaniom okresowym dozoru technicznego, zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 07 grudnia 2012 r. w sprawie rodzajów urządzeń technicznych podlegających dozorowi technicznemu (Dz.U. 2012 poz. 1468).

W ramach działań okresowych wykonywane są badania uzupełniające metodami nieniszczącymi (NDT), takimi jak: badania prądami wirowymi - ET, badania szczelności - LT, badania magnetyczno-proszkowe - MT, badania penetracyjne - PT, badania ultradźwiękowe - UT i badania wizualne - VT. Program badań i zakres czynności uzależniony jest od wielu czynników, w tym od rodzaju urządzenia, użytego materiału konstrukcyjnego, występujących mechanizmów degradacji, warunków pracy urządzenia czy też czasu jego eksploatacji.

Inną metodą badań NDT, coraz szerzej stosowaną, jest metoda emisji akustycznej (def. AE - emisja akustyczna, AT - badanie emisją akustyczną wg PN-EN 1330-9:2017-09). Możliwość wykrywania i lokalizacji źródeł sygnałów AE oraz możliwość wykonania badań w trakcie eksploatacji urządzeń sprawia, że obecnie metoda ta jest na świecie uznawana za odpowiednią do badań okresowych dużych urządzeń, między innymi w przemyśle petrochemicznym i chemicznym.

Badanie AT pozwala na ujawnienie uszkodzeń na wczesnym etapie ich występowania, a jednocześnie na objęcie badaniem całego obiektu. Badanie AT bardzo dobrze uzupełnia się z innymi metodami badań nieniszczących, co pozwala na weryfikację i dokładniejszą ocenę wykrywanych uszkodzeń. W wielu przypadkach metoda AE stanowi jedną z kilku wykorzystywanych metod do oceny stanu technicznego danego urządzenia. Stosuje się ją w pierwszej kolejności na etapie początkowym, w celu wskazania i uszczegółowienia miejsc do badania innymi metodami NDT - z tego powodu metoda ta często nazywana jest „metodą przesiewową”. W niniejszym artykule przedstawiono podstawy metody AE oraz jej praktyczne zastosowania.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, emisja akustyczna (AE), badanie metodą AE - badanie AT

1. Wstęp

Urządzenia techniczne pracujące w warunkach przemysłowych podlegają badaniom okresowym dozoru technicznego, zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 07 grudnia 2012 r. w sprawie rodzajów urządzeń technicznych podlegających dozorowi technicznemu (Dz.U. 2012 poz. 1468). W ramach działań okresowych wykonywane są badania uzupełniające metodami nieniszczącymi (NDT), takimi jak: badania prądami wirowymi - ET, badania szczelności - LT, badania magnetyczno-proszkowe - MT, badania penetracyjne - PT, badania ultradźwiękowe - UT i badania wizualne - VT. Program badań i zakres czynności uzależniony jest od wielu

czynników, w tym od rodzaju urządzenia, użytego materiału konstrukcyjnego, występujących mechanizmów jego degradacji, warunków pracy urządzenia czy też czasu jego eksploatacji (pracy).

Kolejną coraz szerzej stosowaną już od lat metodą NDT jest metoda emisji akustycznej (def. AE - emisja akustyczna, AT - badanie emisją akustyczną), w której personel podlega certyfikacji zgodnie z normą PN-EN ISO 9712:2012 „Badania nieniszczące. Kwalifikacja i certyfikacja personelu NDT”, a podstawy opisano i zdefiniowano w PN-EN 1330-9:2017-09 „Badania nieniszczące. Terminologia. Część 9: Terminy stosowane w badaniach emisją akustyczną” i PN-EN 13554:2011 „Badania nieniszczące. Emisja akustyczna. Zasady ogólne”.

Możliwość wykrywania i lokalizacji źródeł sygnałów AE

*Autor korespondencyjny. E-mail: ireneusz.baran@udt.gov.pl

oraz możliwość wykonania badań w trakcie eksploatacji urządzeń sprawia, że obecnie metoda ta jest na świecie uznawana za odpowiednią do badań okresowych dużych urządzeń, między innymi w przemyśle petrochemicznym i chemicznym.

Badanie AT pozwala na ujawnienie uszkodzeń na wczesnym etapie ich występowania, a jednocześnie na objęcie badaniem całego obiektu. Badanie pozwala ujawniać wady i uszkodzenia m.in. takie jak: pęknięcia materiału a także ich rozwój, uszkodzenia korozyjne, wycieki/nieszczelności czy odkształcenia plastyczne. W trakcie badania emisją akustyczną urządzeń wykrywane są uszkodzenia (nieciągłości) „aktywne” tzn. takie, które w określonych warunkach pracy będą przejawiały tendencję do rozwoju. Jest to ważny czynnik wyróżniający badania metodą AE od innych metod NDT.

Badanie AT bardzo dobrze uzupełnia się z innymi metodami badań nieniszczących, co pozwala na weryfikację i dokładniejszą ocenę wykrywanych uszkodzeń. W wielu przypadkach metoda AE stanowi jedną z kilku wykorzystywanych metod do oceny stanu technicznego danego urządzenia. Stosuje się ją głównie na etapie początkowym realizacji badań diagnostycznych, co ma na celu wskazanie i uszczegółowienie miejsc do badań innymi metodami NDT – z tego powodu metoda ta często nazywana jest „metodą przesiewową”.

W niniejszym artykule przedstawiono podstawy metody AE oraz jej praktyczne zastosowania.

2. Emisja akustyczna – pasywna metoda badań nieniszczących

Emisja akustyczna jest jedną z metod badań nieniszczących uwzględnionych w normie PN-EN ISO 9712:2012 (certyfikacja personelu), a opisana i zdefiniowana w PN-EN 1330-9:2017-09 i PN-EN 13554:2011. Według PN-EN 1330-9:2017-09, Emisja Akustyczna (AE) jest terminem stosowanym w przypadku chwilowych fal sprężystych wywołanych przez wyzwolenie energii w materiale lub przez proces.

Metoda AE, co istotne, jest pasywną metodą badań nieniszczących. Główne zalety tej metody badawczej to:

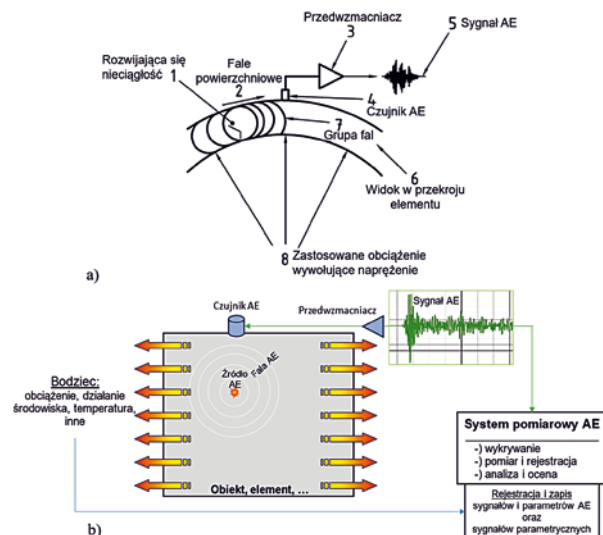
- możliwość globalnej inspekcji dużych elementów i konstrukcji – możliwość badania i monitorowania całego obiektu;
- możliwość lokalizacji źródła sygnałów AE generowanych przez wady/uszkodzenia;
- możliwość prowadzenia badań ciągłych;
- możliwość monitorowania procesów w czasie i miejscu ich występowania.

Główne ograniczenia metody AE to:

- podatność na zakłócenia;
- wpływ historii obciążania na możliwość realizacji badania;
- tłumienie fal AE wraz z propagacją;
- konieczność występowania bodźca zewnętrznego.

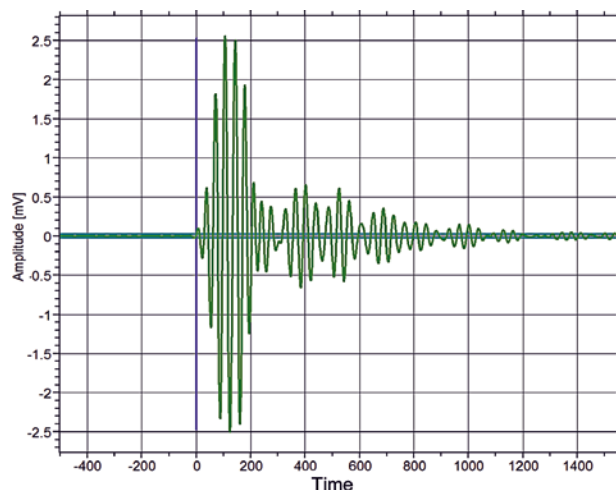
Badanie metodą AE polega na rejestracji fal sprężystych, będących efektem wyzwolenia energii sprężystej nagromadzonej w materiale, czyli jest to zmiana stanu

równowagi energetycznej w materiale na skutek przyłożonego zewnętrznego bodźca. Bodźcem wywołującym wyzwolenie energii i powstanie fal sprężystych (rys. 1) może być działanie obciążenia, środowiska czy zmiana temperatury. Procesy, którym towarzyszy emisja akustyczna to zarówno zmiany na poziomie mikro, jak i makro, takie jak: odkształcenie plastyczne, pękanie materiału, korozja, przecieki (nieszczelności), przemiany strukturalne i fazowe, reakcje chemiczne oraz delaminacja, pękanie włókien i osnowy w kompozytach, itp.



Rys. 1. Schemat podstaw emisji akustycznej: a) wg PN-EN 13554, b) ogólne zasady powstawanie fal AE, ich wykrywanie rejestracja i przetwarzanie

Fig. 1. Diagram of the basic of acoustic emission: a) by PN-EN 13554, b) general rules of generating of AE waves, their detection registration and processing



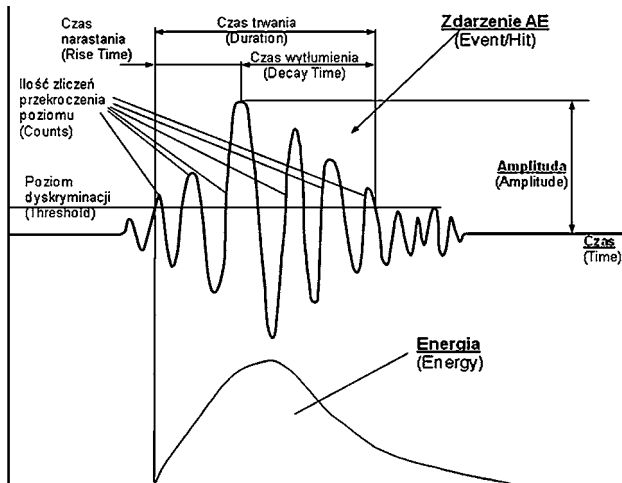
Rys. 2. Sygnał impulsowy AE zarejestrowany przez pojedynczy czujnik pomiarowy

Fig. 2. AE burst signal registered by a sensor

Fale AE propagują we wszystkich kierunkach od źródła, mogą więc być rejestrowane przez jeden lub więcej czujników zamocowanych na obiekcie lub elemencie. W czasie propagacji fale AE ulegają wytłumieniu, co ogranicza dystans, na jakim mogą one być wykrywalne. Dystans

ten jest uzależniony od wielu czynników, w tym przede wszystkim od własności materiału, geometrii obiektu i poziomu zakłóceń pochodzących z tła akustycznego.

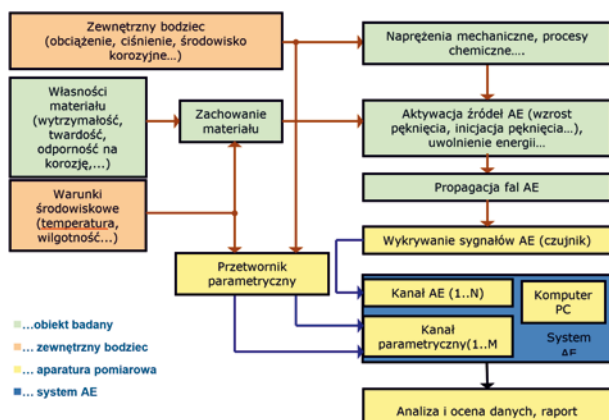
Sygnał impulsowy AE (rys. 2) charakteryzowany jest za pomocą szeregu parametrów, takich jak (rys. 3): amplituda szczytowa, energia, czas narastania, czas trwania, liczba przekroczeń progu dyskryminacji (detekcji), co definiuje norma PN-EN 1330-9:2017-09.



Rys. 3. Parametry sygnału impulsowego AE (AE Hit/Event)
Fig. 3. Burst AE signal parameters (AE Hit/Event)

Metoda AE polega na rejestracji fal sprężystych za pomocą czujników piezoelektrycznych, które zamieniają fale AE na sygnał elektryczny (rys. 2) transmitowany dalej do systemu pomiarowego (rys. 1 i 4). Wszystkie elementy związane z badaniem metodą AE i zależności między nimi pokazano schematycznie na rysunku 4.

Oprogramowanie systemu pomiarowego AE umożliwia wizualizację zarejestrowanych danych pomiarowych w czasie prowadzenia pomiaru, a także ich zapis (w czasie rzeczywistym) w celu późniejszej analizy.

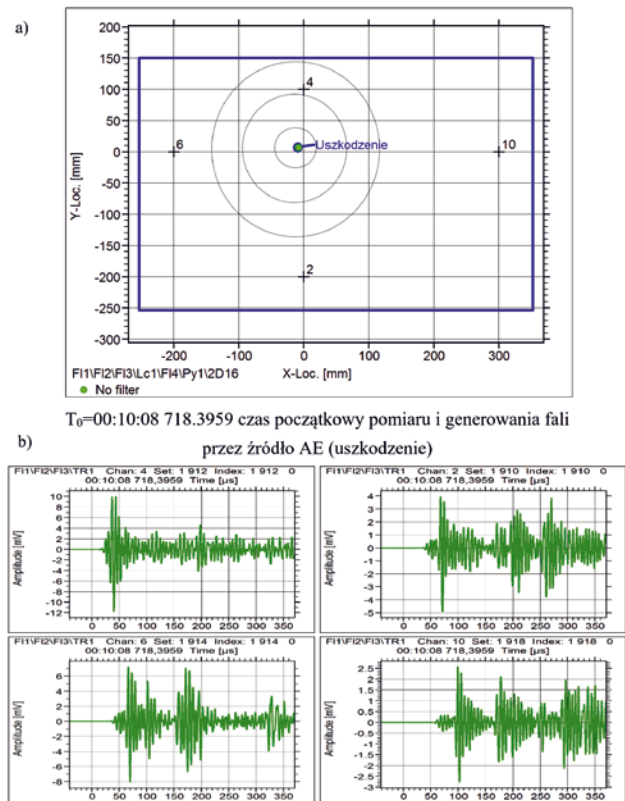


Rys. 4. Schematyczne przedstawienie elementów badania metodą AE
Fig. 4. Presentation of elements of the AE test

W przypadku zastosowania kilku czujników oraz oprogramowania z odpowiednimi algorytmami możliwe jest lokalizowanie źródła AE na podstawie różnicy czasu

dotarcia fali AE do poszczególnych czujników (rys. 5).

Badania urządzeń technicznych metodą AE, mogą różnić się między sobą ze względu na rodzaj urządzenia oraz cel i zakres badania. Przykładem może być badanie AT urządzeń ciśnieniowych i płaskodennych zbiorników magazynowych o osi pionowej.



Rys. 5. Zasada lokalizacji źródła AE na płaszczyźnie: a) rozmieszczenie czujników na płycie i źródło fal AE (uszkodzenie), b) sygnały AE rejestrowane na poszczególnych czujnikach pomiarowych

Fig. 5. The rule of AE source location on plane: a) layout of sensors on plate and AE wave source (damage), b) AE signals recorded on each measurement sensors

W przypadku badań metodą AE typowych urządzeń ciśnieniowych lub płaszczy zbiorników magazynowych fala AE propaguje od źródła bezpośrednio w materiale (metal) i przetwarzana jest na sygnał AE przez czujniki rozmieszczone na powierzchni ścianki badanego urządzenia. Dalej sygnał AE rejestrowany i przetwarzany jest przez system pomiarowy AE. W tym przypadku emisja akustyczna w postaci fal sprężystych generowana jest przez powierzchniowe i wewnętrzne nieciągłości w materiale ścianki, spoinach i elementach badanego urządzenia, podlegających działaniu bodźca w postaci obciążenia (np. ciśnienia) w trakcie badania, a czego wynikiem jest wyzwolenie energii w materiale.

Natomiast w przypadku badania metodą AE den zbiorników magazynowych fala AE propaguje od źródła na dnie poprzez magazynowaną w nim ciecz (np. ropa naftowa) do ścianki zbiornika, gdzie rozmieszczone są czujniki na jego powierzchni zewnętrznej na całym obwodzie według odpowiedniego schematu. Następnie

sygnał AE rejestrowany i przetwarzany jest przez system pomiarowy AE. Dla tego przypadku emisja akustyczna w postaci fal sprężystych generowana jest przede wszystkim przez procesy korozyjne materiału (metal) dna i/lub przecieki w dnie, jak również dodatkowo przez powierzchniowe i wewnętrzne nieciągłości w materiale dna i/lub pęknięcia produktów korozji, gdzie przyłożonymi bodźcami są maksymalne robocze napełnienie badanego zbiornika (obciążenie) i agresywne środowisko korozyjne.

Wyżej wymienione badania zasadniczo różnią się od siebie, zarówno metodyką pomiarową, jak i zakresem oraz celem. Badanie dna zbiornika magazynowego ma przede wszystkim na celu wykrycie i zlokalizowanie źródeł AE powodowanych aktywnymi procesami korozyjnymi i/lub przeciekami. Natomiast badanie urządzenia ciśnieniowego lub płaszcza zbiornika magazynowego ma na celu wykrycie i zlokalizowanie źródeł AE generowanych przez powierzchniowe i wewnętrzne nieciągłości w spoinach i elementach ścianek badanego urządzenia.

3. Badanie AT urządzeń ciśnieniowych

Badanie emisją akustyczną (AT) urządzeń ciśnieniowych wykonuje się zgodnie z wymaganiami dotyczącymi zastosowania metody AE zawartymi w normach i specyfikacji:

- PN-EN 13554:2011 „Badania nieniszczące. Emisja akustyczna. Zasady ogólne”;
- PN-EN 14584:2013-07 „Badania nieniszczące. Emisja akustyczna. Sprawdzenie metalowych urządzeń ciśnieniowych podczas próby odbiorczej. Planarna lokalizacja źródeł AE”;
- ASME BPVC.V-2017 „Article 12 - Acoustic emission examination of metallic vessels during pressure testing” oraz w normach związanych, które zostały w nich wykazane.

Badanie metodą emisji akustycznej (AE) obejmuje zlokalizowanie i określenie klasy źródeł sygnałów emisji akustycznej generowanych przez powierzchniowe i wewnętrzne wady w ściankach, połączeniach i elementach płaszcza badanego urządzenia, podlegających działaniu obciążenia w trakcie badania. Klasyfikację aktywności źródła AE według normy PN-EN 13554:2011, jak również zawartej w normie PN-EN 14584:2013-07 przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Klasyfikacja (aktywności) zlokalizowanych źródeł AE
Tab. 1. AE source location cluster severity grading

Klasa źródła	Definicja	Zalecane działania
1	Źródło mało istotne	Nie są wymagane dalsze działania. Źródło do uwzględnienia w następnych badaniach
2	Źródło aktywne	Zaleca się badanie innymi metodami nieniszczącymi, jeśli źródło jest powiązane z charakterystycznymi elementami urządzenia ciśnieniowego (np.: spoiny króćców, uchwytów itd.)
3	Źródło bardzo aktywne	Zanim urządzenie ciśnieniowe zostanie włączone do eksploatacji, powinna być przeprowadzona dalsza ocena innymi odpowiednimi metodami badań nieniszczących

4. Badanie AT den płaskodennych zbiorników magazynowych o osi pionowej

Badanie emisją akustyczną (AT) den płaskodennych zbiorników magazynowych o osi pionowej wykonuje się zgodnie z wymaganiami dotyczącymi zastosowania metody AE zawartymi w normach:

- PN-EN 13554:2011 „Badania nieniszczące. Emisja akustyczna. Zasady ogólne”;
- PN-EN 15856:2010 „Badania nieniszczące. Emisja akustyczna. Zasady ogólne badania AE przy wykrywaniu korozji w metalowym otoczeniu wypełnionym cieczą”;
- PN-EN ISO 18081:2016-08 „Badania nieniszczące. Emisja akustyczna. Wykrywanie nieszczelności z wykorzystaniem emisji akustycznej” oraz w normach związanych.

Badanie AT den zbiorników magazynowych na materiały ciekłe obejmuje zlokalizowanie w dnie zbiornika i strefie przysięcennej zbiornika bezpośrednio stykającymi się z magazynowanym materiałem, źródeł AE powodowanych procesami korozyjnymi (wg PN-EN ISO 8044:2002 „Korozja metali i stopów - Podstawowe terminy i definicje”) lub przeciekami oraz ich ocenę dla potrzeb klasyfikacji stanu technicznego zbiornika.

Klasyfikację jakościową zbiorników magazynowych zgodną z zaleceniami normy PN-EN 15856:2010 oraz systemem klasyfikacji zbiorników, opartym o europejski system klasyfikacji zbiorników magazynowych, przedstawiono poniżej w tabeli 2.

Tab. 2. Klasyfikacja jakościowa zbiorników magazynowych
Tab. 2. Tank grading relating to rate of degradation

Opis stanu badanego obiektu	Klasa zbiornika	Zalecany okres eksploatacji
Brak aktywnych źródeł AE	I	4 lata
Zlokalizowano źródła mało istotne – procesy korozyjne o niskiej aktywności	II	2 lata
Zlokalizowano źródła istotne – procesy korozyjne o średniej aktywności	III	1 rok
Zlokalizowano źródła bardzo istotne – wykryto wyciek i/lub procesy korozyjne o wysokiej aktywności	IV	wymagana rewizja wewnętrzna w najbliższym możliwym czasie

5. Przykłady badań AT różnych urządzeń technicznych

Poniżej przedstawiono dwa przykłady zastosowania metody AE do badania różnych urządzeń technicznych.

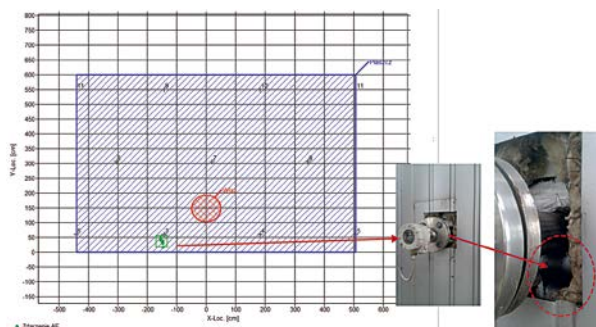
Na rysunku 6 pokazano zbiornik magazynowy, na którym zakres badania AT obejmował jego płaszczyznę i dach. Na rysunku 7 pokazano lokalizację wykrytego źródła AE na płaszczyźnie zbiornika oraz jego identyfikację jako kontakt (nacisk) węzłaownicy grzewczej z króćcem termopary (duże naprężenia kontaktowe).

Na rysunku 8 pokazano zbiornik ciśnieniowy oraz lokalizację wykrytych źródeł AE, jak również identyfikację tych wskazań jako uszkodzenia korozyjne (wżery - korozja

kontaktowa z blachą na podporze) oraz uszkodzenie (odkształcenie i pęknięcie) śruby połączenia kołnierzewego.



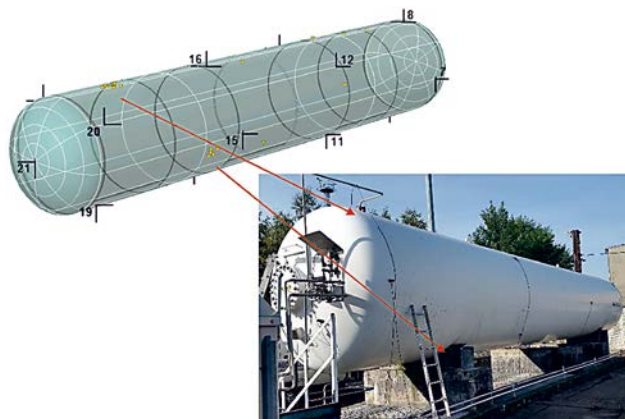
Rys. 6. Widok badanego metodą AE zbiornika magazynowego
Fig. 6. The view of storage tank tested by AE method



Rys. 7. Lokalizacja źródła AE na płaszczu badanego zbiornika magazynowego – identyfikacja wskazania: kontakt (nacisk) węzownicy z króćcem na płaszczu zbiornika
Fig. 7. Location of AE source on the shell of tested storage tank – identification of indication: direct contact (pressure) heating coil with nozzle on the tank shell

6. Podsumowanie

Należy podkreślić, że przedstawione w artykule zastosowania AT do badania obiektów przemysłowych są jedynie przykładami możliwości metody emisji akustycznej. Metoda AE może być i jest szeroko stosowana w badaniu wielu innych obiektów, zarówno cywilnych, jak i przemysłowych. Dla



Rys. 8. Widok badanego metodą AE zbiornika ciśnieniowego oraz lokalizacja źródeł AE i identyfikacja wskazań: uszkodzenie korozyjne (wżery) oraz uszkodzenie śruby połączenia kołnierzewego

Fig. 8. The view of tested by AE method pressure vessel and location of AE sources, as well identification of indications: corrosion damages (pits) and damage of bolt of flange connection

przykładu można tu wymienić: badania konstrukcji mostów zarówno stalowych, jak i betonowych, różnych konstrukcji betonowych, zbiorników i elementów kompozytowych, suwnic, turbin, hydroakumulatorów, butli gazów technicznych czy też rurociągów technologicznych. Wymagane jest jednak w każdym przypadku indywidualne podejście, zarówno od strony metodyki badawczej, jak i kryteriów oceny. Ze względu na możliwości adaptacji metody do badania różnych obiektów, obserwuje się od lat zwiększone zainteresowanie jej wykorzystaniem.

7. Literatura/References

- [1] NDT Handbook - Third Edition Vol.6 - Acoustic Emission Testing, Editors: R.K.Miller, E.v.K.Hill and P.O.Moor, ASNT 2005.
- [2] PN-EN 1330-9:2017-09 Badania nieniszczące - Terminologia - Część 9: Terminy stosowane w badaniach emisją akustyczną.
- [3] PN-EN 13554:2011 Badania nieniszczące - Emisja akustyczna - Zasady ogólne.
- [4] PN-EN 14584:2013-07 Badania nieniszczące - Badania emisją akustyczną - Sprawdzenie metalowych urządzeń ciśnieniowych podczas próby odbiorczej - Planarna lokalizacja źródeł AE.
- [5] PN-EN 15856:2010 Badania nieniszczące - Emisja akustyczna - Zasady ogólne badania AE przy wykrywaniu korozji w metalowym otoczeniu wypełnionym cieczą.
- [6] PN-EN ISO 18081:2016-08 Badania nieniszczące - Emisja akustyczna - Wykrywanie nieszczelności z wykorzystaniem emisji akustycznej.
- [7] PN-EN ISO 8044:2002 „Korozja metali i stopów - Podstawowe terminy i definicje”.
- [8] ASME BPVC.V-2017 „Article 12 - Acoustic emission examination of metallic vessels during pressure testing”.

Badania nieniszczące

Bezpieczeństwo urządzeń - jakość wyrobów i materiałów

Badania nieniszczące urządzeń i konstrukcji stanowią grupę metod badawczych, które dostarczają informacji o właściwościach materiału obiektu, nie wpływając na jego właściwości strukturalne i powierzchniowe. Nadrzędnym celem prowadzenia badań nieniszczących jest przede wszystkim wykrywanie oraz ocena wad mających charakter nieciągłości materiału. Zastosowanie badań nieniszczących uzasadniają głównie względy ekonomiczne wystąpienia nieprzewidzianej awarii.

TÜV SÜD Polska zatrudnia doświadczonych ekspertów, trenerów i specjalistów nadzoru. Wspieramy w uzyskaniu wiedzy z zakresu badań nieniszczących poprzez organizację szkoleń. Pomagamy Państwu również w procesie certyfikacji personelu, organizując egzaminy certyfikacyjne w miejscu szkolenia. TÜV SÜD Polska posiada także profesjonalne Laboratorium Badań Materiałowych, uznane przez Urząd Dozoru Technicznego.



Usługi w zakresie badań nieniszczących oferowane przez TÜV SÜD Polska

Prowadzone szkolenia	Stosowane metody badawcze	Badane obiekty
- Badania wizualne (VT) - Badania penetracyjne (PT) - Badania magnetyczne (MT) - Badania ultradźwiękowe (UT) - Badania ultradźwiękowe techniką TOFD (UT.TOFD) - Badania ultradźwiękowe techniką PA (UT.PA) - Badania ultradźwiękowe. Pomiary grubości (UT.TM) - Badania radiograficzne (RT) - Badania radiograficzne. Ocena zdjęć radiograficznych połączeń spawanych (RT.FI)	- Wizualna VT - Penetracyjna PT - Magnetyczna MT - Ultradźwiękowa UT - Ultradźwiękowa UT TOFD - Ultradźwiękowa UT PHASED ARRAY - Radiograficzna RT	- Odlewy i odkuwki - Rury i rurociągi - Wyroby przerabiane plastycznie - Elementy konstrukcji stalowych - Elementy urządzeń dźwigowych - Wyroby i złącza spawane - Złącza egzaminacyjne spawaczy - Złącza próbne dla uznania technologii spawania - Urządzenia ciśnieniowe - Zbiorniki i kotły

Patrycja Pyzik¹, Aleksandra Ziaja-Sujdak¹, Krzysztof Grabowski¹, Grzegorz Góra², Łukasz Ambroziński^{1*}

¹Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

²Wytwórnia Sprzętu Komunikacyjnego "PZL-Świdnik" S.A., Świdnik

Detekcja wad w połączeniach klejonych płyt aluminiowych z wykorzystaniem laserowo generowanych ultradźwięków

Detection of disbond defects in adhesively bonded aluminum plates using laser-generated ultrasounds

ABSTRACT

The paper presents an approach that utilizes laser for ultrasound excitation and measurement to study adhesively bonded aluminum plates in pulse-echo mode. The pulse laser beam generates shear waves propagating at an oblique angle from normal to the surface. The response is measured with a high-sensitivity Sagnac interferometer. To select the optimal distance between the transmitter and receiver, multiphysics numerical simulations were performed. The work presents imaging of bonding layer quality between aluminum 3 sheets of thickness 1, 1.5 and 3.5 mm. The results are shown for the defect in the first adhesive layer, however disbond imaging can also be performed for other layers.

Keywords: Laser Ultrasound, bonded joints, shear waves, disbond detection

STRESZCZENIE

W referacie zostało przedstawione podejście wykorzystujące laserowe wzbudzenie i pomiar ultradźwięków do badania połączeń klejonych blach aluminiowych w trybie echa. Wiązka lasera impulsowego została tak zogniskowana, aby generować falę poprzeczną propagującą pod kątem od normalnej do powierzchni. W celu rejestracji odpowiedzi wykorzystano wysokoczuły interferometr zbalansowany typu Sagnac. Po to, aby dobrać optymalną odległość nadajnika i odbiornika wykorzystano wielofizyczne symulacje numeryczne. Przedstawiono obrazowanie połączeń między 3 blachami o grubościach 1, 1.5 i 3.5 mm. Ukazano obrazowanie wady w pierwszej warstwie kleju, jednak obrazowanie może być też wykonane dla innych warstw.

Słowa kluczowe: klejone płyty aluminiowe, detekcja wad, ultradźwięki generowane laserowo

1. Wstęp

Wielowarstwowe metalowe płyty klejone są powszechnie stosowane w wielu gałęziach przemysłu, w tym w energetyce jądrowej, branży motoryzacyjnej i lotniczej [1]. Porowatości oraz puste przestrzenie w warstwie kleju można wykryć m.in. za pomocą radiografii rentgenowskiej. Ta technika wymaga jednak dwustronnego dostępu do badanego materiału, jest stosunkowo wolna i nie może wykryć defektów o zerowej objętości, takich jak rozwarstwienia. Dlatego metody wykorzystujące ultradźwięki nadal są często wykorzystywane do badania tych struktur.

W przypadku typowych elementów konstrukcji lotniczych, łączone są z reguły od 2 do 4 płyt o grubości 0,5 - 4 mm w celu uzyskania pożądanej sztywności. W przypadku tych struktur wielokrotne odbicia fal i konwersje modów w kolejnych warstwach sprawiają, że interpretacja sygnału puls-echo jest niezwykle trudna. Dlatego tryb badań techniką przepuszczania pozostaje standardową procedurą, nawet jeśli nie może zapewnić dogłębnej rozdzielczości.

Wiele ograniczeń konwencjonalnych badań ultradźwiękowych zostało ostatnio zredukowanych za pomocą metod Laserowych Ultradźwięków (LU). Impulsy laserowe mogą generować sygnały szerokopasmowe, zapewniając rozdzielczość znacznie lepszą niż w przypadku klasycznych sond ultradźwiękowych. W przypadku kompozytów, fale podłużne odbijane od kolejnych warstw mogą tworzyć obrazy o jakości porównywalnej z rentgenowską tomografią komputerową [2].

W strukturach metalowych, metoda LU jest ograniczona, ponieważ nie może skutecznie wytwarzać fal podłużnych bez ablacji

powierzchni. Niemniej jednak, przy użyciu źródła laserowego, w metalach mogą być generowane inne mody fal. W literaturze opisane są zastosowania laserowo generowanych fal powierzchniowych [3], poprzecznych [4] oraz fal Lamb'a [5].

W niniejszej pracy zaprezentowane jest wykrywanie uszkodzeń na bazie LU w aluminiowych płytach klejonych. Generowane laserowo fale poprzeczne rozchodzą się pod kątem skośnym do badanej struktury. Jeśli nieciągłość leży na ich ścieżce propagacji, fala odbita propaguje się na powierzchnię, gdzie można ją wykryć. Znając kąt generowania fali i głębokość przewidywanych defektów, położenie detektorów optycznych można regulować tak, aby zmaksymalizować czułość systemu.

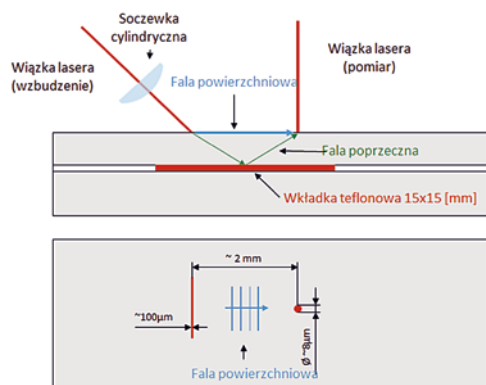
2. Badania eksperymentalne

2.1 Tor pomiarowy

Eksperymenty przeprowadzono przy użyciu skanera LU opisanego szczegółowo w [6]. Tor pomiarowy przedstawiono schematycznie na rys. 1. Wiązkę laserową zogniskowano za pomocą cylindrycznej soczewki, aby utworzyć cienką linię na powierzchni próbki. Na podstawie wyników przeprowadzonych symulacji numerycznych odległość źródło-odbiornik dobrano jako 2 mm.

Badana próbka składała się z trzech płyt aluminiowych (o grubości 1; 1,5 i 3,5 mm) połączonych ze sobą cienką warstwą kleju epoksydowego. Wkładka teflonowa 15 x 15 mm została umieszczona między pierwszą, a drugą warstwą. Próbkę przymocowano do skanera mechanicznego i zbadano w obszarze uszkodzenia z rozdzielczością 0,02 mm. Sygnały uśredniono przestrzennie za pomocą dwuwymiarowego okna Gaussa (15 x 15 punktów) i filtru dolnoprzepustowy o częstotliwości odcięcia 9 MHz.

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



Rys. 1. Tor pomiarowy wykorzystujący technikę laserowych ultradźwięków

Fig. 1. Schematics of the experimental setup for the laser ultrasound technique

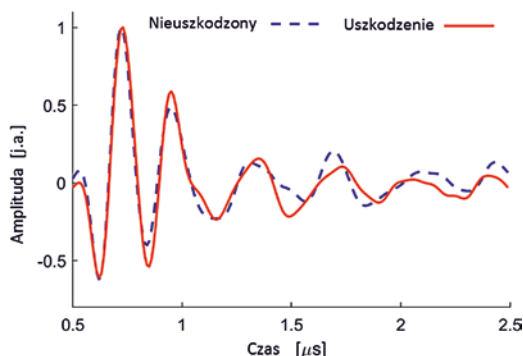


Rys. 2. Przekrój badanej próbki. Trzy warstwy aluminiowe połączone klejem epoksydowym

Fig. 2. Cross-section of the tested sample. Three aluminum layers bonded with epoxy adhesive

2.2 Wyniki

Zarejestrowane sygnały zostały przefiltrowane oraz uśrednione zgodnie z powyższym opisem. Przykładowe sygnały czasowe (A-skany) zarejestrowane w obszarze uszkodzonym i nieuszkodzonym są pokazane na Rys.3.



Rys. 3. Porównanie A-skanów zarejestrowanych w nieuszkodzonym i uszkodzonym obszarze próbki

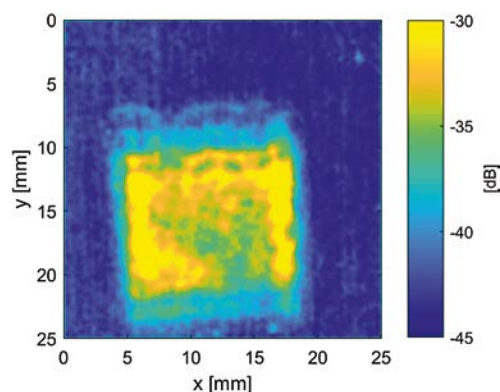
Fig. 3. Comparison of A-scan signals acquired over undamaged and damaged area of the sample

Globalne maksimum sygnału widoczne dla ok. 0.7 μ s odpowiada fali powierzchniowej, która utrudnia interpretację uzyskanego wyniku. Aby skupić się na różnicach sygnałów związanych z defektem, otrzymane dane zostały poddane procesowi filtracji odwrotnej, opisaną bardziej szczegółowo w [7]. Następnie, otrzymane dane zostały przedstawione na rys. 4. w formie zobrazowania typu C pokazującego amplitudę odbitej fali poprzecznej. Wyniki jednoznacznie pokazują umiejscowienie wkładki teflonowej.

3. Wnioski

W niniejszej pracy zaprezentowano metodę badania klejonych płyt aluminiowych przy użyciu laserowego wzbudzenia i pomiaru ultradźwięków. Chociaż fale podłużne nie mogą być skutecznie

wzbudzane w metalowych płytach za pomocą impulsów laserowych (bez ablacji materiału), struktury te można badać za pomocą innych typów fal. Przedstawione w tej pracy wyniki pokazują, iż klejone płyty aluminiowe można badać za pomocą fal poprzecznych efektywnie wzbudzonych pod kątem do normalnej powierzchni. Ze względu na złożoną naturę odbieranych sygnałów, identyfikacja indywidualnych odbić fal w strukturach wielowarstwowych może być trudna. Jednak odpowiednio dobrana odległość pomiędzy źródłem a detektorem pozwala zmaksymalizować czułość techniki pomiarowej. Proponowana metoda jest bezkontaktowa, szybka oraz daje wysokoczułe wyniki, pozwalając na ocenę nieciągłości m.in. w materiałach klejonych.



Rys. 4. Zobrazowanie wkładki teflonowej przedstawiające amplitudę odbitej fali poprzecznej

Fig. 4. Result of Teflon insert imaging by the amplitude of the reflected shear wave

4. Podziękowanie

Prezentowane wyniki uzyskano w ramach realizacji projektu „Bezkontaktowe techniki laserowe do szybkich ultradźwiękowych badań nieniszczących metalowych elementów konstrukcyjnych” Nr LIDER/15/0085/L-8/16/NCBR/2017, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

5. Literatura

- [1] Guyott, C. C. H., Cawley, P., and Adams, R. D., 1986, “The Non-Destructive Testing of Adhesively Bonded Structure: A Review,” *J. Adhes.*, 20(2), pp. 129–159.
- [2] Pelivanov, I., Ambroziński, Ł., Khomenko, A., Koricho, E. G., Cloud, G. L., Haq, M., and O'Donnell, M., 2016, “High Resolution Imaging of Impacted CFRP Composites with a Fiber-Optic Laser-Ultrasound Scanner,” *Photoacoustics*, 4(2), pp. 55–64.
- [3] Aindow, A. M., Dewhurst, R. J., Hutchins, D. A., and Palmer, S. B., 1981, “Laser-generated Ultrasonic Pulses at Free Metal Surfaces,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 69(2), pp. 449–455.
- [4] Davies, S. J., Edwards, C., Taylor, G. S., and Palmer, S. B., 1993, “Laser-Generated Ultrasound: Its Properties, Mechanisms and Multifarious Applications,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 26(3), pp. 329–348.
- [5] Hutchins, D. A., Lundgren, K., and Palmer, S. B., 2005, “A Laser Study of Transient Lamb Waves in Thin Materials,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 85(4), pp. 1441–1448.
- [6] Pelivanov, I., Shtokolov, A., Wei, C. W., and O'Donnell, M., 2016, “Ultrasound System for Robust Inspection of Composites,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 62(9), pp. 1696–1703.
- [7] Ambroziński, L. et al. (2019) ‘Detection of disbands in adhesively bonded aluminum plates using laser ultrasound’, in 46th Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Portland.

Ryszard Krawczyk^{1*}, Piotr Wojtas²

¹Politechnika Częstochowska

²Rafako S.A., Racibórz

Dokładność oceny w badaniach ultradźwiękowych złączy spawanych techniką DGS

Accuracy of assessment in ultrasonic testing of DGS welded joints

ABSTRACT

The analysis presented in the study was to determine the accuracy in the assessment system used when testing welded joints using the ultrasonic method using the DGS technique. An attempt was made to determine the DDSR reference reflector as a function of the thickness of the tested material. The designated reflector allowed the assessment of sensitivity of reference reflectors adopted according to PN-EN ISO 17640.

Keywords: ultrasonic tests; DGS technique; test sensitivity; accuracy of assessment; welded joints

STRESZCZENIE

Przedstawiona w opracowaniu analiza miała na celu określenie dokładności w systemie oceny stosowanym przy badaniu złączy spawanych metodą ultradźwiękową z zastosowaniem techniki DGS. Podjęto próbę wyznaczenia reflektora odniesienia DDSR jako funkcji grubości badanego materiału. Wyznaczony reflektor pozwolił na ocenę czułości reflektorów odniesienia przyjętych wg normy PN-EN ISO 17640.

Słowa kluczowe: badania ultradźwiękowe; technika DGS; czułość badania; dokładność oceny; złącza spawane

1. Wstęp

Badania ultradźwiękowe złączy spawanych prowadzone są głównie na podstawie normy PN-EN ISO 17640 [1]. Warunki tej normy określone zostały dla badania złączy spawanych z pełnym przetopem materiałów ferrytycznych w zakresie grubości od 8 do 100 mm. W normie tej zalecane jest stosowanie czterech technik badania różniących się głównie rodzajem reflektora odniesienia oraz zalecanym zakresem grubości badanych materiałów. Spośród tych czterech technik dominującą rolę w badaniach prowadzonych najczęściej w Europie odgrywa technika nr 2 zwana DGS, bazująca na reflektorze odniesienia w postaci płaskodennego otworu DDSR o średnicy zależnej od grubości badanego materiału. Przyjęte w normie średnice reflektora odniesienia DDSR wynoszą odpowiednio 1,5; 2,0; 2,5 i 3,0 mm i obowiązują dla przedziałów grubości badanych materiałów 8 do 15, 15 do 40 i 40 do 100 mm w zależności od częstotliwości wiązki fali ultradźwiękowej oraz przyjętego poziomu akceptacji. Zależności te przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Zależność średnicy reflektora odniesienia D_{DSR} [mm] od grubości materiału i częstotliwości wiązki fali ultradźwiękowej

Tab. 1. Dependence of the D_{DSR} [mm] reference reflector diameter on material thickness and ultrasonic wave frequency

Nominalna częstotliwość głowicy [MHz]	Grubość materiału t [mm] i poziom akceptacji					
	8 ≤ t < 15		15 ≤ t < 40		40 ≤ t < 100	
	PA 2	PA 3	PA 2	PA 3	PA 2	PA 3
2,0 do 2,5	-	-	$D_{DSR}=2,5$	$D_{DSR}=2,5$	$D_{DSR}=3,0$	$D_{DSR}=3,0$
3,0 do 5,0	$D_{DSR}=1,5$	$D_{DSR}=1,5$	$D_{DSR}=2,0$	$D_{DSR}=2,0$	$D_{DSR}=3,0$	$D_{DSR}=3,0$

Jak wynika z tabeli 1, przyjęte średnice reflektorów odniesienia DDSR zmieniają się skokowo w odpowiednich przedziałach

grubości badanych materiałów. Zmiana skokowa reflektora odniesienia oznacza wpływ na zmianę czułości w realizowanych badaniach złączy spawanych o różnych grubościach w danym przedziale, a tym samym wpływ na ocenę. Charakter zmiany reflektora odniesienia ma kluczowe znaczenie dla dokładności w ocenie badanych złączy spawanych, ponieważ stanowi podstawę do wyznaczenia poziomu odniesienia przyjętego w normie PN-EN ISO 11666 [2]. Względem wyznaczonego poziomu odniesienia określone zostały pozostałe kryteria stosowane w ocenie, tj. poziom oceny, poziom rejestracji oraz poziom akceptacji.

2. Założenia do analizy

Celem przeprowadzonej analizy była ocena dokładności w badaniach ultradźwiękowych złączy spawanych przeprowadzanych na podstawie norm PN-EN ISO 17640 i PN-EN ISO 11666. Analizę przeprowadzono dla najszerszej stosowanej w badaniach ultradźwiękowych techniki nr 2 (DGS) i zakresu grubości materiału tj. od 8 do 100 mm oraz częstotliwości głowicy 4 MHz.

Podstawę do przeprowadzonej analizy stanowiła wyznaczona wartość średnicy reflektora odniesienia, która z kolei jest podstawą do wyznaczenia czułości badania. Wyznaczona wartość średnicy reflektora odniesienia została określona w funkcji w przyjętym zakresie grubości materiału. Szacowanie dokładności oceny natomiast przeprowadzono, porównując uzyskane wartości reflektora odniesienia wyznaczone w funkcji grubości materiału do reflektora odniesienia określonego w normie PN-EN ISO 17640.

3. Analiza czułości reflektora tarczowego

W pierwszym etapie analizy wyznaczono ubytek przekroju

*Autor korespondencyjny. E-mail: ryszardkrawczyk@spaw.pcz.pl

badanego materiału poddanego próbie rozciągania do maksymalnych naprężeń o wartość przekroju reflektora tarczowego. Do analizy przyjęto wymiary próbek poddawanych naprężeniom rozciągającym zgodnie z PN-EN ISO 4136 z przedziału grubości powyżej 2 mm, gdzie podstawą przekroju jest wymiar $a = 25$ mm, natomiast wymiar b jest wysokością przekroju, która odpowiada grubości t materiału w mm [3].

Skalowanie czułości przyjęto dla płaskodennego otworu o średnicy 1,5; 2,0 oraz 3,0 mm w odpowiednich zakresach grubości od 8 do 15 mm, od 15 do 40 mm oraz od 40 do 100 mm. Wartość średnicy reflektora płaskodennego w funkcji grubości materiału została wyznaczona zgodnie z przedstawionymi poniżej kolejnymi zależnościami [5].

Pole przekroju próbki poddawanej naprężeniom rozciągającym $[mm^2]$:

$$S = a \cdot b = 25 \cdot t \quad (1)$$

gdzie:

a – stała podstawa przekroju 25 mm wg PN-EN ISO 4136 [3],

b – wysokość przekroju dla grubości materiału t [mm].

Pole przekroju reflektora płaskodennego $[mm^2]$:

$$S_{DSR} = \frac{\pi \cdot D_{DSR}^2}{4} \quad (2)$$

gdzie: D_{DSR} – średnica reflektora płaskodennego [mm].

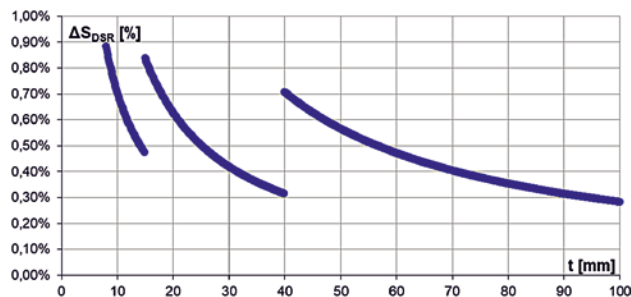
Procentowy ubytek przekroju [%]:

$$\Delta S_{DSR} = \frac{S_{DSR}}{S} \cdot 100 \quad (3)$$

gdzie:

S_{DSR} – pole powierzchni reflektora płaskodennego $[mm^2]$,
 S – pole powierzchni próbki poddawanej naprężeniom rozciągającym $[mm^2]$.

Przedstawiono wyznaczone wartości procentowego ubytku przekroju w funkcji grubości materiału (rys. 1) dla trzech przedziałów grubości $t = 8 \div 15$ mm, $t = 15 \div 40$ mm i $t = 40 \div 100$ mm zalecanych w normie PN-EN ISO 11666. W przedziałach tych poziom odniesienia badania wyznaczany jest odpowiednim reflektorem tarczowym o średnic 1,5; 2,0 oraz 3,0 mm.



Rys. 1. Procentowy ubytek przekroju w funkcji grubości materiału t
Fig. 1. Percentage loss in cross-section as a function of material thickness t

Rzeczywiste pole przekroju poddawane naprężeniom rozciągającym $[mm^2]$:

$$S_{rz} = S - S_{DSR} \quad (4)$$

gdzie:

S – całkowite pole powierzchni próbki poddawanej naprężeniom rozciągającym $[mm^2]$,

S_{DSR} – pole powierzchni reflektora płaskodennego $[mm^2]$.

Rzeczywiste naprężenia rozciągające σ_{rz} [MPa]:

$$\sigma_{rz} = \bar{\sigma} \cdot \frac{S_{rz}}{S} \quad (5)$$

gdzie:

$\bar{\sigma}$ – średnia wartość naprężeń rozciągających przyjęta dla stali S355 na podstawie normy PN-EN 10025 [4] = 550 [MPa],

S_{rz} – rzeczywiste pole przekroju poddawane naprężeniom rozciągającym $[mm^2]$,

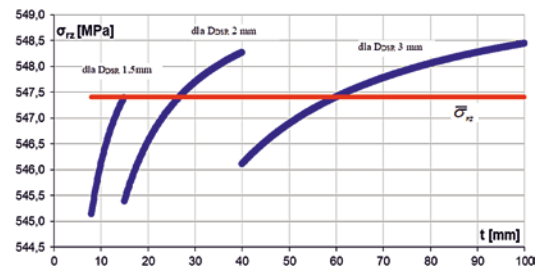
S – całkowite pole powierzchni próbki poddawanej naprężeniom rozciągającym $[mm^2]$.

Średnia wartość naprężeń rozciągających σ_{rz} wyznaczona dla zakresu grubości od 8 do 100 mm wg zależności [MPa]:

$$\bar{\sigma}_{rz} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{rz_i}}{n} \quad (6)$$

gdzie: n – liczba danych σ_{rz} w zbiorze

Przedstawiona na rys. 2 zależność rzeczywistych naprężeń rozciągających i naprężeń uśrednionych w funkcji grubości materiału określona została dla trzech przedziałów odpowiednio dla $t = 8 \div 15$ [mm], $t = 15 \div 40$ [mm] oraz $t = 40 \div 100$ mm.



Rys. 2. Naprężenia rozciągające σ_{rz} w funkcji grubości materiału t oraz średnia wartość

Fig. 2. Tensile stress σ_{rz} as a function of material thickness t and average value

Pole przekroju rzeczywistego reflektora płaskodennego $[mm^2]$:

$$S'_{DSR} = S - S \cdot \frac{\bar{\sigma}_{rz}}{\sigma_{rz}} \quad (7)$$

gdzie:

S – całkowite pole powierzchni próbki poddawanej naprężeniom rozciągającym $[mm^2]$,

$\bar{\sigma}_{rz}$ – średnia wartość naprężeń rozciągających [MPa].

σ_{rz} – rzeczywiste naprężenia rozciągające [MPa].

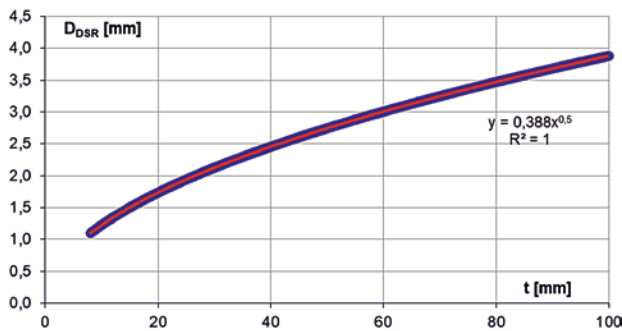
Średnica rzeczywistego reflektora płaskodennego [mm]:

$$D'_{DSR} = 2 \cdot \sqrt{\frac{S'_{DSR}}{\pi}} \quad (8)$$

gdzie:

S_{DSR} – pole powierzchni reflektora płaskodennego $[mm^2]$.

Zbiór danych wyznaczonych średnic rzeczywistych reflektora płaskodennego w funkcji grubości materiału przedstawiono na rys.3.



Rys. 3. Zależność rzeczywistego płaskodennego reflektora tarczowego w funkcji grubości materiału

Fig. 3. Dependence of the real flat-bottomed disc reflector as a function of material thickness

Po przeprowadzeniu analizy regresji na zbiorze danych wyznaczonych średnic rzeczywistych reflektora płaskodennego D'_{DSR} w funkcji grubości materiału uzyskano równanie w postaci:

$$y = 0,388 \cdot t^{0,5} \quad (9)$$

Postać tego równania została wyznaczona z najwyższym współczynnikiem regresji $R^2 = 1$.

Po zaokrągleniu uzyskanej zależności otrzymujemy równanie, dzięki któremu możemy łatwo wyznaczyć średnicę dowolnego reflektora tarczowego D_{DSR} [mm] w zależności od grubości t badanego materiału.

$$D_{DSR} = 0,4 \cdot \sqrt{t} \quad (10)$$

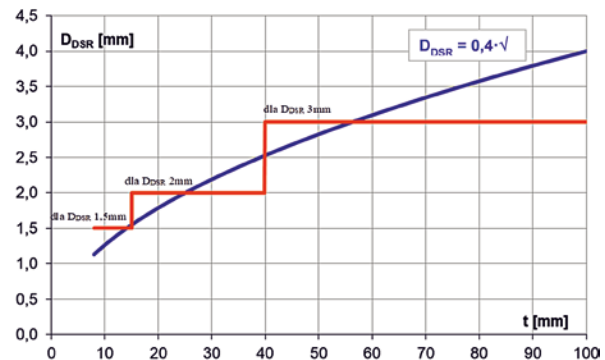
gdzie:

t – grubość materiału [mm].

W drugim etapie analizy w celu określenia wpływu na dokładności oceny niezgodności w realizowanych badaniach ultradźwiękowych zestawiono wyznaczone poziomy odniesienia wg reflektorów tarczowych zalecanych zgodnie z normą PN-EN ISO 17640 i wyznaczonego w pierwszej części analizy rzeczywistego reflektora jako ciągłej funkcji grubości materiału. Powyższe zależności przedstawiono na rys.5.

Przedstawione na wykresie rys.5 zależności reflektorów tarczowych o przebiegu skokowym wg normy PN-EN ISO 17640 i ciągłym wyznaczonym w prezentowanej analizie w funkcji grubości materiału wykazują zróżnicowane czułości w różnych obszarach grubości materiału. W tym:

- Zbieżne wyniki czułości obu reflektorów tarczowych dla grubości:
 - $t = 15$ mm dla $D_{DSR} 1,5$ mm;
 - $t = 25$ mm dla $D_{DSR} 2,0$ mm;
 - $t = 55$ mm dla $D_{DSR} 3,0$ mm;
- Obniżoną czułość reflektorów tarczowych skokowych w przedziałach dla grubości:
 - $8 \leq t < 15$ mm dla $D_{DSR} 1,5$ mm;
 - $15 \leq t < 25$ mm dla $D_{DSR} 2,0$ mm;
 - $40 \leq t < 55$ mm dla $D_{DSR} 3,0$ mm;
- Podwyższoną czułość reflektorów tarczowych skokowych w przedziałach dla grubości:
 - $25 \leq t < 40$ mm dla $D_{DSR} 2,0$ mm;
 - $55 \leq t < 100$ mm dla $D_{DSR} 3,0$ mm.



Rys. 4. Poziomy odniesienia wyznaczone wg reflektorów tarczowych zgodnie z PN-EN ISO 17640 i wyznaczonego

rzeczywistego reflektora jako ciągłej funkcji grubości materiału
Fig. 4. Reference levels determined according to disc reflectors in accordance with PN-EN ISO 17640 and the determined actual reflector as a continuous function of material thickness

Obniżenie czułości reflektorów tarczowych skokowych występujące w trzech obszarach wynosi od 17 do 27% w stosunku do wyznaczonego reflektora tarczowego ciągłego, natomiast podwyższenie czułości stwierdzone w dwóch obszarach grubości wynosi od 25 do 33%.

4. Podsumowanie

Wyznaczenie reflektora odniesienia w funkcji grubości materiału oraz porównanie jego czułości względem przyjętych w normie PN-EN ISO 17640 reflektorów o zależności skokowej wykazało istotny wpływ na dokładność oceny w badaniach ultradźwiękowych złączy spawanych. Stwierdzona obniżona czułość reflektora odniesienia w przedziale małej grubości 8 – 25 mm jest niepokojąca i ma bezpośredni wpływ na obniżenie dokładności w ocenie. W zakresie dużych grubości natomiast, szczególnie w przedziale 55 – 100 mm, wzrost czułości reflektora odniesienia podwyższa dokładność w ocenie, co można uznać za nieuzasadnione. Największe zmiany czułości badania występują w otoczeniu grubości 15 mm i 40 mm i są bezpośrednio związane ze skokową zmianą reflektora odniesienia. Charakterystyka zmian czułości reflektora odniesienia ma bezpośredni wpływ na dokładność oceny z uwagi na ściśle powiązanie między poziomem odniesienia wyznaczonym na podstawie reflektora odniesienia, a poziomami akceptacji stosowanymi w ocenie badanych złączy spawanych wg PN-EN ISO 11666.

5. Literatura/References

- [1] PN-EN ISO 17640:2019-01; Badania nieniszczące spoin - Badania ultradźwiękowe - Techniki, poziomy badania i ocena.
- [2] PN-EN ISO 11666:2018-04; Badania nieniszczące spoin - Badania ultradźwiękowe - Poziomy akceptacji.
- [3] PN-EN ISO 4136:2013-05; Badania niszczące złączy spawanych metali - Próba rozciągania próbek poprzecznych.
- [4] PN-EN 10025-1:2007; Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych - Część 1: Ogólne warunki techniczne dostawy.
- [5] Krawczyk R., Luto M., Wojtas P.: „Analiza dokładności oceny niezgodności spawalniczych wykrywanych w badaniach ultradźwiękowych”, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach, Vol. 54, nr 3/2010, s. 40÷45.

Pavel Mazal^{1*}, Houssam Mahmoud¹, František Vlačić¹

Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Czech Republic

Diagnostyka działania siłowników pneumatycznych z wykorzystaniem Emisji Akustycznej

Diagnostics of the function of pneumatic actuators using acoustic emission

ABSTRACT

This paper focuses on finding the diagnostic criteria that evaluate the pneumatic cylinder and detect the defects. Several undamaged cylinders were tested by acoustic emission before artificial defects were created in each one. The signals from the progress and retreat strokes were recorded and analysed into many parameters. The differences were identified by comparing the max root mean square from sensor A and the max root mean square from sensor B for one cycle in the retreat stroke. The damaged and undamaged cylinders were distinguished using the difference in energy values present in the signals of the two sensors in the retreat stroke. This paper is a continuation of a prior article and the extension of my work.

Keywords: *Pneumatic cylinders, Defects, Leakage, Acoustic Emission, Root Mean Square*

STRESZCZENIE

Przedstawiona w opracowaniu analiza miała na celu określenie dokładności w systemie oceny stosowanym przy badaniu złączy spawanych metodą ultradźwiękową z zastosowaniem techniki DGS. Podjęto próbę wyznaczenia reflektora odniesienia DDSR jako funkcji grubości badanego materiału. Wyznaczony reflektor pozwolił na ocenę czułości reflektorów odniesienia przyjętych wg normy PN-EN ISO 17640.

Słowa kluczowe: *badania ultradźwiękowe; technika DGS; czułość badania; dokładność oceny; złącza spawane*

1. Introduction

Pneumatic actuators convert fluid energy into straight-line motion (linear actuators). During normal operation of a pneumatic actuator, a variety of defects can occur, which could lead to a catastrophic failure if left undetected [1]. Therefore, it is crucial to detect even the minor problems and their sources as quickly and accurately as possible to ensure an uninterrupted safe operation [2]. The possible types of defects are sorted according to the construction of the cylinder and the value of the detection coefficient "D" and severity coefficient "S", with "S1" for a single defect with no consequences, and "S2" reflecting the worst possible consequences; both are derived from the FMEA method according to these coefficients defect of cylinder were chosen [3].

Acoustic emission is the transient elastic stress waves generated by the energy released when the escaping gas or liquid through a small breach creates a high frequency sound wave that travels through the cylinder [4]. The frequency spectrum changes over time depending on the type of damage and the number of completed cycles. The figure 1 shows the signal frequency of undamaged cylinder and the artificial mechanical damaged cylinder "Loosening 4 screws under the piston". After undamaged pneumatic cylinders were tested by AE, artificial defects were made on the same cylinders. The results were compared to find distinctive differences between the damaged and undamaged cylinders. A set of defects was identified through this comparison, but the frequency spectrum, counts and events

were not sufficient to identify all defects. The frequency spectrum was replaced later by the AERms during the monitoring of changes in the test results [5].

For the AE signal, the most frequently used AE parameters are the AERms and the average signal level (ASL) [6]. AERms can be defined as:

$$AE_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v^2(n)} \quad (1)$$

Where v is the voltage of the signal from an AE sensor, t is the initial time, T is the integration time of the signal, and N is the number of discrete AE data within the interval T .

$$E = \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) dt = \sum_{n=1}^N v^2(n) \quad (2)$$

Where v is the voltage of the signal from an AE sensor, t is the initial time, T is the integration time of the signal, and N is the number of discrete AE data within the interval T .

V. Augutis, M. Saunoris studied pneumatic cylinders by AE. During the lifetime service of the pneumatic cylinder, the housing wears down due to the piston repeated movement. This causes the leak between the piston and the pneumatic cylinder housing. The leak causes higher intensity of the HFV (High Frequency Voltage) in the cylinder. The basic parameters, that used in this work are root mean square value, the envelope of the root mean square values and the power spectrum density. The influence of the friction is approximately 10 times bigger than the influence of the leak between the piston and the pneumatic cylinder [7].

*Autor korespondencyjny. E-mail: qmmazal@vutbr.cz

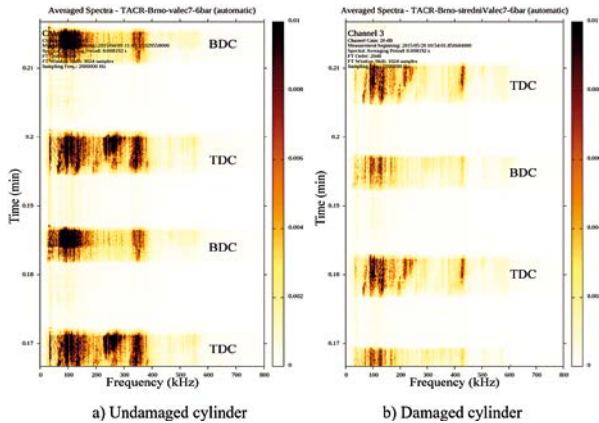


Fig. 1. Differences between damaged and undamaged cylinder by frequency spectrum.

Rys. 1. Różnice między uszkodzonym i nieuszkodzonym cylindrem według widma częstotliwości.

In our research, the measurements by ATEQ F620 leak tester on the undamaged cylinder showed that the value of the leak at a pressure below the piston (progress stroke), and the value of the leak at a pressure above the piston (retreat stroke) change slightly and sometime do not change after 101500 cycles [8].

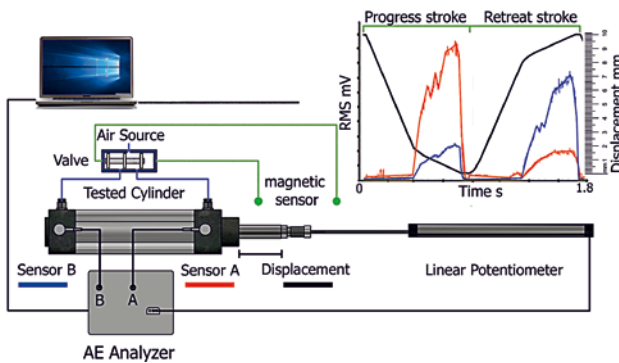


Fig. 2. Assembly of experimental equipment.
Rys. 2. Montaż układu doświadczalnego.

2. Experiment

The experiment took place in a specialized laboratory at Brno University of Technology. The experiment platform contains testing devices including tested cylinders PS ISO Piston diameter (40mm), piston stroke (100 mm), thread (M12x1.25), air pressure supply (6 bar), pneumatic control system, linear potentiometer, working range of potentiometer is (0-200 mm), global measurement period is (156.25 Hz). Two magnetic sensors were positioned at the piston track to define the start and the end of the stroke by controlling the beginning of progress and retreat strokes. The distance between them is (100 mm) and the AE monitoring system with the analyser DAKEL-ZEDO with two channels. Global measurement period of AE parameters (AERms, Energy) (sampling) is 250 Hz (0.004 s). To reducing the noise using sensor with integrated low-noise preamplifier IDK-14 built-in preamplifier (34 dB) frequency range [20-400 kHz]. Using a high dynamic range measuring apparatus [24 kHz – 2700 kHz] and resolution is (16 bits) time resolution is (1ns). Frequency bandwidth was limited by digital filters: High-pass filter (50 kHz) and Low-pass filter (400 kHz). Digital Filter: (HP: 15-2500 kHz + LP: 25-2500 kHz) software switchable. Two

sensors were installed at the cylinder and were referred to as (A) on the head cap and (B) on the rear cap as shown in figure 2.

The sound waves travel from the surface of the cylinder to the sensors; sensors convert these waves to voltages after that to the preamplifier then the analyser. The analyser converts the signals from analogue to digital signals after that to the software to many parameters as RMS, ASL and Counts etc. the magnetic sensors is responsible for the changing of progress and retreat stroke by a digital signal to the valve when the piston arrives near the sensors.

3. Types of cylinders

Three types of cylinders were tested - PS, PB and RD (producer Polices strojirny a.s.) [9].

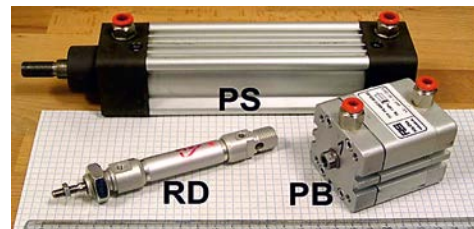


Fig. 3. Types of tested pneumatic cylinders.
Rys. 3. Rodzaje badanych cylindrów pneumatycznych.

4. Results

The signals were obtained by two AE sensors, one of them is fixed on head cap (A) and the other on the rear cap (B). In addition, a potentiometer was used to obtain a signal that represents the displacement of the piston. While digital signals were obtained from two magnetic sensors, which determine the start and end positions of the piston in retreat and progress strokes.

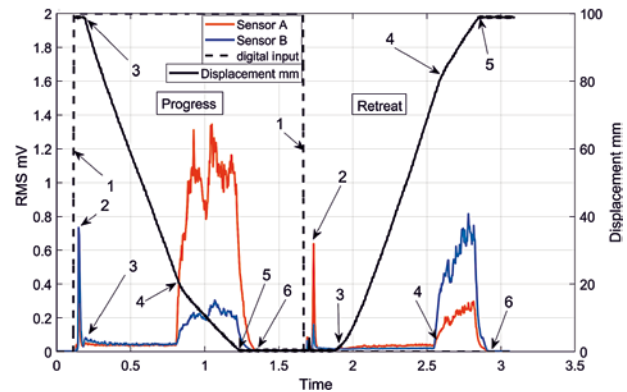


Fig. 4. The relationship between AERms and piston displacement during the time for undamaged cylinder.

Rys. 4. Zależność między AERms a przesunięciem tłoka w czasie dla nieuszkodzonego cylindra.

(1) the valve is opened by the digital input to let the air pass through the port, (2) the impact of the air at the cushion piston, (3) the initiation of movement, (4) the initiation of the damping phase 21.7mm before the TDC, (5) when the cushion piston impacts the cushion cap, and stops, (6) the end of venting air and relaxing and the end of the stroke.

The ratio between maximum AERms from sensor B and the maximum AERms from sensor A in the retreat stroke, determines whether the cylinder is damaged or undamaged.

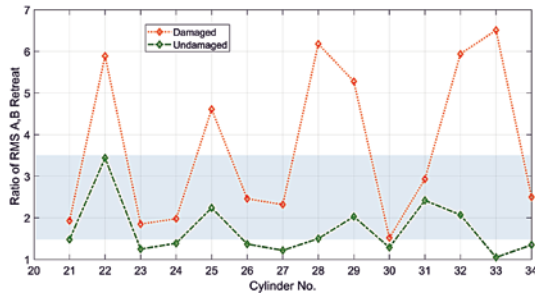


Fig. 5. Comparing between damaged and undamaged cylinders according to the ratio of AErms values.

Rys. 5. Porównywanie uszkodzonych i nieuszkodzonych cylindrów na podstawie wartości AErms.

The high values of AErms ratio indicate that the cylinder is damaged, while the low values indicate that the cylinder is undamaged. However, there is a range of uncertainty lies between them, the range of values that do not give a direct indication to whether the cylinder is damaged or undamaged. In this case, a new criterion should be considered.

The first criterion is the difference between curve B and curve A of the signal's energy in the retreat stroke for one cycle, which is given by the following equation:

$$E_{B-A} = \sum U_{retreat\ B}[i]^2 \cdot dT - \sum U_{retreat\ A}[i]^2 \cdot dT \quad (3)$$

Where dT is the value of sampling (in our case 0.004 s), the area between curve A and curve B demonstrates the value of energy.

The value of energy is in inverse proportion to the quality of the cylinder. When $E_{B-A} > 0.5 \cdot 10^{-7} V^2 \cdot s \cdot \text{Ohm}$ the cylinder is damaged, and when $E_{B-A} < 0.2 \cdot 10^{-7} V^2 \cdot s \cdot \text{Ohm}$ it is undamaged. The cylinders between $0.2 \cdot 10^{-7}$ and $0.5 \cdot 10^{-7} V^2 \cdot s \cdot \text{Ohm}$ are in the uncertainty range. As undamaged cylinders No. 22, 29 and damaged cylinders No. 30, 34 are between the range $0.2 \cdot 10^{-7}$ and $0.5 \cdot 10^{-7} V^2 \cdot s \cdot \text{Ohm}$.

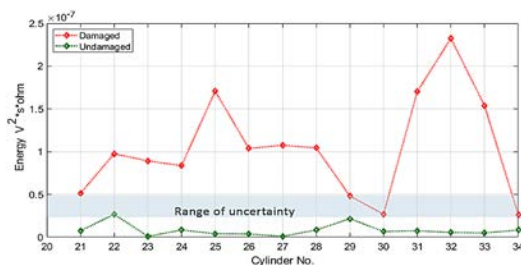


Fig. 6. Comparing between damaged and undamaged cylinders according to the energy values.

Rys. 6. Porównywanie uszkodzonych i nieuszkodzonych cylindrów na podstawie wartości energii.

5. Conclusion

The frequency spectrum, counts and events were not sufficient to identify all defects. The frequency spectrum was replaced later by the AErms during the monitoring of changes in the test results. The last group of measurements discusses the two types of leakage that are difficult to detect by conventional methods and previous study. The determination of diagnostic criteria that evaluate the pneumatic cylinder PS and determine whether the cylinder is damaged or undamaged. There are four criteria to evaluate the cylinder respectively:

- The AErms was normalized; the defect in the cylinder causes a delay in the stroke time, which causes an extension in the damping area. This delay distinguishes between undamaged and damaged cylinder.
- The specific ratio between maximum AErms from the sensor A fixed in the head cap of and the max AErms from the sensor fixed in the rear cap B of the cylinder in the retreat stroke can identify whether the cylinder is damaged or undamaged. When the ratio is bigger than 3.5 the cylinder is damaged if the ratio is smaller than 1.5 the cylinder is undamaged.
- The damaged and undamaged cylinders were distinguished using the difference in energy values present in the signals from the two sensors in the retreat stroke. at signal energy $E_{B-A} > 0.5 \cdot 10^{-7} V^2 \cdot s \cdot \text{Ohm}$ the cylinder is damaged, and at $E_{B-A} < 0.2 \cdot 10^{-7} V^2 \cdot s \cdot \text{Ohm}$ it is undamaged.

These criteria will be applied to other types of cylinders. Moreover, new criteria will be applied to other types of defects that will improve the mobile diagnostic tool using AE methods.

The Acoustic emission can be applied to detect and locate leaks as long as there is enough pressure fluid acting across the leak.

6. Acknowledgment

This work is an output of research and scientific activities was supported by the Technology Agency of the Czech Republic project No. TH03010422 "Mobile devices for detecting defects in pneumatic systems". In addition, the project FSI-S-17-4428 of the Faculty of Mechanical Engineering BUT in Brno.

7. References/Literatura

- [1] British Compressed Air Society; British-Pneumatic-Handbook, pp 1-10, <https://ar.scribd.com/document/253225887/British-Pneumatic-Handbook>.
- [2] A. Anastasopoulos, D. Kourousis, S. Botten and G. Wan, „Acoustic emission monitoring for detecting structural defects in vessels and offshore structures”, Ships and Offshore Structures, pp 363-372
- [3] H. Mahmoud, F. Vlašić, P. Mazal, M. Jána, „Damage Identification of Pneumatic Components by Acoustic Emission”. In 32nd European Conference on Acoustic Emission Testing, Brno: VUTUM Brno, pp 315-322. 2016.
- [4] Z. Nazarchuk, V. Skalskyi, O. Serhiyenko, „Acoustic Emission Methodology and Application”, Springer International Publishing, DOI 10.1007/978-3-319-49350-3, 2017.
- [5] H. Mahmoud, F. Vlašić, P. Mazal, M. Jána, „Leakage Analysis of Pneumatic Cylinders Using Acoustic Emission”. INSIGHT, Vol 59, No 9, pp 500-505. ISSN: 1354-2575, 2017.
- [6] W. Kaewwaewnoi, A. Prateepasen, P. Kaewtrakulpong, „Measurement of Valve Leakage Rate using Acoustic Emission”, Proc. of the Int. Conf. on Electrical Engineering/Electronics, (ECTI '05), pp 597-600, 2005.
- [7] V. Augutis, M. Saunoris, „Investigation of high frequency vibrations of pneumatic cylinders”, Department of Electronics and Measurements Systems Kaunas University of Technology, ISSN 1392-2114 ULTRAGARSAS, Nr.2(51). 2004.
- [8] H. Mahmoud, „Diagnosis of Pneumatic Cylinders Using Acoustic Emission Methods”. Brno, 2018, PhD thesis. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering.
- [9] M. Jána, „Defects of linear pneumatic actuator PS”. TA04011374 - A new non-destructive diagnostics system of pneumatic and hydraulic components. Enterprise standard Polička 5. 5. 2015.

Adam Wocial*

BTW Instytut Gamma Sp. z o.o., Dębe Wielkie

Badania prądami wirowymi połączeń spawanych – wpływ doboru warunków i parametrów badania na czułość i wiarygodność metody – przykłady zastosowań

Eddy current tests of welded joints - the impact of selection of test conditions and parameters on the sensitivity and reliability of the method - examples of applications

ABSTRACT

The article presents a practical approach in the application of the eddy current method in cases outside the scope and recommendations of EN/ISO 17643: 2015 [1] regarding the testing of eddy currents of welded joints. This standard does not explicitly limit the scope of application to specific materials and welding methods, but gives e.g. recommendations regarding calibration standards, probe construction and test parameters. Such a situation may cause misunderstanding and a number of wrong decisions affecting the result of the examination. The article gives several examples of eddy current testing of welded joints where a completely new approach was required that went far beyond the aforementioned standard, e.g. testing of aluminum welds, duplex steel, metallic coatings, and electron beam welding.

Keywords: eddy current welds examination, eddy current array, duplex stainless steel, metalized metallic cladding layer, electrical conductivity, SCC stress corrosion cracking, and electron beam welding

STRESZCZENIE

W artykule zaprezentowane jest praktyczne podejście w zastosowaniu metody prądów wirowych w przypadkach wykraczających poza zakres i zalecenia normy EN ISO 17643: 2015[1] dotyczącej badania prądami wirowymi połączeń spawanych. Norma ta nie ogranicza wyraźnie zakresu stosowania do konkretnych materiałów i metod spawania, natomiast podaje np. zalecenia dotyczące wzorców kalibracyjnych, budowy sond i parametrów badania. Sytuacja taka może powodować niezrozumienie i szereg błędnych decyzji wpływających na wynik badania. W artykule podano kilka przykładów badania prądami wirowymi połączeń spawanych, gdzie wymagane było zupełnie nowe podejście wykraczające daleko poza wspomnianą normę jak np. badanie spoin stali duplex, aluminium, badania poprzez powłoki metaliczne czy np. spawanie wiązką elektronów.

Słowa kluczowe: prądy wirowe, badania prądami wirowymi sondami mozaikowymi, połączenia spawane wiązką elektronów, duplex, inconel, warstwy napawane, metaliczne powłoki ochronne, pęknięcia korozji naprężeniowej

1. Wstęp

Metoda badania prądami wirowymi jest już obecnie uznana w pełni i powszechnie stosowaną jedną z kilku tzw. powierzchniowych metod kontroli nieniszczącej.

Wzrost zastosowania tej metody w badaniach nieniszczących oraz jednoczesny rozwój innych metod elektromagnetycznych obok zaawansowanej techniki ultradźwiękowej Phased Array i TOFD jest największy spośród wszystkich metod NDT. Ciągły postęp techniczny wymuszany przez bardzo wysokie wymagania techniczne, wprowadzanie nowych materiałów konstrukcyjnych i technologii łączenia materiałów w połączeniu z wysokimi wymaganiami jakościowymi i niezawodności wymusza postęp również w badaniach NDT. Metoda prądów wirowych rozpoczęła swoją drogę wchodzenia w zakres usług głównie w przemyśle lotniczym, lecz dzisiaj jest już powszechna w każdej

dziedzinie przemysłu jak stalowy, samochodowy, energetyczny, naftowy i w tym oczywiście off-shore.

Norma EN/ISO 17643 w swej zawartości określa jedynie podstawowe zasady wymagane podczas badania metodą prądów wirowych połączeń spawanych. Badania te skierowane są głównie do kilku tradycyjnych metod spawania: elektryczne elektrodą otuloną, MIG/MAG, TIG oraz spawanie pod topnikiem, gdzie występuje klasyczny przekrój spoiny, kształt lica spoiny doczołowej lub pachwinowej oraz charakterystyczna strefa wpływu ciepła. Jeśli chodzi o materiały spawane to są to głównie stale ferrytyczne niskowęglowe oraz austenityczne wysokostopowe. Praktyka przemysłowa stawia natomiast nowe wyzwania poprzez rozszerzenie badań na połączenia spawane materiałów ferrytycznych, lecz o bardziej skomplikowanej mikrostrukturze jak np. duplex, inconel oraz stopy metali kolorowych i spoiny materiałów różnorodnych oraz coraz bardziej powszechne powłoki metaliczne np. nanoszone plazmowo. Również badania

*Autor korespondencyjny. E-mail: adamwoc@pro.onet.pl

prądami wirowymi są coraz częściej stosowane do metody spawania jak elektronowe, laserowe czy tarciove (FSW)

W związku z opisanymi zmianami rodzą się zatem wątpliwości, jak dobrać parametry i całą technikę badania, jak ustalać kryteria akceptacji i czy w ogóle można powoływać się na wspomnianą na początku normę w dokumentacji wykonawczej i raportach z badania. W takich wypadkach o ustalenia warunków badania i odbioru należy zasięgać opinii specjalistów posiadających doświadczenie i kwalifikacje 3 stopnia, szczególnie w metodzie prądów wirowych.

Dokumentem opisującym takie szczególne sytuacje powinna być procedura dla metody prądów wirowych, nieuniwersalna w oparciu o normę EN/ISO 17643, lecz opracowana dla konkretnego przypadku.

2. Podstawowe parametry i wielkości badania

Generowanie prądów wirowych zależy od pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez cewkę wzbudzącą oraz od właściwości elektromagnetycznych materiału poddanego badaniu. Materiał badany cechują pod tym względem głównie: konduktywność oznaczana symbolem σ (Sigma), dla której podstawową jednostką jest S/m (Simens/metr) oraz przenikalność magnetyczna μ , dla której jednostką jest H/m (Henr/metr). Zależą one od składu chemicznego, kompozycji tych składników, technologii spawania, przeróbki plastycznej, naprężeń i temperatury. Następnym znającymi tych parametrów jest konstrukcja sond badawczych (parametry: indukcyjność $L(\mu H)$, wymiar cewki $D(mm)$, konfiguracja cewek, częstotliwość $f(Hz)$, wzbudzenie (V) i wzmocnienie $G(dB)$ w taki sposób, by spełnić wymagania dotyczące czułości badania i otrzymać wiarygodne wyniki.

Na podstawie tych danych oblicza się najważniejszą wielkość podczas badania prądami wirowymi, czyli SDP - Standardową Głębokość Wnikania prądów wirowych oraz Efektywną Głębokość Wnikania prądów wirowych - EDP (Tablica 1). W rzeczywistości problem jest jednak bardziej skomplikowany, jeśli mamy do czynienia z mikrostrukturami mieszanymi pod względem cech elektromagnetycznych. W takich przypadkach wszelkie procedury specjalne powinny zostać zweryfikowane poprzez testy, czy pewien proces walidacji, za pomocą wzorców kalibracyjnych odzwierciedlających specyficzne warunki badania.

Tab. 1. Wartości konduktywności i przenikalności magnetycznej oraz Standardowa i Efektywna Głębokość Wnikania prądów wirowych dla podstawowych metali.

Tab. 1. Conductivity and magnetic permeability values as well as Standard Depth of Penetration for Eddy Current for few common metals.

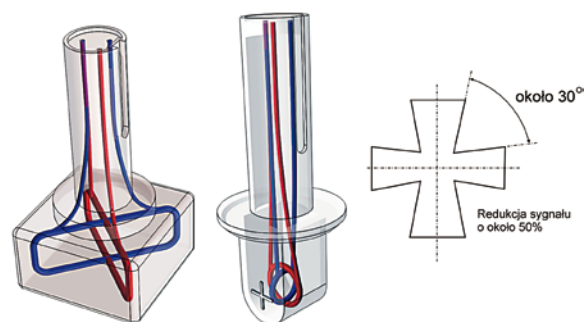
Lp.	Materiał	σ	μ	$f=20kHz$		$f=100 kHz$		$f=1 MHz$	
		%IACS	Henr/metr	SDP	EDP	SDP	EDP	SDP	EDP
1	Stal nisko-węglowa	10-18	800		1,00*		0,50*		0,20*
2	Stal 18-8	2,5-2,9	1,003	3,02	9,06	1,35	4,05	0,43	1,29
3	Duplex 2205	20	2700-20000		>0,1*		>0,1*		>0,1*
4	Inconel 625	1,2		3,1*	9,4*	1,4*	4,2*	0,4*	1,3*
5	Aluminium 2024	46-49	0,00002	0,58	1,74	0,26	0,78	0,08	0,24
6	Nikiel	10-18	0,0007		2,7*		1,2*		0,3*
7	Tytan	1,2	1	3,15	9,45	1,41	4,23	0,45	1,35

* - wielkość orientacyjna

3. Budowa sond do badania połączeń spawanych oraz wymagania aparaturowe

Właściwy dobór sondy często specjalnie zaprojektowanej i defektoskopu do prądów wirowych ma największy wpływ na czułość i dokładność wyników badania. Podczas badania metodą prądów wirowych występujące zjawiska, takie jak efekt oddalenia i krawędziowy oraz kłopotliwy wpływ zmian przenikalności magnetycznej są uznane za niepożądane. Sondy do badania połączeń spawanych są zbudowane najczęściej jako różnicowe lub refleksyjne. Stosuje się do nich określenie „Weldscan” lub „ $\oplus$ Point” (Rys. 1). Wymiary średnicy sondy wahają się w zakresie od 5 mm do 25mm i mają kształt owalny lub płaski. Pole elektromagnetyczne sondy posiada kształt krzyża i jest odpowiednikiem obszaru badanego.

Skaning takimi sondami jest jednak czasochłonny i wymaga dużego skupienia operatora. Pomimo wszystko badanie posiada szereg bardzo istotnych zalet nad badaniami metodą magnetyczno-proszkową i penetracyjną. Wymagania odnośnie defektoskopu zakładają jedynie, aby posiadał analizę fazową impedancji i podstawowy zakres częstotliwości pracy.



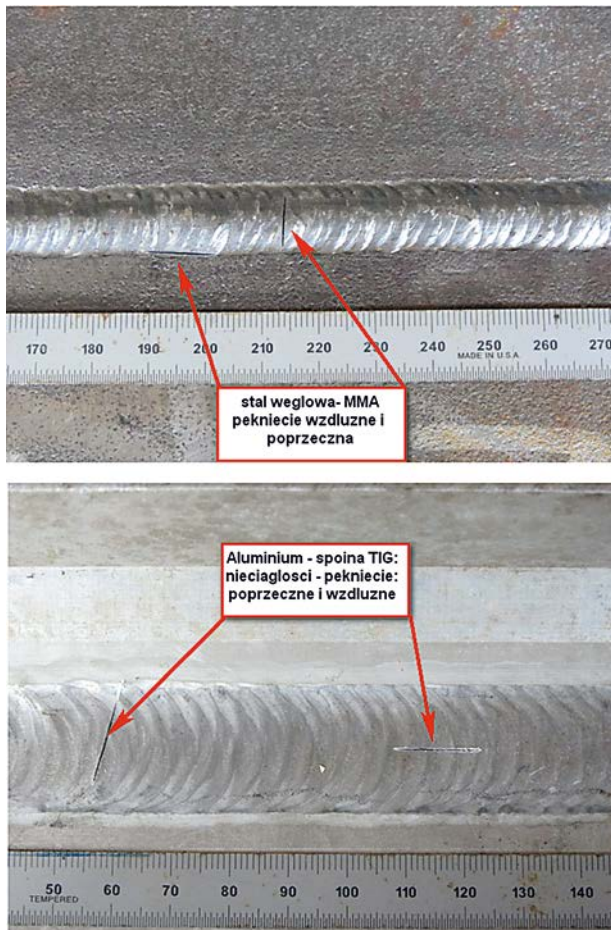
Rys. 1. Budowa klasycznych sond do badania połączeń spawanych, kształt strefy aktywnej.

Fig. 1. Construction of classic weldscan probes, shape of the active zone.

4. Identyfikacja materiału badanego i wpływ podstawowych parametrów badania

Norma EN/ISO-17643: 2015 generalnie obejmuje swym zakresem połączenia spawane wszystkich metali i ich stopy: ferromagnetyczne i nieferromagnetyczne. Podczas badania

prądami wirowymi połączeń spawanych jest dla nas bardzo ważne, jaki materiał będziemy badać, w jakim jest on stanie i jakie ma podstawowe parametry magnetyczne i elektryczne. Od tego zależy bowiem przebieg trajektorii sygnału, łatwość jego interpretacji i wykrywalność nieciągłości materiałowych. Badanie spoin związanych jest z wieloma cechami badanego materiału mającymi duży wpływ na właściwą interpretację: zmiany strukturalne, stopiwa, twardości, kształtu nadlewu i grani, grubości przy cienkich elementach.

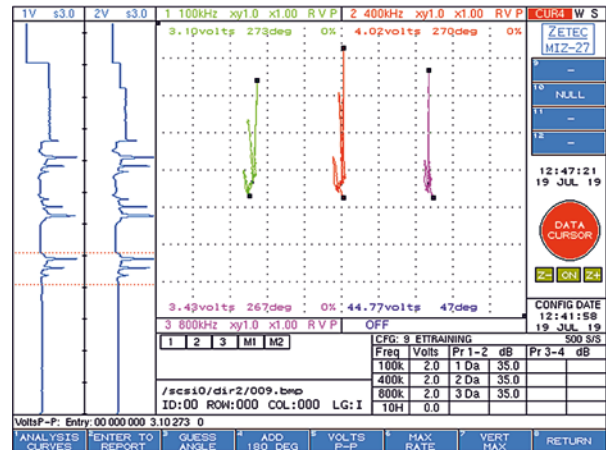


Rys. 2. Wzorzec kalibracyjny do prądów wirowych wykonany z fragmentu spoiny doczołowej dla stali węglowej oraz dla stopu aluminium. Spawanie metodą TIG.
Fig. 2. Calibration standard for Eddy current examination made of butt TIG welded fragment for carbon steel and aluminum alloy.

Jako wzorzec kalibracyjny norma zaleca płytkę obróbianą mechanicznie z 3 nacięciami o głębokości 0,5; 1,0 i 2,0 mm. Zastosowanie takiego wzorca wystarcza do podstawowej stali węglowej, lecz już w tym momencie mogą nastąpić niezgodności nie tylko z różnicami chropowatości, lecz bardziej ze zmianami przenikalności magnetycznej materiału rodzimego (próbki referencyjnej) z materiałem spoiny. Problem ten narasta znacznie w przypadku stali węglowych niskostopowych oraz wysokostopowych ferromagnetycznych, austenitycznych czy o mikrostrukturach mieszanych. Również sytuacja taka nie jest do końca obojętna np. dla stopów aluminium lub tytanu. Zalecane wzorce kalibracyjne do ET powinny być wykonane na próbkach z naturalnymi

spoinami, zarówno do stali węglowej, jak materiałów nieferromagnetycznych (Rys. 2).

Zakres zalecanej częstotliwości pracy sondy norma podaje od 1 kHz do 1 MHz. Producenci sond w tym przypadku proponują znacznie węższy zakres częstotliwości. Ma to swój wpływ na uzyskanie korzystnego stosunku S/N, czyli sygnału do szumów. W przypadku aluminium lepsze efekty daje stosowanie niższych częstotliwości aniżeli dla stali węglowych niskostopowych w celu zmniejszenia poziomu sygnałów od nierówności lica. (Rys. 3).



Rys. 3. Wskazania od wady 0,5 mm dla wzorca ze stopu Al i dla częstotliwości 100, 400 i 800 kHz z zakresu sondy typu „weldscan” zaprojektowanej na 100-800 kHz.

Fig. 3. 0,5 depth aluminum alloy defects indication for frequencies: 100, 400, and 800 kHz. Weldscan probe designed for 100-800 kHz range.

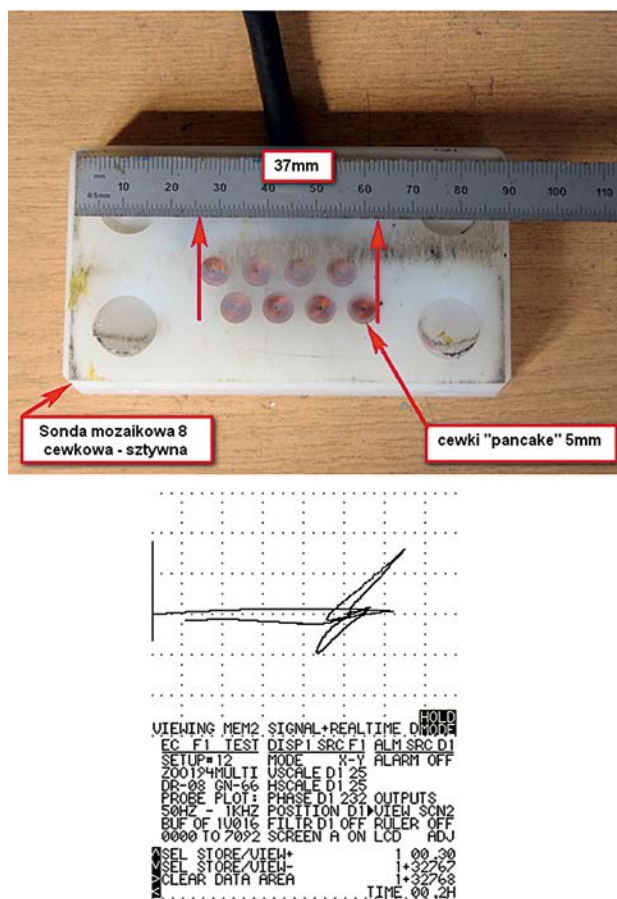
5. Badanie spoin i materiału rurociągów pod kątem występowania pęknięć korozji naprężeniowej

W latach 80. ubiegłego wieku w związku z powszechną budową gazociągów przesyłowych nasilił się problem pęknięć w wyniku korozji naprężeniowej. Zjawisko było to bardzo powszechne i szeroko omawiane na przykładzie rurociągów w Kanadzie i na Alasce. [2] Ponieważ warunki środowiskowe były bardzo ciężkie do prowadzenia badań powierzchniowych MT i PT opracowano specjalne sondy do prądów wirowych, współpracujące w oparciu o defektoskopy klasyczne pracujące z sondami typu „weldscan”. Miały one podstawową zaletę, że szerokość skanowania wynosiła 37 mm, a nie 12. (Rys. 4) Cewki w sondzie pracowały w układach różnicowych, lecz jako cewki płaskie typu „pancake”. Pomimo że cała sonda była sztywna, pozwalało to na skanowanie spoin, jak również materiału podstawowego rury. Warunki badania prądami wirowymi zostały ustalone i weszły w zakres wymagań opisanych w normie ASME B31.8 [4].

6. Badanie połączeń spawanych z powłokami ochronnymi metalicznymi: aluminium i cynkowymi

Często występującą sytuacją jest badanie spoin pokrytych warstwami ochronnymi przewodzącymi prąd elektryczny np. cynk, aluminium, ołów, nikiel, chrom, jak i nieprzewodzącymi prądu elektrycznego np. farby, tworzywa sztuczne,

gumy. Powłoki niekonduktywne nie stanowią większego problemu podczas badania spoin. Powodują jedynie nieznaczne osłabienie sygnału spowodowane efektem oddalenia. Powłoki ochronne przewodzące wymagają natomiast od personelu badającego znacznie większego doświadczenia i specjalistycznego przeszkolenia. Częściowo temat ten był omawiany wcześniej w artykule prezentowanym w Przeglądzie Spawalnictwa [4].



Rys. 4. Sonda mozaikowa 8 cewkowa sztywna oraz obraz sygnału od pęknięcia o głębokości 0,5 i 20 mm długości.

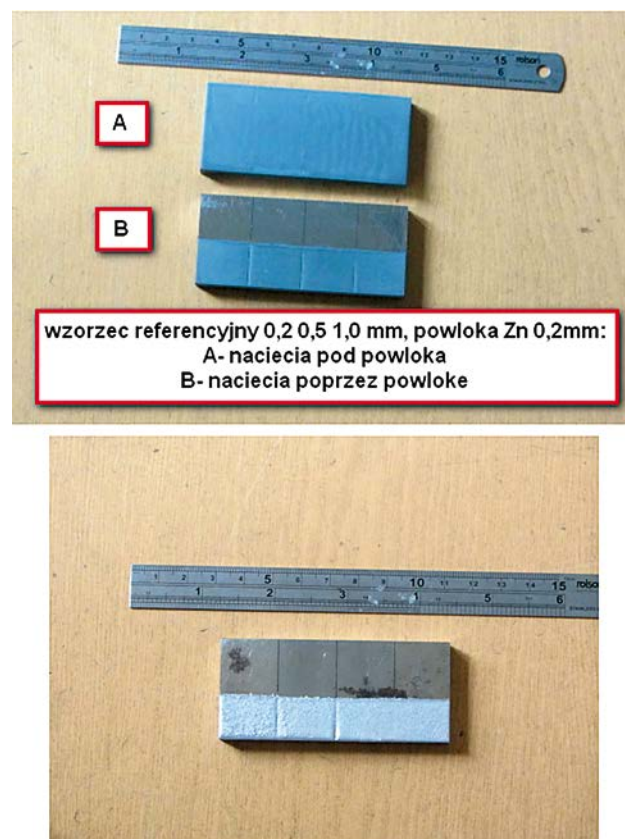
Fig. 4. Rigid 8 coil mosaic probe and image of crack signal 0,5 depth and 20 mm length.

Badanie połączeń spawanych z powłokami ochronnymi metalicznymi, zwłaszcza nanoszonymi na gorąco, np. plazmowo, wymaga przede wszystkim wzorców kalibracyjnych (Rys. 5) dokładnie odpowiadających występującej sytuacji pod względem materiałów badanych, technologii spawania oraz techniki nakładania powłok ochronnych. Kombinacja zmian przenikalności materiału podłoża i spoiny miesza się ze zmianami konduktywności nieferromagnetycznej warstwy wierzchniej.

Wartość SDP jest wynikiem przenikalności magnetycznej materiału podłoża i konduktywności powłoki ochronnej. Amplitudy sygnału dla pęknięć o różnych głębokościach nie mają już relacji liniowej, a dodatkowo przy stosowaniu niższych częstotliwości badania, te relacje bardzo się zmieniają z powodu dominującego wpływu zmian przenikalności magnetycznej podłoża.

Charakterystycznym zjawiskiem jest zmniejszenie

amplitudy sygnału w stosunku do wad płytszych. Amplituda od pęknięcia o głębokości 1,0 mm nie jest 2 razy większa od amplitudy o głębokości 0,5mm, co może spowodować istotne błędy podczas ustawiania czułości badania. (Rys. 6) Dobór parametrów badania ma bardzo istotny wpływ na odseparowanie sygnału wady od sygnałów zmian strukturalnych oraz geometrycznych spoiny i powłoki. Badanie prądami wirowymi w tym wypadku wymaga większego doświadczenia i kwalifikacji personelu. Do badania konieczne są próbki odniesienia z identycznym układem geometrycznym i strukturalnym połączenia spawanego. Możliwa wówczas oprócz wykrywania pęknięć w spoinach jest ocena stanu technicznego i wykrywanie mikropęknięć w samej powłoce.



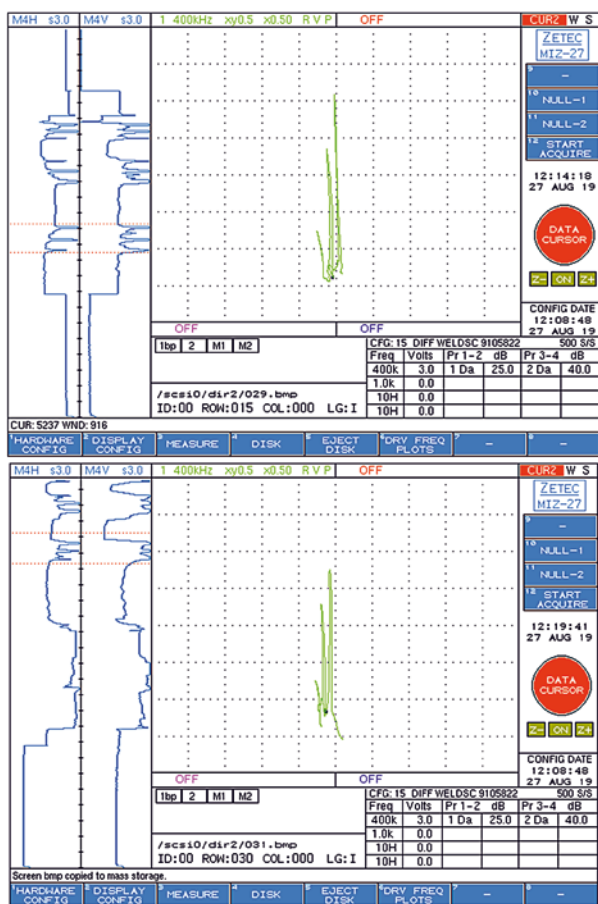
Rys. 5. Wzorce kalibracyjne z powłoką metaliczną cynkową: nałożoną na wcześniejsze nacięcia (pęknięcia pod warstwą ochronną) i nacięcia przebiegające poprzez powłokę cynkową oraz wzorzec ze stali niskowęglowej z powłoką aluminiową.

Fig. 5. Calibration standards with metallic zinc coating: applied to earlier cuts (cracks under protective layer) and cuts through the zinc coating and a low carbon steel pattern with aluminum coating.

7. Badanie prądami wirowymi połączeń spawanych ze stali duplex 2205

Norma EN/ISO 17643, jak wspomniano, odnosi się praktycznie do stali węglowych i niektórych nierdzewnych, niestety nie wspominając o zagrożeniach podczas badania innych wysokostopowych materiałów. Sytuacja się jednak komplikuje, gdy mamy do czynienia ze stalami o strukturze mieszanej ferrytycznej i austenitycznej jak np. duplex oraz inconel. Duplex posiada niemagnetyczną fazę sigma oraz

austenit. Faza ferrytu jest z kolei magnetyczna. Przekłada się ta mieszanka faz na mieszankę zmian przenikalności magnetycznej, która powoduje bardzo wyraźne zmiany impedancji obserwowanej na defektoskopie prądów wirowych. Zastosowanie sond typu weldscan, pomimo że pracują one w trybie różnicowym nie dają w tym przypadku dobrych rezultatów. Posłużono się zatem techniką z nasyceniem magnetycznym i sondami mozaikowymi przy odpowiednio zastosowanej znacznie niższej częstotliwości badania. (Rys. 8)

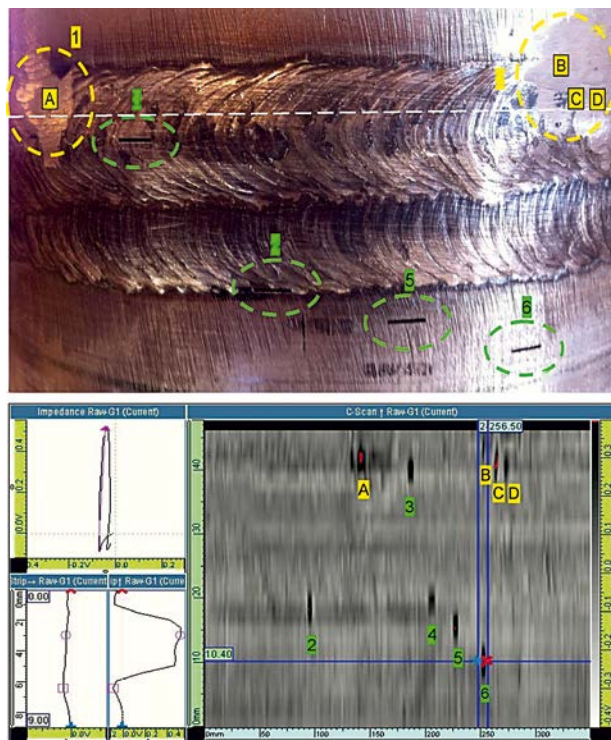


Rys. 6. Defektoskop Zetec MIZ-27SI - trajektorie wskazań od wad 0,2; 0,5 i 1,0 w spoinie z powłokami o grubości 200 μ m: cynkową i aluminium.

Fig. 6. Zetec MIZ 27-SI flaw detector – indicative trajectories from 0,2; 0,5 and 1,0 mm depth in the weld with 200 μ m thick coatings: zinc and aluminum.

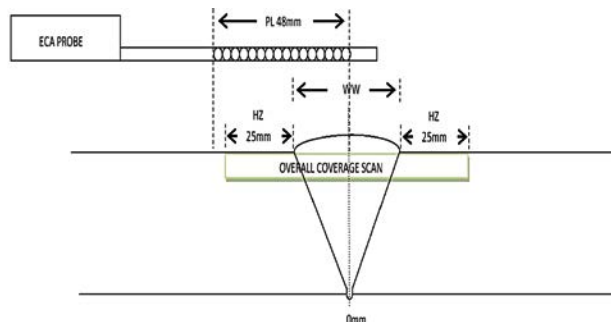
Specjalnie do tego celu zaprojektowane sondy wieloprzewodnikowe pozwoliły nie tylko na sprawny skanowanie obszaru spoiny oraz strefy wpływu ciepła, lecz również uzyskiwane czułości badania były dwukrotnie wyższe aniżeli dla sond typu weldscan.

Przedstawiony C-scan powierzchni spoiny oraz SWC przedstawia bardzo klarowny obraz powstały od naturalnego kształtu lica oraz wyraźne wskazania od nacięć kalibracyjnych. (Rys. 7). Budowa sondy już tym razem elastycznej dopasowującej się do kształtu lica (Rys. 8) oraz wykorzystanie defektoskopów wielokanałowych pozwoliło na szybkie i sprawne skanowanie lica spoiny i strefy wpływu ciepła w dwóch przejściach.



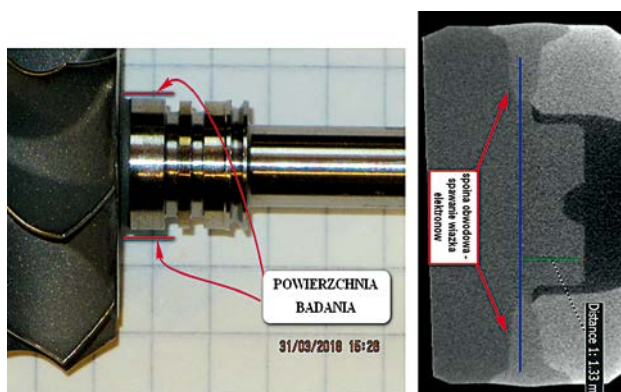
Rys. 7. Wzorec kalibracyjny z rzeczywistą spoiną ze stali Duplex 2205 i widocznymi nacięciami w spoinie i strefie HAZ oraz scan C-scan tego samego obszaru z analizą nacięcia w układzie X-Y oraz strip-charts V-H.

Fig. 7. Calibration standard with real butt weld made from Duplex 2205 and visible notches in the weld and HAZ as well as C-scan of the same area in X-Y and V-H strip chart display.

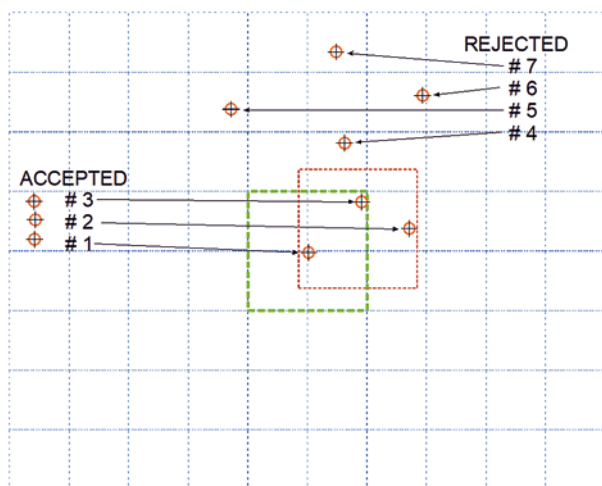


Rys. 8. Schemat lokalizacji sondy do skanowania i praktyczne badanie na rurociągu o średnicy 8 cali.

Fig. 8. Diagram of the probe location for scanning and practical weld examination on 8 inches pipeline.



Rys. 9. Badanie połączenia wykonanego wiązką elektronów wirnika z różnych materiałów ferromagnetycznych: widok fragmentu wirnika oraz przekrój wzdłużny w miejscu spoiny.
Fig. 9. Examination of the electron beam joint of the rotor made from various ferromagnetic materials: view of the rotor fragment and cross section through the weld.



Rys. 10. Wyniki badania prądami wirowymi spoiny wykonanej wiązką elektronów. Impedancja spoiny na ekranie defektoskopu jest jedynie w postaci punktu na płaszczyźnie analizy fazowej.
Fig. 10. Eddy current test results of electron beam welds. The weld impedance on the flaw detector screen is only in the form of point located on the phase analysis plane.

8. Badanie połączeń spawanych wykonanych wiązką elektronów

Badanie prądami wirowymi połączenia spawanego wiązką elektronów wymagało zupełnie innego podejścia niż zalecane w normie i omawiane powyżej. Wynikało to z założeń

przygotowania. (Rys. 9). Ponieważ całkowita głębokość spoiny nie przekraczała 2 mm jedynym rozsądnym rozwiązaniem było zastosowanie sond typu „donut” pracujących w trybie refleksyjnym. Dużym wyzwaniem podczas badania było przygotowanie zestawu wzorców kalibracyjnych z wyselekcjonowanych wcześniej i zbadanych za pomocą tomografii komputerowej elementów. Impedancja połączeń akceptowalnych znajdowały się w określonej bramce, a te, które wykrywały poza przyjętą barierę traktowane były jak odrzucone/wadliwe. Głębsza analiza położenia impedancji pozwalała na określenie rodzaju wady, czyli przyczyny odrzucenia próbki (rys.10).

9. Wnioski

Zastosowanie metody prądów wirowych na podstawie normy EN/ISO 17643 odnosi się przede wszystkim do podstawowych stali ferromagnetycznych niskowęglowych oraz austenitycznych wysokostopowych.

Stosowanie w/w normy do innych materiałów oraz technologii spawania powinno opierać się na podstawie szczegółowej, dedykowanej procedury NDT opracowanej przez doświadczony personel o wysokich kwalifikacjach w metodzie prądów wirowych.

Zastosowanie metody prądów wirowych do badania połączeń spawanych stali o złożonej mikrostrukturze ferrytyczno austenitycznej, do badania spoin z powłokami metalicznymi nanoszonymi na gorące, czy badanie połączeń spawanych wiązką elektronów jest możliwe, lecz wymaga specjalnie projektowanych sond oraz odpowiednich wzorców kalibracyjnych

10. Bibliografia/References

- [1] ISO 17643:2015 Non-destructive testing of welds - Eddy current testing of welds by complex-plane analysis.
- [2] Stress Corrosion Cracking: a Canadian prospective for oil and gas pipelines - M.Elboujdaini, M.Shehata - CANMET Canada
- [3] Correlation between NDT measurement and sigma phase contents in duplex stainless steel - E.I.Todorov; M.G.Lozev Edison Welding Institute
- [4] ASME B31.8-2003 Gas transmission and distribution piping system
- [5] Zastosowanie metody prądów wirowych do badań połączeń spawanych z powłokami ochronnymi w oparciu o normę PN-EN 1711- A.Wocial, J.Karczmarzski, P.Mantur.-Biuletyn Spawalnictwa -2004

Jakub Roemer*, Paulina Zbyrad, Paweł Paćko, Tadeusz Uhl
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Obrazowanie hiperspektralne w wykrywaniu defektów powłoki cynkowej na powierzchniach wytłoczek elementów karoserii samochodowej

Hyperspectral imaging for zinc layer discontinuity detection for stamped car body parts

ABSTRACT

The paper presents an application of hyperspectral imaging for defect detection in stamped elements of a car body. Measurements were performed on zinc-coated stamped steel sheets. The aim of the experiment was to verify the effectiveness of hyperspectral imaging for detecting discontinuities of the zinc layer. Two-dimensional hyperspectral scanning was performed on prepared steel samples. Experimental results prove the effectiveness of the proposed method for detecting zinc coating damage under laboratory conditions.

Keywords: Hyperspectral imaging; NDT; automotive; image analysis

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań nieniszczących elementów karoserii samochodowej metodą obrazowania hiperspektralnego. Eksperymenty przeprowadzono na wytłoczkach z blachy ocynkowanej. Celem badań było sprawdzenie możliwości wykrywania nieciągłości powłoki cynkowej na podstawie analizy odpowiedzi spektralnej pozyskanej drogą skanowania 2D. Wyniki badań potwierdziły przydatność metody do wykrywania defektów w warunkach laboratoryjnych.

Słowa kluczowe: Obrazowanie hiperspektralne; badania nieniszczące; przemysł samochodowy; analiza obrazów

1. Wstęp

Celem prowadzonych badań była analiza możliwości wykorzystania obrazowania hiperspektralnego (HSI) za pomocą kamery hiperspektralnej (skanera) w badaniach jakości powłoki cynkowej w blachach tłoczonych na zimno z przeznaczeniem na elementy karoserii samochodowej. Obrazowanie hiperspektralne to technika polegająca na rejestracji obrazu w wielu długościach fali elektromagnetycznej. Podejście to daje możliwość zebrania i analizowania informacji o badanej próbce w szerokim spektrum światła, w tym również we fragmentach spektrum poza obszarem światła widzialnego. W trakcie pomiaru rejestrowane jest światło odbite od badanej próbki.

Technika HSI łączy konwencjonalne obrazowanie i spektroskopię, dzięki czemu poza przestrzennym obrazem 2D, w trakcie pomiaru otrzymujemy również informacje spektralne, czyli charakterystyczne dla każdej próbki krzywe spektralne (tj. refleksyjność w funkcji długości fali). Własności materiałowe próbki, stan powierzchni oraz długość fali padającej na badany obiekt determinują, jaka część promieniowania ulega odbiciu, absorpcji i transmisji, co znajduje odzwierciedlenie w krzywych spektralnych. Uzyskane charakterystyki spektralne złożone są z setek pojedynczych widm rejestrowanych w różnych fragmentach spektrum (tj. jedna charakterystyka dla pojedynczego piksela obrazu), które zapisywane są w trójwymiarowej strukturze określanej jako „hypercube”.

Do głównych zalet wykorzystania HSI w opisanym wyżej celu zaliczyć trzeba przede wszystkim nieniszczący charakter badania oraz szybkość uzyskania wyniku pomiaru. Dodatkowo, skanowaniu podlegają mogą próbki o dużej powierzchni, a powtarzanie samych pomiarów nie stanowi problemu. Niewątpliwą zaletą jest również możliwość częściowej automatyzacji pomiarów. To z kolei daje duże pole do potencjalnego zastosowania HSI w kontroli jakości w branży motoryzacyjnej. Wadą obrazowania hiperspektralnego jest natomiast skomplikowana obróbka danych otrzymanych w wyniku skanowania próbki.

Obrazowanie hiperspektralne znajduje zastosowanie w astronomii [3], rolnictwie [4], obrazowaniu biomedycznym [5], geologii [6-7], konserwacji zabytków i sztuce [8-10]. Rozwój oprogramowania uczynił obrazowanie hiperspektralne mniej kosztownym, co pozwala na wykorzystanie tej techniki w przemyśle spożywczym [11-14] i farmaceutycznym [15] w prowadzeniu kontroli jakości [16-17].

Podstawowym założeniem prowadzonych i opisywanych w ramach niniejszej publikacji badań jest to, że otrzymane charakterystyki zarejestrowane na elementach tłoczonych na zimno mogą być wykorzystane do oceny ich powierzchni oraz wykrywania ewentualnych wad. Problem ten jest aktualnym zagadnieniem branży samochodowej, a wady powłoki cynkowej wykrywane na etapie produkcji elementów karoserii są jednymi z najbardziej uciążliwych, gdyż wiążą się bezpośrednio z aspektem wizualnym oraz są trudne do

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

usunięcia (ze względu na konieczność wymiany elementów karoserii). Przeprowadzone badania laboratoryjne potwierdziły, że na podstawie analizy krzywych spektralnych można dokonać oceny jakości powłoki cynkowej półfabrykatów, w tym lokalizacji nieciągłości powłoki. Ocena jakości powłoki zwykle prowadzona jest przez przeszkolonych pracowników. Z jednej strony posiadają oni duże doświadczenie i wprawę, z drugiej strony analiza ta jest zależna od pracownika, jego subiektywnej oceny, zmęczenia i dyspozycji. Ten rodzaj kontroli jest również stosunkowo drogi ze względu na konieczność zatrudniania dobrze wyszkolonych kontrolerów. Z tego powodu systemy kontroli jakości oparte o systemy wizyjne stają się coraz bardziej popularne i są stosowane do wspomagania operatorów. Pozwalają na nieniszczące badania, obiektywną ocenę i pełną kontrolę jakości produkcji [1-2].

Od systemów inspekcyjnych oczekuje się, że umożliwią przeprowadzanie badań w zakresie stuprocentowej kontroli jakości powłoki elementów karoserii w czasie rzeczywistym, podczas procesu produkcyjnego. Systemy te mogą zatem przełożyć się na zwiększenie wydajności procesu produkcji i minimalizację wad produkcyjnych, poprzez szybkie lokalizowanie obszarów, gdzie występuje defekt/uszkodzenie i ewentualne odrzucenie elementu bądź jego ponowne przygotowanie.

W kolejnych sekcjach artykułu przedstawiono wykorzystane w badaniach stanowisko laboratoryjne, próbki w postaci wytlóczek z cynkowanych blach stalowych, procedurę przeprowadzonych badań oraz wyniki w postaci krzywych spektralnych wraz z ich analizą zorientowaną na wykrywanie nieciągłości powłoki cynkowej.



Rys. 1. Stanowisko do badań hiperspektralnych – układ ze standardowym oświetleniem od góry (góra) oraz układ z dodatkowym oświetleniem bocznym (dół).
Fig. 1. Hyperspectral test rig – standard illumination from above (up) and an additional light source (down).

2. Stanowisko laboratoryjne

Na Rysunku 1 przedstawiono zdjęcia stanowiska laboratoryjnego do badań hiperspektralnych. Stanowisko składa się z kamery hiperspektralnej, przesuwne go stołu do pozycjonowania badanych elementów, systemu oświetlenia oraz

komputera pomiarowego klasy PC do rejestracji i obróbki danych. Wykorzystana w stanowisku laboratoryjnym kamera hiperspektralna pozwala na obrazowanie w dwóch zakresach spektralnych: VINIR (Visible and Near-Infrared) 400 – 1000 nm oraz SWIR (Short-Wavelength Infrared) 1000 – 2500 nm. Badania przedstawione w niniejszym artykule obejmują pomiary zrealizowane w paśmie VINIR. Rozdzielczość spektralna wynosiła 370 pasm (4 nm/pasmo) przy rozdzielczości przestrzennej równej 1600 pikseli. Stanowisko wyposażone jest w przesuwny stół z napędami krokowymi umożliwiającymi precyzyjną kontrolę zakresu oraz prędkości skanowania. Oświetlenie próbki realizowane jest poprzez system reflektorów halogenowych o konstrukcji umożliwiającej formowanie wiązki światła w kształt zbliżony do obszaru rejestracji kamery. Podczas badań opisanych w niniejszym artykule wykorzystane zostało dodatkowe oświetlenie boczne realizowane poprzez dwa reflektory halogenowe.

3. Badane elementy - opis

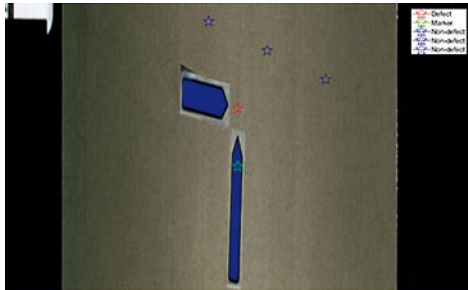
Eksperymenty laboratoryjne przeprowadzone zostały na trzech próbkach stalowych będących fragmentami różnych elementów karoserii samochodowej. Probki wykonane były metodą tłoczenia na zimno z blach ocynkowanych stalowych o grubościach 0.80 mm. Grubość powłoki cynkowej, nakładanej metodą galwaniczną wnosila 5-10 um. W kolejnym etapie wytwarzania komponentów karoserii – niebadanym w ramach niniejszej pracy – wytłóczki podlegają procesowi nakładania powłoki lakierniczej. Wady powłoki cynkowej, powstałe na etapie tłoczenia (lub etapach wcześniejszych), uwydatnione w procesie lakierniczym, kwalifikują wytłóczkę jako brak. Standardowa procedura wykrywania defektów powłoki cynkowej polega na inspekcji wizualnej prowadzonej przez wykwalifikowanego operatora. Analizowane w ramach niniejszej pracy wady są słabo lub bardzo słabo widoczne gołym okiem. Celem przeprowadzonych badań była weryfikacja skuteczności obrazowania hiperspektralnego do wykrywania trudno widzialnych uszkodzeń powłoki cynkowej elementów karoserii.

4. Eksperymenty laboratoryjne

Badania laboratoryjne przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym opisanym w rozdziale 2. Procedura pomiarowa obejmowała kolejno umieszczenie próbki na przesuwne go stole, zdefiniowanie parametrów skanowania, takich jak: punkt początkowy, końcowy oraz szybkość przesuwu, ilość zarejestrowanych w czasie pomiaru klatek oraz długość naświetlania pojedynczej klatki. Przed każdym z kolejnych pomiarów przeprowadzana była kalibracja kamery polegająca na kompensacji wpływu oświetlenia oraz kompensacji nieregularności detektora („white and black reference”). Wszystkie badania opisane w niniejszym artykule przeprowadzono przy następujących parametrach: liczba linii w pojedynczym skanie: 1000, liczba pasm: 374, liczba pikseli w pojedynczej linii: 1600 Czas pojedynczej ramki: 9.997 ms, czas naświetlania (pojedynczej ramki): 8.003 ms, odległość kamery od obiektu: 1 m.

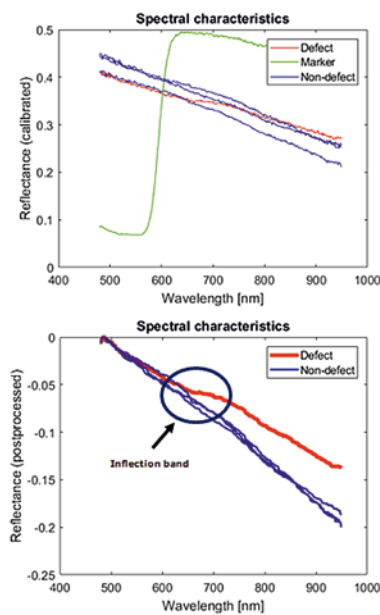
Na Rysunku 2 przedstawiono reprezentację graficzną (obraz RGB) skanu pierwszej przebadanej próbki. Markerami (gwiazda) zaznaczono na nim pięć obszarów odpowiadających

kolejno: defektowi (kolor czerwony), znacznikowi (kolor zielony) oraz trzem obszarom bez defektów (kolor niebieski). Dane z obszarów bez defektów wykorzystane zostały jako referencja dla późniejszych metod przetwarzania sygnałów. Dodatkowo obszar defektu zaznaczono niebieskimi strzałkami (markerami) fizycznie przyklejonymi do próbki.



Rys. 2. Próbkę nr 1. Obraz RGB. Obszar nad defektem (czerwony marker), obszary wolne od defektów (niebieskie markery), obszar testowy (zielony marker).

Fig. 2. Sample 1. RGB view. Defected area (red marker), defect-free area (blue marker), test area (green marker).

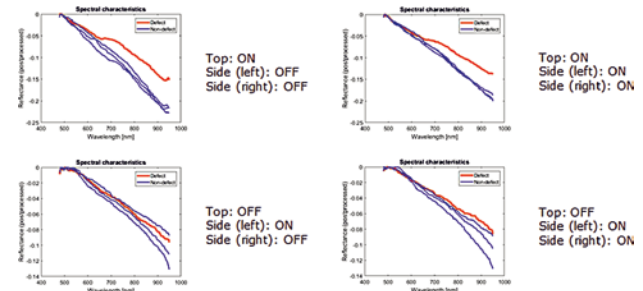


Rys. 3. Próbkę nr 1. Charakterystyki spektralne; surowe dane (góra) oraz po wstępnej obróbce (dół).

Fig. 3. Sample 1. Spectral characteristic for raw (up) and processed data (down).

Na Rysunku 3 przedstawiono charakterystyki spektralne dla obszarów opisanych na Rysunku 2. Każda krzywa przedstawia uśrednione dane zebrane z obszaru obejmującego 9x9 pikseli. Rysunek po lewej przedstawia surowe dane (bez obróbki), natomiast rysunek po prawej przedstawia dane poddane wstępnemu przetwarzaniu, polegającemu na ustaleniu zerowego przesunięcia krzywych dla początku zakresu pomiarowego. Podejście to pozwala na porównanie dynamiki każdej z charakterystyk. Na rysunku prezentującym dane surowe przedstawiono dodatkowo charakterystykę refleksyjności zarejestrowaną na przyklejonym do próbki markerze. Analiza uzyskanych krzywych spektralnych pozwala zauważyć odmienną charakterystykę odpowiadającą defektowi. Wyraźne

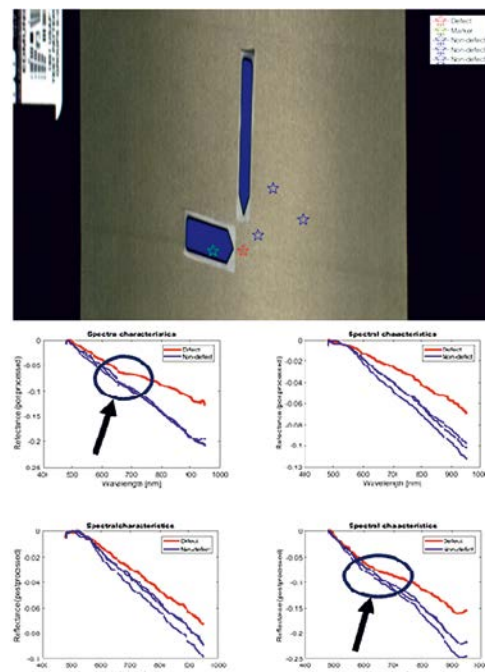
różnice w uśrednionych charakterystykach dla obszarów uszkodzonych i nieuszkodzonych widoczne są w paśmie powyżej 680 nm. W kolejnych pomiarach analizie poddano wpływ oświetlenia na uzyskane charakterystyki spektralne.



Rys. 4. Próbkę nr 1. Charakterystyki spektralne dla różnych typów oświetlenia.

Fig. 4. Sample 1. Spectral characteristic for different illumination scenarios

Na Rysunku 4 przedstawiono wyniki badań dla różnych scenariuszy oświetlenia próbki. Na kolejnych wykresach przedstawiono dane otrzymane dla oświetlenia z góry, jednocześnie wykorzystania oświetlenia z góry i oświetlenia bocznego oraz dwie charakterystyki dla oświetlenia z boku realizowanego przez jedną oraz dwie lampy równocześnie. Dane przedstawione na wykresie zostały poddane wstępnej obróbce mającej na celu wyrównanie poziomów refleksyjności. Analiza danych pozwala stwierdzić, że największy wpływ na możliwość detekcji uszkodzenia zależy od oświetlenia górnego. Wpływ oświetlenia bocznego jest pomijalny.

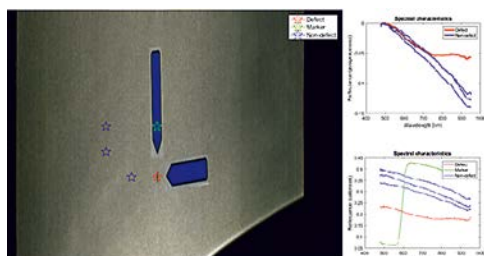


Rys. 5. Próbkę nr 1 (obrócona o 90 stopni). Charakterystyki spektralne dla różnych typów oświetlenia.

Fig. 5. Sample 1 (rotated by 90 degrees). Spectral characteristic for different illumination scenarios

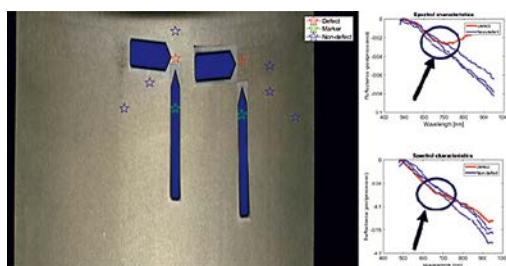
W celu oceny wpływu konfiguracji oświetlenia na zdolność systemu do wykrywania wad, przeprowadzono badania dla tego samego zestawu próbek obróconych względem systemu

oświetlenia o kąt 90 stopni (Rysunek 5). Podobnie jak w przypadku poprzednich badań, tutaj również zaobserwowano wyraźną różnicę w charakterystykach spektralnych dla obszarów obejmujących defekt. Co więcej, charakter krzywych jest jakościowo i ilościowo zbliżony do tych zarejestrowanych w poprzedniej konfiguracji. Wskazuje to na niewielką wrażliwość uzyskanych wyników na orientację oświetlenia.



Rys. 6. Próbkę nr 2. Charakterystyki spektralne dla różnych typów oświetlenia.

Fig. 6. Sample 2. Spectral characteristic for different illumination scenarios.



Rys. 7. Próbkę nr 3. Charakterystyki spektralne dla różnych typów oświetlenia.

Fig. 7. Sample3. Spectral characteristic for different illumination scenarios

Podobne badania przeprowadzono dla dwóch kolejnych próbek zawierających defekty powłoki (Rysunek 6 oraz 7). W obu przypadkach możliwe było zaobserwowanie różnic w charakterystykach spektralnych dla obszarów uszkodzonych względem obszarów wolnych od defektów.

5. Podsumowanie i wnioski

W ramach niniejszego artykułu przedstawione zostały wyniki badań elementów karoserii samochodowej. Poddanymi badaniom próbkami były wytłoczki z blach ocynkowanych, w których warstwa cynku została uszkodzona w procesie tłoczenia na zimno lub na skutek przygotowania przed procesem kształtowania. W celu analizy obszarów uszkodzonych wykorzystane zostało stanowisko badawcze wyposażone w kamerę hiperspektralną. Każda z próbek została przeskanowana w różnych warunkach oświetleniowych, a otrzymane wyniki poddane obróbce umożliwiającej porównanie charakterystyki spektralnej uszkodzeń oraz obszarów wolnych od defektów. Zrealizowane badania potwierdzają skuteczność metody wykrywania uszkodzeń powłoki cynkowej wytłoczek karoserii samochodowej. Badania przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych wskazują na umiarkowaną wrażliwość uzyskanych charakterystyk spektralnych i zawartych w nich cech uszkodzeń na oświetlenie próbek. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość jednoznacznego odróżnienia obszarów uszkodzonych

i nieuszkodzonych, nawet dla bardzo słabo widocznych defektów powłoki cynkowej w oparciu o długości fal powyżej 650 nm.

W przyszłości planowane jest przeprowadzenie operacyjnych badań hiperspektralnych w warunkach odpowiadającym linii produkcyjnej.

6. Literatura/References

- [1] J. J. Liu, M. H. Bharati, K.G. Dunn, J.F. MacGregor, "Automatic masking in multivariate image analysis using support vector machines" *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, vol. 79, 42–54, 2015.
- [2] F. Gruber, P. Wollmann, B. Schumm, W. Grähler, S. Kaskel, "Quality control of slot-die coated aluminum oxide layers for battery applications using hyperspectral imaging" *Journal of Imaging*, vol. 2, pp. 12, 2016.
- [3] E.K. Hege, D. O'Connell, W. Johnson, S. Basti, E.L. Dereniak, "Hyperspectral imaging for astronomy and space surveillance" *Imaging Spectrometry IX. International Society for Optics and Photonics*, vol. 5159, pp. 380–391, 2004.
- [4] T. Adão, J. Hruška, L. Pádua, J. Bessa, E. Peres, R. Morais, J. Sousa, "Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry" *Remote Sensing*, vol. 9(11), pp. 1110, 2017.
- [5] S. V. Panasyuk, S. Yang, D. V. Faller, D. V. Ngo, R.A. Lew, J.E. Freeman, A.E. Rogers, "Medical hyperspectral imaging to facilitate residual tumor identification during surgery" *Cancer biology & therapy*, vol. 6(3), pp. 439–446, 2007.
- [6] F.A. Kruse, J. W. Boardman, J. F. Huntington, "Comparison of EO-1 Hyperion and airborne hyperspectral remote sensing data for geologic applications" *Proceedings, IEEE Aerospace Conference*, vol. 3, pp. 3–3, 2002.
- [7] R.G. Resmini, M.E. Kappus, W.S. Aldrich, J.C. Harsanyi, M. Anderson, "Mineral mapping with hyperspectral digital imagery collection experiment (HYDICE) sensor data at Cuprite, Nevada, USA" *Int. J. Remote Sens.*, vol. 18(7), pp. 1553–1570, 1997.
- [8] C. Cucci, J. K. Delaney, M. Picollo, "Reflectance hyperspectral imaging for investigation of works of art: old master paintings and illuminated manuscripts" *Accounts of chemical research*, vol. 49(10), pp. 2070–2079, 2016.
- [9] F. Daniel, A. Mounier, J. Pérez-Arantequi, C. Pardos, N. Prieto-Taboada, S. F. O. de Vallejo, K. Castro, "Hyperspectral imaging applied to the analysis of Goya paintings in the Museum of Zaragoza (Spain)" *Microchemical Journal*, vol. 126, 113–120, 2016.
- [10] R. Pillay, J. Y. Hardeberg, S. George, "Hyperspectral imaging of art: Acquisition and calibration workflows" *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 58(1–2), 3–15, 2019.
- [11] H. Huang, L. Liu, M. Ngadi, "Recent developments in hyperspectral imaging for assessment of food quality and safety" *Sensors*, vol. 14(4), pp. 7248–7276, 2014.
- [12] Z. Xiong, D. W. Sun, H. Pu, A. Xie, Z. Han, M. Luo, "Non-destructive prediction of thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) value for freshness evaluation of chicken meat using hyperspectral imaging" *Food chem.*, vol. 179, 175–181, 2015.
- [13] A. Xie, D.W. Sun, Z. Xu, Z. Zhu, "Rapid detection of frozen pork quality without thawing by Vis–NIR hyperspectral imaging technique" *Talanta*, vol. 139, pp. 208–215, 2015.
- [14] W. H. Su, H. J. He, D.W. Sun, "Non-destructive and rapid evaluation of staple foods quality by using spectroscopic techniques: a review" *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 57(5), pp. 1039–1051, 2017.
- [15] A.A. Gowen, C.P. O'donnell, P.J. Cullen, S. E. J. Bell, "Recent applications of chemical imaging to pharmaceutical process monitoring and quality control" *European journal of pharmaceuticals and biopharmaceutics*, vol. 69(1), pp. 10–22, 2008.
- [16] R. Gosselin, D. Rodrigue, R. González-Núñez, C. Duchesne, "Potential of hyperspectral imaging for quality control of polymer blend films" *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 48(6), pp. 3033–3042, 2009.
- [17] W. Devesse, D. De Baere, P. Guillaume, "High resolution temperature measurement of liquid stainless steel using hyperspectral imaging" *Sensors*, vol. 17(1), pp. 91, 2017.

Grzegorz Grzywnowicz¹, Maciej Roskosz^{2*}, Krzysztof Porębski¹, Franciszek Kurdziel¹, Adam Kalwar¹

¹PGNiG Termika Energetyka Przemysłowa S.A., Jastrzębie Zdrój

²AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Wybrane aspekty diagnostyki elementów silników spalinowych zasilanych metanem

Selected aspects of diagnostics of components of methane-fueled internal combustion engines

ABSTRACT

The article describes the topics related to selected components of the internal combustion engine, which are key from the point of view of operational diagnostics. The degree of wear, degradation, noticed damage or symptoms of deficiencies of selected elements or technological systems have an impact on the achieved operating parameters. The above phenomena also affect the economics of the device's operation and the possibility of its components failing.

Keywords: gas engines, methane, diagnostics

STRESZCZENIE

W artykule opisano tematykę związaną z wybranymi elementami silnika spalinowego, które są kluczowymi z punktu widzenia diagnostyki eksploatacyjnej. Stopień zużycia, degradacji, zauważone uszkodzenia lub objawy niedomagań wytypowanych poszczególnych elementów lub układów technologicznych mają wpływ na osiągnięte parametry eksploatacyjne. Powyższe zjawiska mają także wpływ na ekonomikę pracy urządzenia oraz możliwość awarii jego podzespołów.

Słowa kluczowe: silniki gazowe, metan, diagnostyka

1. Wstęp

Niniejszy artykuł dotyczy wybranych układów / elementów silników spalinowych zasilanych gazem, a w szczególności poruszone zostaną zagadnienia związane z ich diagnostyką ruchową [1 - 4]. Analiza obejmuje silniki, w których paliwem jest gaz z odmetanowania kopalń. Silnik zabudowane są w przedsiębiorstwie PGNiG Termika Energetyka Przemysłowa S.A.

Spółka eksploatuje:

- 10 silników – paliwo gaz z odmetanowania kopalń JSW S.A. lub SRK Sp. z o.o. (Oddziały: Moszczenica, Pniówek oraz Suszec).
- 1 silnik – paliwo gaz sieciowy GZ51 (Oddział Wodzisław).
- 1 silnik – paliwo gaz koksowniczy (Oddział Częstochowa).

Silniki zabudowane w latach 1998 – 2015, przykładowy pokazano na rys. 1.

Poniżej podano przykładowe oznaczenie silnika w tabliczce znamionowej

- C - Caterpillar (Producent silnika)
- G - Silnik gazowy
- 260 - Seria
- X - Liczba cylindrów

W tabeli 1 przedstawiono podstawową analizę gazu z odmetanowania kopalń JSW S.A. lub SRK Sp. z o.o..

2. Podstawowe informacje o analizowanych silnikach

Konstrukcyjnie każda z jednostek jest spalinowym silnikiem tłokowym, w którym energia spalanego paliwa, w tym przypadku mieszaniny gazu z powietrzem, zamieniana jest



Rys. 1. Silnik typ CG 260 – 16 [5]

Fig. 1. Engine type CG 260 – 16 [5]

Tab. 1. Podstawowa analiza metanu (wartości średnie z poszczególnych kopalń JSW S.A. lub byłych kopalń JSW S.A – SRK Sp. z o.o.) [1]

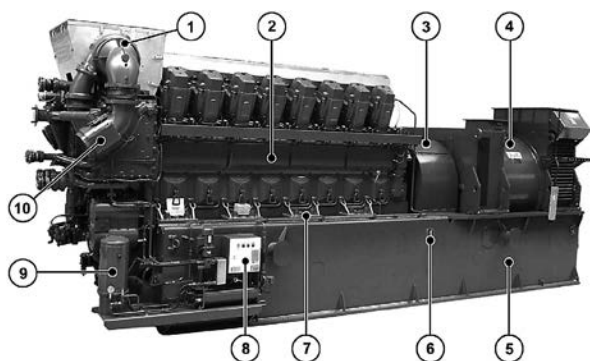
Tab. 1. Basic methane analysis (average values from individual mines of JSW S.A. or former mines of JSW S.A - SRK Sp.z o.o.) [1]

Analiza składu	Kopalnia			
	KWK JasMos obecnie SRK	KWK Ruch Zofiówka	KWK Pniówek	KWK Suszec obecnie SRK
Azot [%]	35,98	40,18	38,62	42,64
CO ₂ [%]	3,44	4,5	2,88	5,47
Etan [%]	0,1	0,1	0,14	0,14
Metan [%]	53,74	48,8	48,8	49,28
Tlen [%]	6,74	6,46	9,52	2,55
Wartość opałowa [MJ/m ³]	19,36	17,56	17,62	17,72

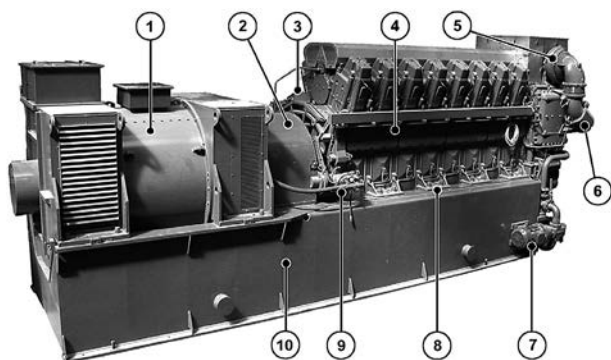
*Autor korespondencyjny. E-mail: mroskosz@agh.edu.pl

w energię mechaniczną. Energia mechaniczna przenoszona jest na wał, który poprzez sprzęgło, napędza generator wytwarzający energię elektryczną.

Poniżej pokazano trzy rysunki silnika, na których zobrazowano jego najważniejsze podzespoły i elementy. Rysunek nr 4 obrazuje oznaczenie stron silnika oraz ustala zasady oznaczeń poszczególnych cylindrów. Taka typizacja oznaczeń pomaga w czynnościach remontowych i zapobiega ewentualnej pomyłce przy np. powtórny montażu elementów głowic, zaworów, etc.



Rys. 2. Strona lewa silnika (1 Turbosprężarka, 2 Silnik, 3 Koło zamachowe / Sprzęgło, 4 Generator, 5 Rama podstawowa, 6 Tabliczka znamionowa agregatu, 7 Łożyskowanie silnika, 8 Elektryczny podgrzewacz, 9 Filtr oleju smarowego strumienia pobocznego, 10 Mieszacz gazu i powietrza) [5]
Fig. 2. Left side of the engine (1 Turbocharger, 2 Engine, 3 Flywheel / Clutch, 4 Generator, 5 Base frame, 6 Generator nameplate, 7 Engine mounting, 8 Electric heater, 9 Side stream lube oil filter, 10 Gas and air mixer) [5]

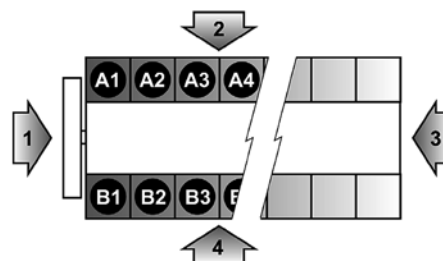


Rys. 3. Strona prawa silnika (1 Generator, 2 Flywheel / Clutch, 3 Ignition, 4 Engine, 5 Turbocharger, 6 Gas and air mixer, 7 Pre-lubrication pump, 8 Engine mounting, 9 Compressed air starter, 10 Basic frame) [5]
Fig. 3. Right side of the engine (1 Generator, 2 Flywheel / Clutch, 3 Ignition, 4 Engine, 5 Turbocharger, 6 Gas and air mixer, 7 Pre-lubrication pump, 8 Engine mounting, 9 Compressed air starter, 10 Basic frame) [5]

Strony silnika:

- 1) Strona napędowa - Strona koła zamachowego, strona sprzęgła
- 2) Strona lewa - Strona cylindrów A
- 3) Strona wolna - Strona czołowa, strona przeciwległa do sprzęgła
- 4) Strona prawa - Strona cylindrów B

Każdy cylinder posiada oznaczenie składające się z jednej litery oraz jednej cyfry. Patrząc od strony napędu, liczenie rozpoczyna się po lewej stronie od cylindra A1, a po prawej od cylindra B1. Patrząc od strony napędu silnik obraca się w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, w lewo.



Rys. 4. Oznaczenie stron silnika, numeracja cylindrów i kierunek obrotu silnika [1]
Fig. 4. Marking of engine sides, numbering of cylinders and direction of engine rotation [5]

3. Kryteria wyboru układu lub elementu silnika do diagnostyki

Zagadnienie, którego dotyczy niniejszy artykuł odnosi się do wytypowania układów / elementów silnika, których diagnostyka pozwoli na określenie ich wpływu na parametry pracy. Jest to proces złożony, ponieważ wymaga dużego doświadczenia eksploatacyjnego i sporej wiedzy eksperckiej. Określenie kryteriów, jakie powinny spełniać wytypowane części powinno być poparte wiedzą eksploatacyjną, ale także, jakże ważnym w obecnych czasach, rachunkiem ekonomicznym.

Poniżej określono kryteria, które powinny być brane pod uwagę przy wyborze takich układów / elementów silnika, które z wysokim prawdopodobieństwem pozwolą nam na poprawną diagnostykę mającej na celu zapewnienie niezawodności jego dalszej eksploatacji. Obejmują one:

- 1) Zalecenia Dokumentacji Techniczno-Ruchowej (DTR), w której znajduje się wykaz elementów, dla których podano wartości graniczne, np. wymiary, których przekroczenie lub niedotrzymanie może spowodować uszkodzenie urządzenia.
- 2) Analizę zużycia eksploatacyjnego układów silnika / elementów poprzez wykonywanie przeglądów oraz okresowych, kontrolnych pomiarów danych części oraz prowadzenie rejestru, w celu zebrania informacji o postępującym zużyciu eksploatacyjnym danego układu silnika lub jego elementu.
- 3) Umieszczenie wytypowanego układu silnika lub jego elementów wpływające na prosty i nie generując nadmiernych kosztów demontaż i po wykonaniu procedur diagnostycznych powtórny montaż, tak, aby urządzenie gotowe było do uruchomienia i pracy w całym zakresie obciążenia.
- 4) Ciężar i wymiary badanej części / elementu – gabaryty pozwalające na przeprowadzenie badań nieniszczących z jednoczesną minimalizacją kosztów towarzyszących, np. użycie specjalistycznych urządzeń dźwigowych do demontażu, np. demontaż wału głównego silnika, uniknięcie badania małych, typowych elementów, np.

elementy złączne (śruby, nakrętki).

- 5) Analiza awarii urządzenia pod kątem części / elementów odpowiedzialnych za awarię – wytypowanie najbardziej newralgicznych części / elementów, których badanie pozwoli na osiągnięcie założonego celu badawczego.
- 6) Dobór optymalnej metody badawczej, która pozwoli na weryfikację części / elementu bez konieczności dodatkowych zabiegów, np. mycie, odtłuszczenie, specjalna obróbka powierzchni etc. po przeprowadzonym badaniu.

4. Wybór układów silnika lub jego elementów

Ponad 20 letnie doświadczenie eksploatacyjne pozwala na wytypowanie kilku, opisanych poniżej układów silnika, których częsta kontrola oraz badanie jest jak najbardziej wskazana w celu utrzymania poprawnej pracy silnika. Poprawna praca to osiągnięcie mocy znamionowej oraz brak problemów eksploatacyjno-ruchowych do czasu awarii (zdarzenie losowe) lub planowanego przeglądu wynikającego z DTR lub dobrych praktyk inżynierskich. Stan techniczny silnika jest analizowany poprzez pryzmat kosztów, przychodów i zysków poprzez służby ekonomiczne, co prowadzi do wytypowania newralgicznych układów:

- układ paliwowy silnika,
- układ smarowania silnika i generatora,
- układ spalinowy.

Powyższe zestawienie należy traktować jako otwarte z możliwością dodawania w miarę zdobywania doświadczeń eksploatacyjnych, wiedzy oraz zasobności portfela nowych układów lub ich elementów. Można osiągnąć taki punkt, w którym nakłady na przeglądy, kontrole i badania zrównają się lub przewyższą koszty remontów lub przeglądów (robocizna i części zamienne). W tym momencie należy zastanowić się nad dalszą celowością i sensem prac badawczo-diagnostycznych.

5. Opis i diagnostyka wybranych układów silnika.

Silniki składają się z wielu odrębnych układów, których efektem współdziałania jest produkcja energii mechanicznej przetwarzanej w analizowanych przypadkach w energię elektryczną oraz ciepłą. W tym przypadku energia ciepła jest produktem ubocznym powstającym w wyniku konieczności schładzania korpusu silnika, mieszanki powietrzno-gazowej czy też oleju. Ten produkt uboczny jest bardzo pożądanym w elektrociepłowniach i stanowi znaczące źródło przychodów. Spaliny wylotowe o temperaturze ok. 450°C stanowią dodatkowe źródło ciepła, którego wykorzystanie z punktu widzenia efektywności termodynamicznej oraz ekonomicznej jest jak najbardziej wskazane.

Diagnostyka oraz umiejętna analiza bieżąca oraz historyczna pozyskanych danych eksploatacyjnych wpływa na uzyskiwane parametry eksploatacyjne urządzenia (moc, ciepło). Stanowi także źródło danych, które mogą być wykorzystane do analiz i badań nad zużyciem eksploatacyjnym części i podzespołów silnika. Należy jednak wziąć pod uwagę, iż pomimo tego, że silniki zaopatrzone są w dość dużą liczbę czujników i automatykę kontrolną ich pracy, istnieją

obszary, w których można uzyskać dodatkowe informacje diagnostyczne. Na podstawie wieloletnich doświadczeń eksploatacyjnych można uzupełnić w/w instalacje pomiarowe o dodatkowe elementy kontroli, aby wyprzedzić powstanie awarii lub zapobiec wcześniejszej degradacji elementów silnika. Kontrola taka może również służyć do przedłużenia czasu wykorzystania elementów silnika, a tym samym umożliwić poprzez kompilację i analizę danych ruchowych oraz oględzin / pomiarów / badań elementów, wydłużenie czasu eksploatacji silnika.

Silnik ma kilka podstawowych układów, które muszą i powinny być poddawane kontroli i badaniom, ponieważ mają one duży wpływ na wydajność oraz bezawaryjną pracę całego układu silnika i generatora.

Układ paliwowy silnika - składa się z instalacji doprowadzającej gaz do układu spalania. W tej, tzw. „ścieżce gazowej” (rysunki 5 i 6) możemy zidentyfikować kilka newralgicznych elementów, mających wpływ na pracę silnika.

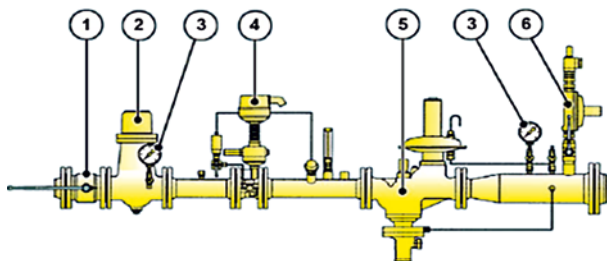
Jakość gazu ma bardzo duży wpływ na stabilną pracę silnika dlatego też kontrola stanu instalacji jest jednym z głównych elementów, na które trzeba zwrócić szczególną uwagę. Kontrola zawilgocenia, upustu kondensatu, stan filtrów (czystość) oraz pozostałych elementów to kluczowe składniki wpływające na bezawaryjną lub awaryjną pracę silnika. Na zaprezentowanej „ścieżce gazowej” znajdują się trzy newralgiczne elementy, które można doposażyć w dodatkowe pomiary kontrolne, dające nam wgląd w sytuację stanu wydajności sieci gazowej. Pierwszym elementem jest filtr gazu, który z uwagi na jakość gazu kopalnianego (zawilgocenie oraz w niektórych przypadkach zaolejenie) ulega zabrudzeniu. Zastosowanie kontroli ciśnienia pomiaru przed i za filtrem pozwala na ocenę stanu wydajności przepływu paliwa gazowego do silnika (różnica ciśnień). Drugim elementem jest tzw. „zawór zerowy” który redukuje nam ciśnienie podane do ciśnienia prawie zerowego (0,3 mm słupa wody), gdzie silnik pobiera gaz do mieszalników. Jest znanym z praktyki faktem, że przez zanieczyszczenie materiału sprężyną regulatora lub degradację membran może nastąpić niedostateczne podanie odpowiedniej ilości gazu do silnika. Zastosowanie pomiarów kontrolnych różnicy ciśnienia pozwoli na odpowiednią kontrolę nad stanem sieci gazowej przed silnikiem.

Trzecim ważnym elementem instalacji gazowej jest przerywacz płomienia, który, tak jak filtr gazu, ulega zanieczyszczeniu. Kontrola jego stanu przepustowości jest jednym z elementów oceny stanu sieci. Niestabilna praca sieci gazowej powoduje tzw. falowanie mocy, a przez to większe obciążenia elementów silnika (wał, łożyska), co prowadzi do szybszego zużycia eksploatacyjnego poszczególnych elementów urządzenia, a w ostateczności do jego awarii.

Układ smarowania silnika i generatora - układ ten jest jednym z najważniejszych, jeżeli nie najważniejszym punktem, który powinien podlegać analizie i pomiarom, w celu uniknięcia przykrych niespodzianek ruchowych.

Układ ten składa się z części smarowania elementów silnika i odbioru ciepła z układu smarowego. Silniki są dość dobrze uzbrojone w przyrządy służące do kontroli temperatury i ciśnienia oleju. Uzyskiwane dane pomiarowe zapewniają

kontrolę nad stanem obecnym (ruchowym), lecz nie pokazują trendów zmian w układzie. Takim „kontrolerem”, który pomoże wyprzedzić stan awaryjny jest okresowa analiza oleju.



Rys. 5. Ścieżka gazowa doprowadzająca paliwo gazowe do silnika (1. Urządzenie odcinające (kurek z czopem kulistym) 2. Filtrowanie gazu 3. Manometr 4. Wolumetr z przelicznikiem ilości 5. Regulator ciśnienia gazu z urządzeniem odcinającym 6. Urządzenie kontrolne ilości gazu przeciekowego) [6]

Fig. 5. Gas path leading gaseous fuel to the engine (1. Shut-off device (ball valve plug) 2. Gas filter 3. Pressure gauge 4. Volumetric with volume conversion 5. Gas pressure regulator with shut-off device 6. Leak gas quantity control device) [6]

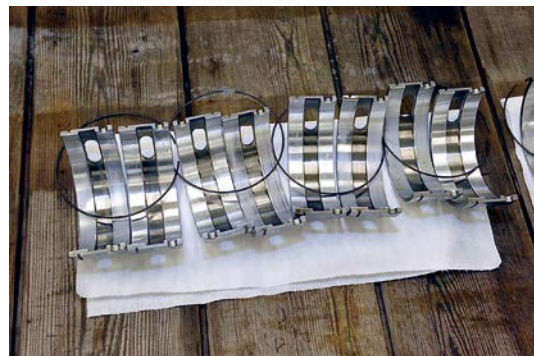


Rys. 6. Instalacja doprowadzająca paliwo gazowe do silnika - ścieżka gazowa

Fig. 6. Gas supply system for the engine - gas path

Analiza pokazuje, czy elementy silnika, takie jak: panewki – rys. 7, wał – rys. 8, tłoki – rys. 9, korbowody – rys. 9 nie ulegają degradacji. Analizy te powinny zawierać badania na obecność metali, krzemianów, siarki oraz ogólnego stanu oleju (tzw. starzenie, kwasowość, zasadowość). Smarowanie stosowane jest także na łożyskach generatora – rysunki 10 i 11, gdzie z uwagi na pory roku stężenie smaru jest zmienne i odprowadzenie nadmiaru smaru kanałami do tego przystosowanymi może ulegać zakłóceniom. Zjawisko to powoduje wzrost temperatur na łożyskach (lato do 80 °C, zima 40°C). Z doświadczenia wiadomo, że bardzo pomocnym elementem wspierającym kontrolę nad stanem łożysk generatora byłyby okresowe pomiary drgań i osiowości, które pokażą z wyprzedzeniem stan łożysk generatora. Zainstalowanie układu do ciągłego pomiaru drgań byłoby z punktu widzenia

diagnostyki wskazane i celowe. Rozwiązanie te umożliwiłoby ciągłą rejestrację oraz kontrolę kluczowego parametru.



Rys. 7. Panewki korbowodów
Fig. 7. Crankbait shells



Rys. 8. Wał układu rozrządu silnika.
Fig. 8. Engine timing shaft.



Rys. 9. Zestaw tłoka z korbą korbowodu z dolną częścią głowicy
Fig. 9. Piston with connecting rod crank with the lower part of the head



Rys. 10. Uszkodzone łożysko generatora
Fig. 10. Generator bearing defective



Rys. 11. Wirnik generatora
Fig. 11. Generator rotor

Układ spalinowy – spaliny z silnika wykorzystywane są nie tylko jako nośnik ciepła w wymiennikach, ale także pełnią rolę medium napędowego turbosprężarek silnika. Turbosprężarki posiadają pomiary temperatury spalin, obrotów oraz ciśnienia doładowania, czyli kontrolę podstawowych parametrów pracy. Podczas pracy może nastąpić, np. rozszczelnienie się kanałów spalin, co powoduje tzw.

przedmuchy i utratę części spalin służących do napędu turbin. Prosty element sprawdzającym, w początkowej fazie stopniowego osłabienia pracy turbiny, jest kontrola temperatury wzdłuż kanału spalin na obu stronach silnika. Odbywa się to poprzez pomiar temperatury (pirometrem) na osłonach kanału w rejonie każdej głowicy. Innym sposobem jest użycie kamery termowizyjnej, która daje kompleksowy obraz rozkładu temperatury na badanym elemencie, co umożliwia stwierdzenie usterki i szybką reakcję obsługi. Przegrzanie osłony podczas przedmuchu wskazuje na nieuszczelnienie, która jest powodem obniżenia wydajności pracy silnika. Drugim elementem diagnostyki i oceny pracy silnika jest pomiar NO_x, który jest bardzo dobrym wykładnikiem aktualnego spalania silnika i wskazuje czy mieszanka jest prawidłowa i czy należy skorygować parametry silnika (np. krzywą spalania).

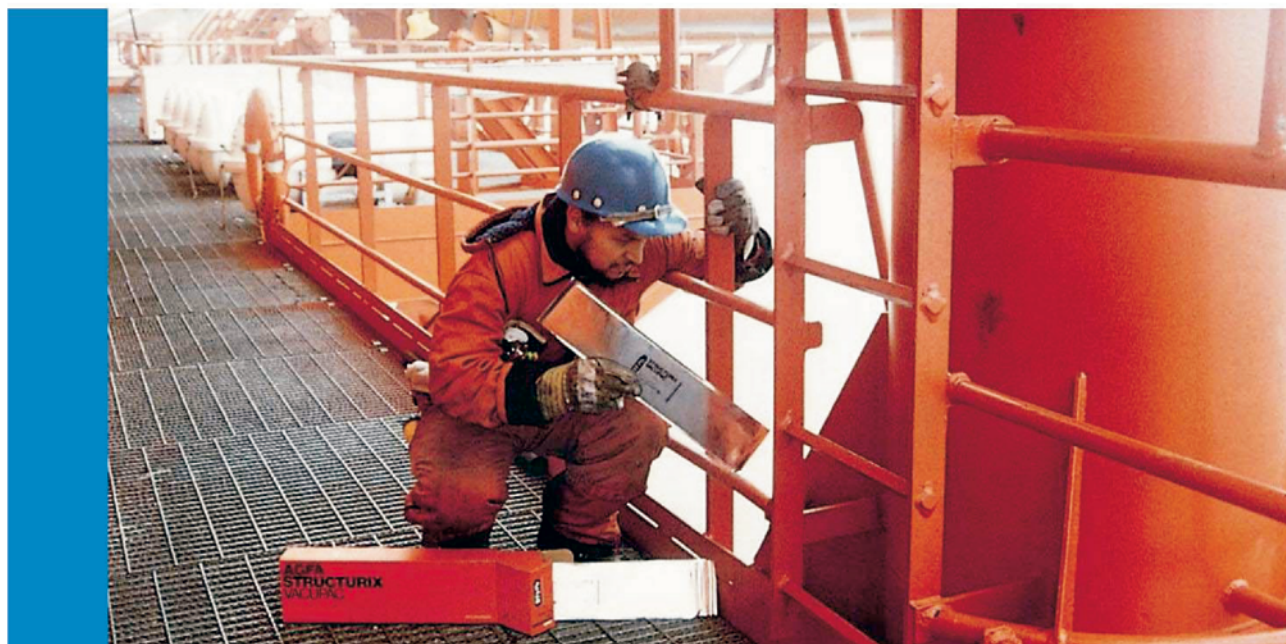
6. Podsumowanie

Poruszone zagadnienia są istotne z punktu widzenia diagnostyki eksploatacyjnej. Doposażenie pewnych układów silników w dodatkowe pomiary umożliwiłoby szybsze reagowanie na stwierdzone nieprawidłowości. Inną drogą działania mającego na celu zwiększenie niezawodności eksploatacji silników jest dobranie odpowiedniego zakresu i technik metod badań nieniszczących. Konsekwencją takiego działania mogłoby być uniknięcie awarii, a co za tym idzie nieplanowanych postojów, które generują koszty zarówno po stronie usuwania skutków awarii oraz braku produkcji energii elektrycznej i ciepła.

7. Literatura/References

- [1] Grzywnowicz G., Kalwar A., Kurdziel F.: Gaz kopalniany. Doświadczenia z eksploatacji silników gazowych Zeszyt Naukowy Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji wydawnictwo PANOVA
- [2] Gatnar K. Methane from coal beds as alternative fuel - examples of solutions in Jastrzębska Spółka Węglowa S.A. Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal. 2006;9(1):423-433
- [3] Nawrat S., Napieraj S., Kucharczyk B., Stasińska B.: Proecological technology of methane utilization from mines [w:] 22 nd World Mining Congress & Expo: 11-16 September 2011, UCTEA The Chamber of Mining Engineers of Turkey, Ankara 2011
- [4] Pająk S.: Praktyczne uwagi dotyczące pomiarów odbiorczych i gwarancyjnych układów kogeneracyjnych opartych na silnikach gazowych, XVI Forum Ciepłowników Polskich, Międzyzdroje wrzesień 2012.
- [5] DTR firmy Caterpillar
- [6] DTR firmy MWM Deutz
- [7] Książki napraw PGNiG Termika Energetyka Przemysłowa S.A.

Pomagamy osiągać cele kontroli i badań.



Jeśli świadczysz usługi kontrolne lub jesteś producentem wyrobów, które podlegają badaniom nieniszczącym, GE Inspection Technologies może pomóc w poprawieniu bezpieczeństwa i opłacalności Twojej działalności. Oferujemy największy na świecie asortyment rozwiązań NDT. Co ważniejsze, stawiamy do Twojej dyspozycji najlepszych ekspertów w dziedzinie NDT. Dzięki tej kombinacji najlepszych w swojej klasie technologii i niezrównanych usług, żadne wyzwanie przed którym mógłbyś stanąć nie jest zbyt trudne.

Certyfikowana jakość

Rozumiemy Twoją odpowiedzialność za zapewnienie jakości i rozumiemy naszą rolę w Twoim sukcesie. Możesz zaufać naszemu wsparciu w zakresie systemów radiograficznych i usług, które dają Ci przewagę w

kontroli jakości i uzyskaniu zadowolenia klienta. Kontrola jakości jest tym, co pomogło firmie **AGFA** stać się pierwszym producentem błon radiograficznych, który uzyskał certyfikat ISO dla swoich błon **STRUCTURIX** już w 1990 roku. Od tego czasu kontynuujemy jej tradycję jakości, zapewniając że cały Twój system jakości, błony, wyposażenie i odczynniki, jest produkowany zgodnie z ISO 9001-2000. Wszystkie czułości błon AGFA NDT są certyfikowane zgodnie ze standardami EN-ISO. Zatem nie powinno być niespodzianką, że GE Inspection Technologies jest zdolną oferować czułości błon **AGFA NDT**, mogące się poszczycić certyfikacją BAM, niezależnego Niemieckiego Federalnego Instytutu Badań Materiałowych.

Zintegrowany system

Wszystkie elementy systemów **AGFA NDT** są zaprojektowane i opracowane do współpracy ze sobą od początku do końca. Proponując renomowane systemy **AGFA NDT** dostarczamy Ci błony i urządzenia najszerzej stosowane w radiografii przemysłowej.

NDT System,
Twardowskiego 21,
01-643 Warszawa
+48 22 832 50 30

ndt-sys@ndt-system.com.pl

www.ndt-system.com.pl

Dariusz Kowalczyk, Łukasz Antolik*, Ireneusz Mikłaszewicz
Instytut Kolejnictwa, Warszawa

Badania wad typu head check w szynach kolejowych metodą tomografii komputerowej jako element procesu optymalizacji układu przetworników ultradźwiękowych

Researches of the head check defect in rails using CT method as a part of the proces focused on optimalisation ultrasonic transducers system

ABSTRACT

The paper presents a method and the results of the CT test of the head-check defect which commonly occurs in rails. It is one of the most dangerous defects which cause a rail discontinuity. The methods of simulation of the ultrasonic wave and projection possibilities of the real defect have been taken under consideration.

Keywords: rail, ultrasound examination; head checking

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono metodę oraz wyniki badań metodą tomografii komputerowej wady typu head-check występującej powszechnie w torach eksploatowanych. Jest to jedna z najniebezpieczniejszych wad występujących w szynach kolejowych, która może doprowadzić do pęknięcia szyny. Omówiono także metody symulacji propagacji wiązki ultradźwiękowej oraz możliwości odwzorowania wady rzeczywistej w zależności od stosowanego oprogramowania symulacyjnego.

Słowa kluczowe: szyna kolejowa; badania ultradźwiękowe; head checking

1. Wstęp

Wady szyn kolejowych tworzą się na kilku etapach produkcji oraz użytkowania. Wady wewnętrzne szyn powstają w procesie metalurgicznym tj. na etapie wytapiania i odlewania. Do wad wówczas powstających możemy zaliczyć wszelkie wewnętrzne nieciągłości materiału, głównie pozostałości jamy usadowej oraz duże skupiska wtrąceń niemetalicznych. Proces walcowania szyn kolejowych może powodować powstanie wad powierzchniowych szyn w postaci rys, wgniotów po zgorzelinie na powierzchni tocznej szyny lub powstanie struktury gruboziarnistej materiału. Z kolei proces prostowania szyn po walcowaniu sprzyja powstawaniu naprężeń wewnętrznych w szynach, co w konsekwencji może prowadzić do wystąpienia krzywizny szyn, jak również pęknięcia szyn w torach.

W wyniku poprawy jakości materiału na szyny i metod produkcji stali w ciągu ostatnich lat, uszkodzenia szyn z powodu uszkodzeń produkcyjnych znacznie zmalały. Zauważa się zwłaszcza zmniejszenie uszkodzeń spowodowanych nieciągłością materiału wewnątrz szyny. Szczególnie ważne było zmniejszenie częstotliwości występowania uszkodzeń metalurgicznych wskutek poprawy czystości stali i wad z tym związanych, jak na przykład jama usadowa. Osiągnięto to dzięki wprowadzeniu procesu próżniowego odgazowania i technice ciągłego odlewania.

Po przejściu w torach na szyny bezстыkowe spawane i zgrzewane, zmniejszyła się liczba uszkodzeń przy końcach szyn, natomiast wzrosła liczba uszkodzeń w strefie łączeń. Spowodowane było to w większości niedotrzymaniem parametrów zalecanych przez technologię spawania. Natomiast łączenia szyn metodą zgrzewania znacznie poprawiło jakość łączenia, zatem ilość wad spowodowana tą technologią na skutek wysokiej powtarzalności i kontroli procesu zgrzewania znacznie zmalała.

Zwiększenie prędkości jazdy pociągów i intensywności ruchu spowodowało, że szyny są poddawane coraz większym naprężeniom kontaktowym i stąd wynika ogólny wzrost ich uszkodzeń. Wzrosła zwłaszcza liczba uszkodzeń spowodowanych zmęczeniem materiału widocznych jako pęknięcia na powierzchni główki szyn. Stanowią one bardzo duży odsetek wykrywanych wad szyn, tj. ok. 10%.

Wadami eksploatacyjnymi powierzchni szyn o charakterze zmęczeniowym są wady typu squat i shelling [1] powstałe przeważnie na skutek miejscowego rozwarstwienia warstwy powierzchniowej szyny i jej wykruszenia, które wcześniej uległy tzw. buksowaniu lub gwałtownemu hamowaniu kół jednostki napędowej oraz falistość szyn [2]. Nalepienia oraz złuszczenie się powierzchni tocznej ma związek z mikropoślizgiem i zjawiskami tarcia przy współpracy koła z szyną. Powstała wówczas wada w postaci białej warstwy wykazuje wysoką twardość i kruchość. Pęknięcie najczęściej postępuje w głąb główki szyny i może doprowadzić do całkowitego

*Autor korespondencyjny. E-mail: lantolik@ikolej.pl

złamania szyny [3]. Przyczyny powstawania tych wady nie są do końca znane, jednak należy przypuszczać że mechanizmem powodującym powstawanie tych wad jest mechanizm zmęczeniowy, a źródłem nierówności powierzchni szyny, a także segregacja składu chemicznego oraz różnice w budowie struktury materiału szyn produkowanych w hutach. Wady tego typu występują w zdecydowanej większości na prostych odcinkach toru.

Katalog wad w szynach rozróżnia podgrupę wady typu shelling, widoczną na szynie w postaci grup szczelin na wewnętrznej krawędzi główki szyny. Jest to forma nadpęknięć kontaktowo-zmęczeniowych, tj. head check w różnych konfiguracjach. W łukach torów o małym promieniu powstają drobne spękania krawędzi główki szyny jako efekt działania obrzeża koła, które ulegają rozwojowi w dalszej eksploatacji (Rys. 1). Nadpęknięcia te tworzą się na skutek silnego miejscowego zgniotu odwęgłonej warstwy powierzchniowej główki szyny. Powierzchnia szyny na skutek zgniotu wywołanego naciskiem koła, generuje szereg wyżej opisanych wad. W pierwszym etapie są to płytkie, mikropęknięcia, które w miarę przeniesionego obciążenia przez szyny ulegają rozrostowi. W miarę zwiększania stopnia zgniotu, następuje zmniejszanie stopnia płynięcia warstwy powierzchniowej, jej umocnienie poprzez tworzenie defektów strukturalnych, następnie w miejscach najsilniejszego zgniotu, a po przekroczeniu granicy wytrzymałości materiału tworzenie się nadpęknięć. Zachodzący jednocześnie proces ścierania powierzchni tocznej jest zbyt wolny, aby proces powierzchniowego umocniania materiału był eliminowany. Na odcinkach prostych torów w miejscach o niskiej stabilności rusztu torowego, w szczególności w miejscach widocznych wychłapek przy podkładach, nadpęknięcia występują w postaci głębokich wad krawędzi główki szyny, rzadziej ułożone (Rys. 2). Mechanizm tworzenia się tych wad jest podobny, z tym że dochodzą dodatkowo silne naprężenia zginające związane z nierównością torów oraz zwiększoną dynamiką jazdy na tych odcinkach, co wspomaga powstawanie i rozwój pęknięć zmęczeniowych [4].

Wszystkie wady typu head check występujące w torach eksploatowanych są stwierdzane na podstawie inspekcji wizualnej, co uniemożliwia określenie przybliżonej głębokości, a tym samym możliwego zagrożenia dla integralności szyny kolejowej. Analiza wielu przypadków praktycznych oraz literatury wskazuje, że możliwe jest określenie przybliżonej głębokości wady, choćby metodą prądów wirowych, lecz w praktyce nie jest to stosowane z powodzeniem. Dodatkowo szacowanie głębokości zalegania wady jest bardziej dokładne dla szyn nieobrabianych mechanicznie w trakcie eksploatacji. Po wielokrotnych zabiegach szlifowania długość wady na powierzchni może słabiej korelować z pęknięciem znajdującym się w głębi główki szyny.

W ramach prowadzonych badań przemysłowych podjęto się między innymi wypracowania zoptymalizowanego układu przetworników ultradźwiękowych dedykowanego do wykrywania m. in. wad typu head check charakterystycznych dla polskiej sieci kolejowej i przy uwzględnieniu różnego stopnia zużycia główki szyny. Do tego celu wykorzystano tomografię komputerową jako jedyną dostępną

metodę umożliwiającą poznanie geometrii wady w całym przekroju szyny z wymaganą rozdzielczością.



Rys. 1. Wada head check w stanie początkowym [źródło własne]
Fig. 1. Head check defect at the early stage [own source]



Rys. 2. Wada head check w stanie zaawansowanym [źródło własne]
Fig. 2. Head check defect at the advanced stage [own source]

2. Wykonanie badań

W przedstawionej części eksperymentu uwagę poświęcono stosunkowo zaawansowanym wadom określanym w katalogu wad numerem 2223, które są charakterystyczne dla prostego odcinka toru. Te powtarzające się cyklicznie wady stanowią ogromne niebezpieczeństwo z uwagi na możliwość wystąpienia wielokrotnego złamania szyny na długości kilku metrów. Z uwagi na wymiary szyny kolejowej oraz biorąc pod uwagę fakt, że wady główki szyny znajdują się w najgrubszym miejscu przekroju szyny, a także zważając na ograniczoną moc dostępnych stanowisk CT, wykonano wstępne próby skanowania przygotowanych próbek przy dostępnych mocach lamp. Zadowalające rezultaty uzyskano na wycinkach o wymiarach ok. (szer/dł/wys) 40/60/15 mm. przy użyciu lampy o mocy 300 kV i prądu w zależności od próbki 220-250 A. Przy ekspozycji stosowano filtry 1 mm. Cu + 0,5 Sn. Przykładowe próbki do badań zaprezentowano na poniższych zdjęciach (Rys. 3-4).

W celu uzyskania zadowalającej rozdzielczości do obserwacji pęknięć i mikropęknięć, próbki ustawiano na stanowisku badawczym pod różnymi kątami, umożliwiając wiązce przechodzenie przez materiał próbki jak najkrótszą drogą. Pomimo tego wykonanie szczegółowego mapowania jednej próbki zajmowało nawet kilka godzin. Jako mierzalne cechy charakterystyczne wad HCH przyjęto:

- długość wady na powierzchni tocznej szyny;
- głębokość zalegania wady mierzona w płaszczyźnie przekroju poprzecznego szyny;
- kąt propagacji w płaszczyźnie poziomej mierzony względem kierunku jazdy;
- kąt propagacji w płaszczyźnie pionowego przekroju poprzecznego szyny.



Rys. 3. Wada head check przygotowana do badań CT [źródło własne]

Fig. 3. Head check defect prepared to CT test [own source]



Rys. 4. Wada head check przygotowana do badań CT [źródło własne]

Fig. 4. Head check defect prepared to CT test [own source]

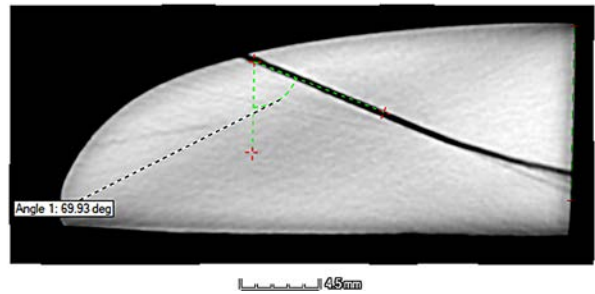
Na rysunku (Rys. 5) przedstawiono przykład prezentacji 3D próbki w wizualizerze myVGL natomiast na rysunku (Rys. 6) przedstawiono metodę pomiaru kąta propagacji pęknięcia w płaszczyźnie przekroju poprzecznego. W tabeli (Tab. 1) przedstawiono wyniki pomiarów cech charakterystycznych wad wykonanych przy użyciu wspomnianego edytora.

W pierwszej kolejności zauważono, że kąt propagacji względem osi podłużnej szyny zawiera się w przedziale ($35-52^\circ$), co jest charakterystyczną wartością dla wszystkich wad typu head check. W publikacji [5] określono jeszcze szerszy zakres kątowy propagacji pęknięcia na powierzchni szyny wynoszący ($35-70^\circ$) w zależności od przeważającej geometrii styku koła z szyną. W analizowanych przypadkach odległości pomiędzy pęknięciami wynosiły zazwyczaj od ok. 3 do 20 mm, co jest zależne od materiału, z którego wykonano szynę oraz od lokalnych warunków eksploatacyjnych. Kolejną cechą charakterystyczną jest kąt wnikania wady w głąb materiału, który mierzono jako kątowe odchylenie pęknięcia od normalnej. Na podstawie kilkunastu pomiarów oszacowano, że wartość tego kąta zawiera się w przedziale ok. ($60-70^\circ$) w 50% przypadków, natomiast z uwagi na lokalne uwarunkowania oraz zmianę kąta propagacji w głębi materiału kąt ten wynosi od 52° do 105° względem normalnej. Ostatnia wartość wskazuje, że wada może rozwijać się nie tylko w głąb materiału szyny, ale również może propagować równolegle do powierzchni tocznej, co może grozić odspojeniem się części główki szyny.



Rys. 5. Wizualizacja próbki w programie w edytorze „myVGL”

Fig. 5. Visualisation of the sample using „myVGL” software



Rys. 6. Wizualizacja sposobu pomiaru kąta wnikania wady w głąb materiału

Fig. 6. Visualisation of the angle measurement

Tab. 1. Wyniki pomiarów cech charakterystycznych wad HCH

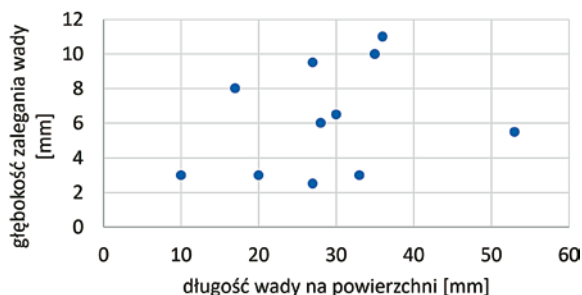
Tab. 1. Results of measurements of the characteristic features of the HCH defects

Nr próbki	Długość wady na powierzchni [mm]	Głębokość zalegania wady [mm]	Kąt propagacji wady w płaszczyźnie poziomej [deg]	Kąt propagacji wady w płaszczyźnie pionowej [deg]
5_19	35	10	43	69
	53	5,5	43	67-100
5_19_a	27	9,5	48	72
	30	6,5	46	68-105
	17	8	44	65-85
8_19	36	11	46	65-100
	28	6	52	52
19_19_II	10	3	35	88
	20	3	35	85
	27	2,5	35	88
	33	3	35	90

Gdyby pomiary kąta wnikania pęknięcia wykonywano względem normalnej poprowadzonej właśnie w tym miejscu, kąt ten oscylowałby zazwyczaj w przedziale ($0-20^\circ$) i nie stanowiłby wartościowego odniesienia do powierzchni tocznej szyny, po której prowadzone są głowice do badań techniką ultradźwiękową.

Ostatnimi interesującymi autorów parametrami wad typu head check są wymiary liniowe, czyli długość wady na powierzchni i głębokość zalegania wady mierzona od najwyższego punktu główki szyny. Wielkości te scharakteryzowano w powyższej tabeli (Tab. 1) oraz zilustrowano na poniższym wykresie (Rys. 7). Okazuje się, że w tym przypadku brak jest jednoznacznej zależności. Przypuszczalnie większa ilość pomiarów mogłaby stanowić narzędzie rozstrzygające. Jednak niezależnie od tego można sądzić, że im dłuższa wada na powierzchni jest większa, tym większa jest szansa na głębsze jej zaleganie pod powierzchnią toczną szyny.

Z punktu widzenia techniki ultradźwiękowej istotnym wnioskiem z analizy danych jest ograniczenie w postaci stosunkowo niewielkiej głębokości zalegania przedstawionych próbek wynoszącej od ok. 3 mm do 11 mm pomimo ich stosunkowo dużego stopnia degradacji. Z drugiej strony można podjąć próbę wykorzystania efektu narożnikowego, którego sposób tworzenia opisano w kolejnym rozdziale.



Rys. 7. Zależność głębokości zalegania wady od jej długości na powierzchni [źródło własne]

Fig. 7. Relationship between the depth of the crack and his length on the surface [own source]

3. Model symulacyjny wady

W zależności od wymaganej dokładności prowadzenia symulacji, spodziewanych efektów końcowych i możliwości środowiska symulacyjnego, wada ekwiwalentna może mieć różny charakter. Najbardziej precyzyjne rozwiązanie stanowi przetworzenie warstw radiogramów na chmurę punktów czytelną przez środowisko symulacyjne. Takie rozwiązanie umożliwia symulację rzeczywistej wady przy uwzględnieniu niedoskonałości obiektu badanego.

Jedno z uproszczonych rozwiązań można przygotować w oparciu o wiedzę na temat wartości kąta wnikania wady w materiał w płaszczyźnie pionowej i poziomej, które pozyskano i przedstawiono w poprzednim rozdziale. Można wówczas wykreślić płaszczyzny, których przecięcie wyznacza uproszczoną geometrię wady możliwą do zaimplementowania w środowisku symulacyjnym. Innym rozwiązaniem z kolei jest symulowanie wady rzeczywistej poprzez odpowiednią wykorzystanie predefiniowanej wady oraz określenie jej orientacji i rozmiaru. Każda z przedstawionych metod będzie znacznie bardziej dokładnym i profesjonalnym narzędziem w stosunku do metody prób i błędów, bardzo pracochłonnej i wymagającej niekiedy wykonywania bardzo skomplikowanych obliczeń. Kiedy obiektem badanym jest wyrób o skomplikowanej geometrii, np. szyna kolejowa, zastosowanie komputerowego środowiska symulacyjnego stanowi już pewien standard.

Metoda elementów skończonych, w skrócie MES, jest obecnie jednym z podstawowych narzędzi modelowania numerycznego we współczesnej nauce i technice. Jednak jej zastosowanie do modelowania propagacji fal ultradźwiękowych w typowych obiektach będących przedmiotem badań nieniszczących natrafia na istotne trudności metodologiczne oraz ograniczenia praktyczne związane z bardzo dużymi wymaganiami odnośnie wydajności systemów komputerowych [6].

Innym rozwiązaniem jest wykorzystanie dedykowanej platformy wykorzystującej do symulacji i analizy propagacji fal ultradźwiękowych metodę ray tracing (np. BeamTool firmy Eclipse Scientific). Przedstawione oprogramowanie nie tylko modeluje propagację wiązki ultradźwiękowej, ale pozwala również symulować zobrazowania typu A-scan, projektować głowice ultradźwiękowe dla technik PE, TT, ToFD, Phased Array oraz próbki odniesienia do kalibracji projektowanych systemów ultradźwiękowych [7].

W celu symulacji propagacji wiązki ultradźwiękowej w szynie kolejowej, a także mając na względzie jak najdokładniejsze wykrywanie wad typu head check, analizy optymalizacyjne zostaną wykonane w oparciu o platformę BeamTool 9, przy wykorzystaniu predefiniowanych wzorców wad, których rozmiary oraz umiejscowienie na przekroju głowki szyny zostaną zdefiniowane po dyskretyzacji zebranych dostępnych wad rzeczywistych.

4. Podsumowanie

Proces optymalizacji układu przetworników ultradźwiękowych jest bardzo złożonym zadaniem. Celem jest zdefiniowanie najbardziej optymalnej głowicy lub zestawu głowic do skutecznego wykrywania możliwie jak najmniejszych wad typu head check o cechach charakterystycznych dla krajowej infrastruktury kolejowej tj. zróżnicowanie charakteru wady i zróżnicowanie stopnia zużycia szyny. Założono w tym przypadku, że możliwe jest osiągnięcie czułości badania dla wad head check w postaci ekwiwalentnego otwarka o średnicy 3 mm., co w pełni wypełnia cel, jakim jest podniesienie poziomu bezpieczeństwa przewozu kolejną osób i towarów. W artykule przedstawiono dwa kluczowe kroki z zaplanowanego procesu, jakimi są pozyskanie modeli wad rzeczywistych i ich analiza oraz modelowanie wad sztucznych w oprogramowaniu symulacyjnym. W przedstawionych krokach bardzo istotne jest zebranie jak największej ilości informacji o występującej wadzie i jej naturze oraz przełożenia tych informacji na dane, które będą stanowiły wartość użytkową dla etapu symulacji propagacji wiązki ultradźwiękowej.

5. Literatura/References

- [1] Mikłaszewicz I. „Wady i uszkodzenia szyn, powstawanie i eliminacja”. Prezentacja na Konferencji Drogi szynowe, Warszawa 2015
- [2] Bogdaniuk B., Massel A., Pomiar nierówności powierzchni tocznych szyn na liniach PKP, Problemy Kolejnictwa, zeszyt 120, CNTK Warszawa 1995
- [3] Licow R., Tomaszewski F., Analiza przyczyn zużywania się (uszkodzenia) szyn w zależności od warunków techniczno – eksploatacyjnych toru, Pojazdy szynowe nr 4/2017
- [4] Mikłaszewicz I., Odwęglanie a wady powierzchni głowki szyn, Problemy Kolejnictwa, Tom 58/2014, Zeszyt 165, str. 85-96.
- [5] Heyder R. Nowy Katalog UIC uszkodzeń szyn - Technika Transportu Szynowego nr. 1-2:2002
- [6] Mackiewicz S. Modelowanie propagacji fal ultradźwiękowych w badaniach nieniszczących. Materiały konferencyjne. XXV Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane 20-22 marca 2019
- [7] Katz T. Oprogramowanie do modelowania propagacji fal ultradźwiękowych metodą ray tracing. Materiały konferencyjne. XXV Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane 20-22 marca 2019

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

DPIdea

Technicy firmy DPIdea posiadają ponad 10 letnie doświadczenie w branży przemysłowej. Jesteśmy autoryzowanym i wyłącznym przedstawicielem na Polskę firm, produkujących aparaturę laboratoryjną do badań z zakresu inżynierii materiałowej.

W naszej ofercie posiadamy między innymi urządzenia i materiały do:

- spektrometrii materiałowej, m.in. pierwszy na świecie przenośny spektrometr z możliwością badania węgla;
- badań ultradźwiękowych, m.in. defektoskopy Phased Array i TOFD, defektoskopy klasyczne, głowice, grubościomierze;
- badań radiograficznych, m.in. radiografia cyfrowa, systemy automatyczne, błony RTG Agfa;
- badań magnetyczno-proszkowych oraz penetracyjnych - środki oraz akcesoria;
- badań metalograficznych mikrostruktur metali;
- oględzin trudno dostępnych miejsc techniką wizualną

Urządzenie i materiały przez nas oferowane spełniają najwyższe światowe standardy. Nasze doświadczenie, zaangażowanie i dbałość o każdego Klienta pozwala nawiązać długotrwałą i owocną współpracę w zakresie wyposażenia laboratoriów kontroli jakości. Naszymi klientami są uznane firmy m.in. z przemysłu samochodowego, lotniczego, zbrojeniowego, maszynowego i wielu innych.

Serdecznie zapraszamy do współpracy!



Departament Komunikacji PGE GiEK

Magazyn Pracowników GK PGE Pod Parasolem, czerwiec 2019

Laboratorium Badań Materiałowych Elektrowni Bełchatów z tytułem Lidera Bezpieczeństwa Technicznego w rankingu organizowanym przez Urząd Dozoru Technicznego (UDT) w kategorii: Laboratoria Najwyższy poziom

Laboratorium Badań Materiałowych elektrowni współpracuje z Urzędem Dozoru Technicznego od ponad 40 lat wspólnie przeprowadzając remonty, modernizacje i naprawy urządzeń ciśnieniowych.



Gala „Lider Bezpieczeństwa Technicznego” - wyróżnienie dla laboratorium odebrali Andrzej Kopertowski, wiceprezes zarządu PGE GiEK oraz Andrzej Legeżyński, dyrektor techniczny Elektrowni Bełchatów

W tym czasie elektrownia uzyskała wiele uprawnień oraz kwalifikacji metod badawczych, a personel laboratorium pozyskał certyfikaty w dziedzinie badań nieniszczących. Nasze laboratorium od 2002 r. posiada udokumentowany System Zarządzania oraz Świadectwo Uznania Laboratorium Urzędu Dozoru Technicznego z numerem jeden (LBU-001/20-17). Nagroda jest dla nas tylko wyróżnieniem, ale przede wszystkim zobowiązaniem do wykonywania swoich obowiązków z najwyższą starannością i zachętą do dalszej wyťažonej pracy – mówił podczas gali Andrzej Legeżyński, dyrektor techniczny Elektrowni Bełchatów.

Wydział Kontroli Technicznej, w ramach którego funkcjonuje Laboratorium Badań Materiałowych, powstał praktycznie na początku działalności Elektrowni Bełchatów – mówi Piotr Kuśmierski, kierownik wydziału. – Od ponad 40 lat do jego głównych zadań należy wykonywanie pomiarów i badań niszczących i nieniszczących zarówno w remontach i modernizacjach, jak również podczas bieżących napraw. W zakresie uznania mamy 15 metod badawczych, w tym również nowoczesne techniki ultradźwiękowe, termograficzne

czy metalograficzne. W badaniach stosujemy innowacyjne rozwiązania, takie jak choćby drony inspekcyjne.



Pracownicy Wydziału Kontroli Technicznej w ramach, którego funkcjonuje Laboratorium Badań Materiałowych

Laboratorium Badań Materiałowych to jednak przede wszystkim ludzie o ogromnym doświadczeniu i wiedzy potwierdzonej licznymi uprawnieniami i certyfikatami wydanych przez instytucje krajowe, jak i zagraniczne. Nasz personel to jedenastu inżynierów i dwudziestu techników, którzy wykonując badania, są w stanie stwierdzić, które urządzenia nadają się do dalszej bezpiecznej eksploatacji.



Bogusław Olech¹, Tadeusz Morawski²

¹PTBNiDT SIMP Oddział w Szczecinie

²Usługi Techniczne i Ekonomiczne Level, Warszawa

Aleksandra Sytlak

Wspomnienie

W dniu 13 września 2018 roku społeczność badań nieniszczących z głębokim żalem pożegnała Szanowną Koleżankę Aleksandrę Sytlak.



31. KKBN Szczyrk 2002, posiedzenie ZG PTBNiDT SIMP

Aleksandra Sytlak urodziła się 12.10.1935 roku w Poznaniu. Zdobyła magisterium z fizyki o kierunku doświadczalnym i specjalizacji radiospektroskopia. Zdobyte wykształcenie znacznie ułatwiło jej dalszy rozwój ukierunkowany na obszar badań nieniszczących. Pracę zawodową rozpoczęła w Biurze Projektów Przemysłu Gumowego. W 1960 roku zajęła się badaniami w Instytucie Technologii Drewna.

Od 1975 roku była związana z Zakładem Doświadczalnym Przemysłu Ciągnikowego w Ursusie, gdzie pracowała na stanowisku Kierownika Działu Badań Nieniszczących i Pomiarów przez blisko 20 lat. Tam też była współautorem wielu wdrożeń w obszarze badań nieniszczących na liniach produkcyjnych.



KKBN Międzyzdroje 2003, Posiedzenie Zarządu Głównego PTBNiDT SIMP

Zajmowała się badaniami i opracowywaniem procedur kontroli materiałów hutniczych, odlewów, odkuwek, elementów spawanych, lutowanych na różnych etapach procesu technologicznego jak również uwierzytelnianiem narzędzi pomiarowych zgodnie z uprawnieniami posiadanymi przez Urząd Miar tj. twardościomierzy, maszyn wytrzymałościowych, kluczy dynamometrycznych, stanowisk hamowniczych. W ramach jej obowiązków było również wykonywanie wielu działań z zakresu metrologii oraz badanie poprawność wskazań urządzeń w liniach technologicznych i montażu wyrobu końcowego. Prowadziła stały nadzór nad stanowiskami badań nieniszczących w procesach wytwarzania, poczynawszy od materiałów wejściowych poprzez poszczególne etapy, aż do wyrobu końcowego oraz szkoliła personel w zakresie obsługi i interpretacji uzyskanych wyników na poszczególnych stanowiskach kontrolnych. Wdrażała nieniszczące metody kontroli w przemyśle motoryzacyjnym. Jej główne zainteresowania zawodowe skupiały się wokół badań ultradźwiękowych, radiacyjnych i magnetycznych. W tych też obszarach otrzymała nadany w dniu 11.09.1987 roku Dyplom-Tytułarny: III Stopień Kwalifikacji Specjalisty, w zakresie badań ultradźwiękowych, radiologicznych i magnetycznych, nadany przez Radę ds. Badań Nieniszczących Zarządu Głównego SIMP. Była Rzecznikową SIMP w specjalnościach 202 (Wytrzymałość materiałów i konstrukcji) i 218 (Metody kontroli jakości). W 1969 roku otrzymała dwie nagrody Komitetu Nauki i Techniki Polskiej Akademii Nauk za udział w realizacji „ważnej dla gospodarki narodowej pracy w zakresie rozwoju nauki i techniki”. W 1973 roku brała udział w pracach 7. Międzynarodowego Kongresu Badań Nieniszczących ICNDT obradującego w czerwcu w Warszawie.

Członkiem SIMP została w 1975 roku, od początku działając aktywnie w sekcjach zajmujących się badaniami nieniszczącymi i diagnostyką. W latach 1994-2010 pełniła funkcję Sekretarza Zarządu Polskiego Towarzystwa Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP (PTBNiDT SIMP) kolejno za kadencji Prezesów Jana Mottla, Gracjana Wiśniewskiego i Bogdana Zająca. W okresie od 1994 do 2001 roku była Członkiem Zarządu Oddziału PTBNiDT SIMP w Poznaniu, a w latach następnych Oddziału Warszawskiego. Uczestniczyła w wielu szkoleniach i kursach podnosząc swoje kwalifikacje zawodowe. Tworzyła kadry badaczy nieniszczących biorąc w latach 1975-2000 czynny udział w szkoleniu specjalistów na I i II stopień kwalifikacji w zakresie badań magnetyczno-proszkowych i penetracyjnych na kursach organizowanych przez

Ośrodki SIMP w Warszawie i Poznaniu.

Brała czynny udział w większości Krajowych Konferencji Badań Nieniszczących (KKBN) i wielu innych konferencjach i sympozjach. W 1978 roku, na 8. KKBN w Kazimierzu n/Wisłą, przedstawiła referat „Selekcja stali narzędziowej w oparciu o zjawiska termoelektryczne”. W 1985 roku podczas 14. KKBN w Kiekrzu była współautorem referatu „Wpływ wad zgrzewania tarcowego ujawnionych metodą UT na wytrzymałość złącza”. Podczas 24. KKBN w Kiekrzu w 1995 roku pełniła honory gospodarza wystawy, a podczas 33. KKBN i 38. KKBN organizowanych w Licheniu była członkiem Komitetów Organizacyjnych.

Za zasługi na rzecz SIMP, została odznaczona kolejno Brązową (1985 rok), Srebrną (1989 rok), a następnie podczas 30. KKBN w Szczyrku w 2001 roku Złotą Honorową Odznaką

Jako pierwsza i dotychczas jedyna napisała historię Towarzystwa wydaną przez Oddział SIMP w Poznaniu „50-lecie Działalności Polskiego Towarzystwa Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP 1959-2010”. Miała swój znaczący udział w reaktywacji działalności PTBNI DT SIMP w Oddziale Poznań. Uczestniczyła w uroczystości wmurowania Tablicy Pamiątkowej poświęconej Panu Profesorowi Zdzisławowi Pańłowskiemu na Zamku w Rydzynie w dniu 15.11.2014.

Była jedyną spoza Oddziału w Szczecinie Członkinią PTBNI DT SIMP wspierającą od początku inicjatywy powołania elektronicznego Biuletynu PTBNI DT SIMP i kwartalnika naukowo-technicznego Badania Nieniszczące i Diagnostyka. Czynnie i aktywnie do końca, uczestniczyła w tworzeniu ich treści, co znalazło swój oddźwięk



50 - lecie

DZIAŁALNOŚCI
POLSKIEGO TOWARZYSTWA
BADAŃ NIENISZCZĄCYCH
I
DIAGNOSTYKI TECHNICZNEJ SIMP
1959 - 2010

*Koleżance Bogusławi z
okazji 40. lecia pracy
zawodowej w B.N. A.Sytlak*
Poznań 2013

Pamiątkowy wpis Aleksandry w jej książce



30. KKBN Szczyrk 2001, Aleksandra Sytlak odbiera honorową odznakę SIMP



Odsłonięcie tablicy pamiątkowej Pana Prof. Zdzisława Pawłowskiego,
Rydzyzna, 15.11.2014.

w Sprawozdaniu Zarządu Polskiego Towarzystwa Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP z działalności w kadencji 2014-2018 w słowach „Powołano Redakcję Biuletynu w składzie: Aleksandra Sytlak, Justyna Szlagowska-Spychalska, Bogusław Olech, Grzegorz Psuj i Bogdan Piekarczyk.

Wydano 10 numerów Biuletynu z bardzo różnorodnymi i ciekawymi informacjami, zarówno z życia bieżącego, jak i dotyczące historii Towarzystwa. Na podkreślenie zasługuje wyjątkowe zaangażowanie kol. Aleksandry Sytlak, kol. Bogusława Olecha i kol. Grzegorza Psuja”. Była Delegatem z Oddziału w Poznaniu na Walnym Zgromadzeniu Delegatów PTBniDT SIMP w dniu 09.05.2019 roku w Warszawie.

Ostatni raz spotkaliśmy się z Aleksandrą w Szczecinie 15.02.2018 roku, kiedy to podczas Posiedzenia Oddziału Towarzystwa gościliśmy Ją wraz z Kolegami z Oddziału Towarzystwa w Poznaniu: Andrzejem Kalembą i Jakubem Kowalczykiem, który wygłosił wówczas referat „Ocena połączeń klejowych metodą ultradźwiękową”.

Msza święta odprawiona została dnia 19 września 2018 roku w kościele pw. Chrystusa Dobrego Pasterza ul. Nowina 1. Pogrzeb odbył się tego samego dnia na Cmentarzu Junikowo w Poznaniu.



Dom Mechanika w Szczecinie, Posiedzenie PTBniDT SIMP
o/ Szczecin - 15.02.2018 r. Wykład wygłasza Kol. Jakub
Kowalczyk – Politechnika Poznańska, Aleksandra wsłuchana
w Kolegę. W drugim rzędzie w jasnej marynarce Senator RP
dr inż. Mieczysław Ustasiak

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 8,5 cm, natomiast dwuszpaltowego 17,5 cm.

Rysunki wykonane komputerowo winny być w oddzielnych plikach w formacie JPEG min. 300 DPI.

Jednostki - układ SI.

Artykuł powinien zawierać:

- informacje o autorach: stopnie naukowe lub zawodowe, instytucja i zdjęcia (w osobnym pliku);
- imię i nazwisko;
- tytuł artykułu;
- streszczenie (do 0,5 strony) z informacją dotyczącą problematyki artykułu, metodyki badań, obliczeń lub analizy problemu oraz wyniku końcowego;
- tekst wraz z podziałem na zatytułowane rozdziały;
- wnioski końcowe;
- wykaz literatury; pozycje literatury numerowane cyframi arabskimi w kwadratowych nawiasach i w kolejności cytowanej w tekście.

Artykuły w formie pliku Word należy przysłać na adres e-mail: wydawnictwo@ptbnidt.pl wraz z wypełnionym drukiem „Zgłoszenie publikacji” dostępnym na naszej stronie [www: www.bnid.pl](http://www.bnid.pl).

OGŁOSZENIA I ARTYKUŁY PROMOCYJNE

Ogłoszenia i artykuły promocyjne w kwartalniku "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" – czasopiśmie ogólnopolskim dostępnym w formie drukowanej 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: 1-3/2019 oraz archiwalne: 1–2/2016; 1–2/2017; 3/2017; 4/2017; 1/2018; 2/2018; 3/2018 i 4/2018.

Prenumerata realizowana jest przez Redakcję. Kontakt i zamówienia pod adresem mailowym: prenumerata@bnid.pl.



AC 054

Ochrona antykorozyjna

NAUKA DLA PRZEMYSŁU

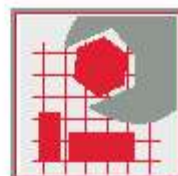
Instytut Spawalnictwa zaprasza na kurs:

OCHRONA POWŁOKOWA KONSTRUKCJI STALOWYCH

Wymagania dla personelu nadzorująco-kontrolującego
jakość zabezpieczeń antykorozyjnych wg normy ISO 12944
pod kątem wymagań normy PN EN 1090.

**Szkolenie daje możliwość
uzyskania kwalifikacji i certyfikatu kompetencji
z zakresu kontroli i odbioru jakości
powłok antykorozyjnych wg ISO 12944.**





CONVENIENT AND RELIABLE, FOR LONG LASTING OPERATION



Ergonomic handle

Flexible metal sleeve against unwished cable bending

Ultra-compact and powerful UV or white light source: MR[®] 90 or MR[®] 90 W (optional)



Monolithic, shock-proofed housing IP65 provides exceptional protection of the poles-housing joints from detection media penetration



Sealed switcher

pohl & pohl

AUTHORIZED **MR** DISTRIBUTOR

pohl & pohl sp.z.o.o.
ul. Malczewskiego 1A
PL47-400 Racibórz - Polska

Tel. – 48 32 418 20 00
Fax – 48 32 415 77 08
post@ndt.pl

www.ndt.pl